

Rapport de sécurité

Remplacement de la centrale nucléaire de Mühleberg



Demande d'autorisation générale pour le remplacement de la centrale nucléaire de Mühleberg

Requérante : Ersatz Kernkraftwerk Mühleberg AG

Établi par : **Resun AG**, société de planification commune aux Axpo-Konzerngesellschaften Nordostschweizerische Kraftwerke AG et Centralschweizerische Kraftwerke AG ainsi qu'à BKW FMB Energie AG.

Toutes les cartes sont reproduites avec l'autorisation de swisstopo (BM082270)

Résumé

Introduction

Afin de garantir la sécurité d'approvisionnement en électricité à long terme, il convient de créer une capacité de remplacement pour l'actuelle centrale nucléaire de Mühleberg (KKM) de la société BKW FMB Energie S.A. ainsi que pour les contrats de fourniture d'électricité conclus avec l'étranger et arrivant à expiration. Par conséquent, la société Ersatz Kernkraftwerk Mühleberg AG prépare la construction et l'exploitation d'une nouvelle centrale nucléaire (EKKM), et dépose pour cela une demande d'autorisation générale conformément aux exigences de la Loi fédérale sur l'énergie nucléaire (LENu). Le site retenu pour la nouvelle installation est Niederruntigen, à proximité immédiate de l'actuelle centrale de Mühleberg sur la rive gauche de l'Aar.

Ladite demande d'autorisation générale doit contenir toutes les indications nécessaires à son appréciation, notamment dans le domaine de la sécurité nucléaire telles que fixées dans l'Ordonnance fédérale sur l'énergie nucléaire (OENu). Celles-ci font donc l'objet du présent rapport de sécurité, dont l'objectif principal est d'évaluer l'adéquation du site en vue de la construction et de l'exploitation d'une installation nucléaire.

Les études menées et les documents préparés dans le cadre de la demande d'autorisation générale ont été établis, à la demande de la requérante susmentionnée, par une équipe de spécialistes hautement qualifiés, soutenus par des experts externes reconnus. Les documents accompagnant la demande d'autorisation générale ont été vérifiés à l'aide d'un dispositif minutieux d'assurance qualité.

Utilisation et caractéristiques de l'installation nucléaire

Le but de l'installation est d'utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité tout en incluant la gestion des biens nucléaires, le conditionnement et l'entreposage de déchets radioactifs provenant de l'installation même et d'autres installations nucléaires en Suisse. En option, elle sert à fournir de la chaleur industrielle ou urbaine.

Il est prévu de doter la centrale nucléaire de remplacement de Mühleberg d'un réacteur à eau légère d'une puissance électrique de 1 450 MW avec une tolérance d'environ plus / moins 20%. Différents types de réacteurs, correspondant à l'état actuel de la technique, ont été considérés dans le cadre des études pour la demande d'autorisation générale. Le réacteur et le fournisseur de l'installation seront choisis ultérieurement lors de la préparation de la demande de permis de construire. Une conception de l'installation couvrant largement les types de réacteur étudiés a été prise comme base pour les études effectués ; la disposition et les dimensions approximatives des principaux bâtiments du site ont été déterminées en conséquence. Pour réduire les transports de matières radioactives, des installations destinées au conditionnement et à l'entreposage de matières radioactives sont prévues sur le site en plus de la centrale nucléaire.

Le système de refroidissement du réacteur prévu est une tour de refroidissement hybride fonctionnant avec du courant d'air forcé selon le principe de refroidissement combiné sec et humide. Cela permet d'éviter dans une large mesure les traînées de vapeur visibles et de réduire considérablement la hauteur de la tour de refroidissement.

Le réseau électrique est conçu pour recevoir l'énergie produite par la centrale EKKM. Le site est bien intégré au réseau routier.

Pour l'étude et la conception de la centrale EKKM, les dernières nouveautés scientifiques et techniques ainsi que les expériences nationales et internationales en la matière sont prises en considération.

Caractéristiques du site

Données géographiques du site

L'espace naturel, la répartition de la population et l'utilisation des sols dans les environs du site ne présentent pas de caractéristiques susceptibles d'entraîner un risque quelconque. La préparation et la mise en oeuvre de mesures de protection d'urgence conformément aux ordonnances sont possibles.

Aucune installation industrielle ou militaire à proximité du site ne représente un risque pour la sécurité de l'installation nucléaire. Cela vaut également pour le trafic sur les routes et les voies ferroviaires. Les deux conduites de gaz environnantes sont également trop éloignées pour constituer un risque.

Le site n'est pas dans le voisinage immédiat de grands aéroports. Cependant, dans un périmètre de 50 km se trouvent différents aéroports régionaux et des aérodromes. C'est pourquoi le risque d'une chute de petits ou grands avions (commerciaux) ainsi que d'avions militaires a été calculé : ce risque est faible dans l'ensemble et ne remet pas en cause le choix du site. Les exigences relatives au dimensionnement de la centrale nucléaire de remplacement de Mühleberg tiendront compte de l'impact et des conséquences d'une chute d'avion, telles que l'embrasement du carburant et la dispersion des débris.

Météorologie

Les conditions météorologiques du site sont bien documentées et évaluées. Il s'agit d'un climat typique de l'Europe atlantique, convenant généralement à la construction et à l'exploitation d'une centrale nucléaire.

Les éventuels risques météorologiques, tels la foudre, les vents violents et les tornades ont été étudiés : ces derniers ne remettent pas en cause le choix du site. Lors du dimensionnement de la centrale nucléaire de remplacement de Mühleberg, les effets possibles de ces événements extérieurs seront considérés.

Hydrologie

Les écarts de températures et du niveau des eaux fluviales correspondent aux conditions habituelles rencontrées en Europe centrale. Des niveaux d'eau bas peuvent être observés, en particulier l'hiver ; grâce aux systèmes de refroidissement, tels qu'ils sont conçus, de l'EKKM, le refroidissement de la centrale n'en est cependant pas affectée.

Des analyses ont été effectuées quant à d'éventuels risques d'inondation suite à des ruptures de barrage ainsi qu'aux conséquences d'une crue exceptionnelle. Les niveaux atteints en cas de crue sont nettement inférieurs à ceux liés à des ruptures de barrages. La conception de l'installation,

comportant une terrasse adéquatement dimensionnée, prévoit de maîtriser tous les événements hydrologiques importants pour la sécurité. La mise à l'arrêt sûr du réacteur est garanti à tout moment.

Géologie et sismologie

Les données relatives à la géologie, au sol de fondation et aux risques sismiques peuvent être considérées comme fiables, celles-ci s'appuyant sur l'une des meilleures banques de données géologiques et géotechniques et sur la plus importante étude de l'aléa sismique au monde (étude PEGASOS). Les propriétés et la résistance du sol de fondation associé à un faible risque sismique étayent le choix approprié du site.

Tous les bâtiments et installations assurant la sécurité sont conçus pour faire face aux éventuels effets d'un tremblement de terre ainsi qu'aux possibles événements consécutifs afin d'éviter les accidents en découlant.

Autres événements extérieurs

Le potentiel de risque de tous les événements externes possibles a fait l'objet d'une étude. En plus des risques susmentionnés, des événements tels que la sécheresse, le givrage, la foudre,, les incendies de forêts et les événements biologiques ont été examinés ; des combinaisons possibles de risques comme des conditions estivales et hivernales exceptionnelles (combinaison de températures élevées et très basses avec par exemple des périodes de sécheresse et de givre) ont également été étudiées. Les études montrent que la conception et le dimensionnement appropriés de l'installation autorisent des mesures de protection suffisantes contre les événements survenant sur le site.

Évaluation globale du choix du site

Le choix du site se fonde sur les caractéristiques favorables suivantes :

- conditions météorologiques stables
- quantités d'eau suffisantes aux fins de refroidissement
- bonnes possibilités d'aménagement
- bonne liaison au réseau haute tension suisse
- formations géologiques stables et sol de fondation de qualité
- zone à faible activité sismique
- environnement à faible densité de population avec une utilisation des sols principalement agricole
- absence d'installations industrielles dans les environs et exclusion des risques associés.

Les risques liés aux événements extérieurs ne remettent pas en cause le choix du site. Compte tenu des avancées scientifiques et techniques actuelles, ceux-ci peuvent être maîtrisés par le biais notamment de mesures relatives à la construction, à la conception et à l'organisation.

Les événements internes à l'installation, liés à la conception, seront étudiés en détail une fois le type de réacteur choisi et seront présentés dans la procédure d'autorisation de construire.

Aspects de radioprotection

Le choix de l'installation nucléaire s'effectue notamment dans le souci de minimiser les doses et d'optimiser l'exposition aux rayonnements. Le rapport de sécurité traite uniquement des risques liés aux rayonnements ionisants.

La radioprotection et l'exposition prévisionnelle à proximité de l'installation en fonctionnement normal et en cas d'incidents d'exploitation répondront aux exigences de l'OENu. Des mesures de protection appropriées passives et actives ont été prises pour maintenir l'exposition radiologique de la population en cas d'incidents d'origine interne ou externe en dessous des valeurs limites prévues par la loi.

Étant donné que l'EKKM sera construite juste à côté de l'installation nucléaire actuelle, les deux installations peuvent être considérées, d'un point de vue radiologique, comme une seule source de rayonnements sur un site unique avec une seule valeur directrice de dose liée à la source. Dans le cas d'une exploitation du site par différents organismes, ceux-ci devront convenir d'un dispositif contractuel. Les valeurs limites définies par l'autorité de surveillance seront respectées.

Dans le cadre de la demande de permis de construire, des analyses d'incidents radiologiques, telles qu'exigées par l'Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), sont effectuées afin de prouver que les valeurs limites d'incidents radiologiques requises sont respectées.

Aspects personnels, organisationnels et humains

Les lignes directrices définies en matière de personnel et d'organisation ainsi que le développement organisationnel prévu ont été déterminés pour les différentes phases du projet. De l'étude à la désaffectation, des considérations de sécurité adéquates, étendues et complètes sont prévues ; l'ingénierie nucléaire, les facteurs humains et organisationnels (Human and Organizational Factors, HOF) ainsi que la gestion de la qualité y occupent une place centrale.

L'ingénierie nucléaire et des Facteurs Humains et Organisationnels (IFH & O) est considérée dès le départ comme un tout : la nouvelle installation nucléaire, en tant que système sociotechnique, est évaluée comme un ensemble. L'interaction homme – technique – organisation est ainsi établie afin que les processus de conduite de projet et d'exploitation se déroulent sans heurt et en temps utile et que les exigences légales en matière de sécurité nucléaire soient satisfaites. Les effectifs, la formation et la mobilisation du personnel assureront au projet les compétences techniques et méthodiques requises.

Résumé

Le rapport de sécurité montre qu'une installation nucléaire peut être construite et fonctionner en toute sécurité sur le site de Niederruntigen et que les dispositions légales correspondantes peuvent être respectées.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Objet de la demande d'autorisation générale	1
1.2	Conception et contenu du rapport de sécurité	3
1.3	Expérience de la requérante	4
2	Le Projet EKKM	5
2.1	But	5
2.2	Grandes lignes du projet	5
2.2.1	Installation de production d'électricité	5
2.2.2	Installations de conditionnement et d'entreposage	8
2.3	Description de l'installation	11
2.3.1	Vue d'ensemble du site d'implantation	11
2.3.2	Conception de l'installation	15
2.3.3	Les bâtiments essentiels et leurs dimensions	16
2.3.4	Disposition des ouvrages	19
2.3.5	Desserte et logistique	21
2.3.6	Actuelle centrale nucléaire de Mühleberg (KKM)	27
2.4	Refroidissement	27
2.4.1	Introduction	27
2.4.2	Refroidissement du réacteur	29
2.4.3	Refroidissement auxiliaire	31
2.4.4	Refroidissement de secours	33
2.4.5	Conditions climatiques extrêmes, réchauffement climatique	34
2.4.6	Résumé	35
2.4.7	Exploitation parallèle KKM – EKKM	35
2.5	Respect des exigences légales et réglementaires	37
2.5.1	Mesures de protection, niveaux de sécurité et principes régissant la conception	37
2.5.2	Réglementation concernant l'exploitation normale et les défaillances	39
2.5.3	Analyses de défaillances	40

2.6	Protection en cas d'urgence	41
2.6.1	Situation initiale	41
2.6.2	Organisation de l'exploitation en cas d'urgence	42
2.6.3	Protection en cas d'urgence interne à l'installation	43
2.6.4	Protection en cas d'urgence externe à l'installation	43
2.6.5	Appréciation succincte	47
2.7	Classification des systèmes, structures et composants	48
2.8	Gestion de la qualité (GQ)	48
2.8.1	GQ pour la viabilité du site et la demande d'autorisation générale	48
2.8.2	GQ pour le projet d'étude, la construction, l'exploitation et la désaffectation	50
3	Caractéristiques du site	51
3.1	Géographie et population	51
3.1.1	Géographie	51
3.1.2	Population	53
3.1.3	Utilisation des sols	70
3.2	Voies de transport, installations industrielles	81
3.2.1	Installations industrielles	81
3.2.2	Installations militaires	83
3.2.3	Répercussions d'accidents sur des installations de gaz naturel à haute pression	84
3.2.4	Liaisons routières	87
3.2.5	Répercussions d'accidents majeurs lors de transports de gaz propane liquide par la route et le rail	88
3.2.6	Transport d'essence	92
3.2.7	Transport de chlore	93
3.3	Météorologie	95
3.3.1	Données météorologiques	95
3.3.2	Systématique	99
3.3.3	Météorologie locale sur le site de Mühleberg	100
3.3.4	Régime des vents	100

3.3.5	Température de l'air et humidité relative	112
3.3.6	Givrage	117
3.3.7	Précipitations	118
3.3.8	Neige	124
3.3.9	Foudre	125
3.3.10	Grêle	126
3.3.11	Développement attendu, réchauffement du climat	127
3.3.12	Classes de propagation pour le site de Mühleberg	129
3.3.13	Evaluation	145
3.4	Evénements hydrologiques	147
3.4.1	Introduction	147
3.4.2	Crues	148
3.4.3	Evénements d'inondation dans le bassin versant	156
3.4.4	Autres aspects hydrologiques	166
3.4.5	Résumé, importance pour la viabilité du site et la conception de l'installation	173
3.5	Géologie, sol de fondation, sismologie	175
3.5.1	Géologie	175
3.5.2	Sol de fondation	196
3.5.3	Sismologie et risque de séismes spécifique au site	207
3.5.4	Evaluation de l'adéquation du site	253
3.6	Potentiel de risque	255
3.6.1	Evénements déclenchés au sein de l'installation	255
3.6.2	Evaluation des éventuels événements externes	255
3.6.3	Combinaison de risques	292
3.6.4	Interaction entre l'EKKM et la KKM	294
3.6.5	Risques liés aux incendies	295
3.6.6	Evaluation globale des événements externes	295
3.6.7	Protection contre les actes de tiers non autorisés	295
3.7	Raccordement au réseau électrique	297

3.7.1	Topologie du réseau/sous-station de Mühleberg Est	297
3.7.2	Transport de l'énergie électrique depuis la centrale EKKM	298
3.7.3	Stabilité du réseau	300
3.7.4	Alimentation en électricité	304
3.7.5	Alimentation en électricité de secours	305
3.7.6	Evaluation du raccordement au réseau et de l'alimentation en électricité	306
4	Radioprotection et exposition aux rayonnements	307
4.1	Exigences légales et principes de la radioprotection	307
4.1.1	Généralités sur l'exposition aux rayonnements dus à la centrale EKKM	307
4.1.2	Bases légales	307
4.1.3	Justification et optimisation de l'exposition aux rayonnements	309
4.1.4	Principes aux fins de limiter l'exposition aux rayonnements	310
4.2	Exposition aux rayonnements au voisinage de l'installation	315
4.2.1	Respect de la limite maximale admissible de l'exposition aux rayonnements au voisinage de l'installation	316
4.2.2	Exposition aux rayonnements due aux rejets de substances radioactives	316
4.2.3	Exposition aux rayonnements par le rayonnement direct	317
4.2.4	Exposition aux rayonnements dues aux émissions lors d'incidents d'exploitation et d'accidents	318
4.2.5	Contrôle des émissions d'exploitation	318
4.2.6	Respect des valeurs limites d'émissions	319
5	Personnel et organisation, facteurs humains et organisationnels	321
5.1	Introduction	321
5.2	Principes relatifs au personnel et à l'organisation	321
5.3	Développement du domaine organisationnel dans le projet EKKM	323
5.4	Facteurs humains et organisationnels, bases et objectifs	326
5.5	Vue d'ensemble de la démarche FOH	327
5.6	Principes de la démarche FOH	328
5.7	Portée de la démarche FOH	329

5.8	Réalisation de la démarche FOH	332
5.9	La démarche FOH dans la phase d'étude de l'installation	332
5.9.1	Objectifs	332
5.9.2	Etapas	333
5.10	La démarche FOH dans la phase de construction de l'installation	341
5.10.1	Objectifs	341
5.10.2	Etapas	342
5.11	La démarche FOH dans la phase d'exploitation de l'installation	345
5.11.1	Objectifs	345
5.11.2	Etapas	346
5.12	La démarche FOH dans la phase de désaffectation de l'installation	347
	Références	349
	Index des tableaux	357
	Index des figures	363
	Glossaire des figures	371

1 Introduction

1.1 Objet de la demande d'autorisation générale

Une lacune dans l'approvisionnement en électricité s'annonce en Europe et en Suisse. Dans notre pays notamment, et ce, dès 2030, après l'arrêt des centrales nucléaires de Beznau et de Mühleberg ainsi qu'à l'expiration des contrats de fourniture à long terme conclus avec des installations nucléaires françaises, nous devons faire face à une insuffisance d'approvisionnement en électricité faute de capacités supplémentaires, en particulier sans nouvelles centrales nucléaires. Elle est évaluée à près de la moitié de notre consommation électrique actuelle, soit environ 60 TWh. Ce pronostic a été présenté dans diverses études, surtout celles établies par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN).

La stratégie visant, en Suisse, à assurer un approvisionnement énergétique sûr, fiable, respectueux de l'environnement et économique s'appuie sur quatre piliers. Le premier pilier consiste à accroître l'efficacité de l'ensemble du système énergétique, soit pour tous les types d'énergie. Des mesures d'accroissement de l'efficacité peuvent amener à substituer des agents énergétiques fossiles par de l'énergie électrique, par exemple par l'installation de pompes à chaleur. Le deuxième pilier vise une augmentation sensible de la production de nouvelles énergies renouvelables (énergie d'origine éolienne et solaire ou tirée de la biomasse) et de petites centrales hydro-électriques. Étant donné que ces deux premiers piliers ne sauraient à eux seuls, et de loin, réduire et/ou couvrir la quantité d'électricité nécessaire, un troisième pilier consiste à exploiter également de grandes centrales. Comme le montre la stratégie de l'EPF en matière d'énergie et de protection du climat, il faut tout d'abord viser à réduire les émissions de CO₂ et d'autres gaz importants pour le climat. Toute nouvelle grande centrale doit donc pouvoir être exploitée avec un rejet minimal de telles émissions. Dès 2020, seules des centrales nucléaires seront en mesure de satisfaire à une production de base importante et à une exploitation respectueuse de l'environnement. Le quatrième pilier encourage le partenariat avec l'étranger en matière d'énergie, en particulier par le biais d'échanges et d'opérations commerciales.

L'actuelle centrale nucléaire de Mühleberg (KKM) de la société BKW FMB Energie S.A. (FMB) sur le site de la commune de Mühleberg dans le canton de Berne doit être remplacée à long terme. En outre, il faut aussi trouver une solution de remplacement pour les contrats de fourniture d'électricité conclus avec des centrales nucléaires françaises. Pour mettre à disposition cette capacité de remplacement en temps voulu, et ainsi garantir l'approvisionnement ininterrompu en électricité, il est prévu de construire une nouvelle centrale nucléaire sur le site de Niederruntigen, soit à proximité immédiate de la KKM sur la rive gauche de l'Aar. Cette centrale nucléaire de remplacement, que l'on désignera ici par l'abréviation EKKM, est une centrale équipée d'un réacteur moderne à eau légère qui, sur le plan technologique, s'appuie sur les technologies éprouvées des plus récentes centrales nucléaires suisses déjà en exploitation.

Le but de l'installation est d'exploiter l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité, ce qui comprend l'utilisation d'éléments nucléaires ainsi que le conditionnement et l'entreposage des propres déchets nucléaires ou des déchets d'autres installations nucléaires suisses. En option, l'on envisage aussi la mise à disposition de chaleur industrielle ou de chauffage urbain.

Conformément à la Loi fédérale sur l'énergie nucléaire (LENu ; RS 732.1) [1], quiconque entend construire ou exploiter une installation nucléaire doit avoir une autorisation générale délivrée par le Conseil fédéral. Pour ouvrir la procédure d'octroi de l'autorisation, il faut déposer une demande contenant les indications et documents nécessaires¹ tels que définis dans l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire (OENu ; RS 732.11)². Par conséquent, la demande d'autorisation générale pour l'EKKM doit contenir les pièces suivantes :

- Rapport de sécurité
- Rapport de sûreté
- Rapport d'impact sur l'environnement
- Rapport relatif à la concordance avec l'aménagement du territoire
- Concept de désaffectation
- Justificatif de l'évacuation des déchets radioactifs produits par l'installation.

Dans les rapports relatifs à la demande d'autorisation générale, l'adéquation du site de Niederruntigen constitue une partie intégrante essentielle pour la construction et l'exploitation d'une installation nucléaire. Le site retenu présente les caractéristiques favorables suivantes :

- Bon raccordement au réseau haute tension suisse
- Quantité d'eau suffisante de l'Aar aux fins de refroidissement
- Faible densité de population et affectations principales agricoles
- Absence d'installations industrielles dans les environs et exclusion correspondante des risques associés
- Difficulté d'accès pour le transport aérien et donc risque très restreint de chutes d'avions éventuelles
- Sol de fondation à faible activité sismique
- Conditions météorologiques stables.

Les rapports précités font une description détaillée de ces caractéristiques, et montrent que le potentiel de risques lié à la centrale nucléaire de remplacement peut être réduit au minimum avec le site retenu et/ou la conception de l'installation.

La conception de l'installation de remplacement, justement, contribuera également à réduire de manière sensible le potentiel de risques. Bien que cette conception et/ou le type de technologie du réacteur ne soient pas encore définitivement fixés à l'heure actuelle, certaines caractéristiques sont d'ores et déjà définies comme suit :

¹ Art. 42 LENu [1]

² Art. 23 OENu [2]

- La conception se base sur la technologie des réacteurs à eau légère éprouvée depuis de longues années
- Équipements de sécurité modernes, p. ex. sous forme de dispositif de confinement de la fusion du cœur du réacteur pour atténuer les conséquences d'un accident grave
- Pour garantir une exploitation sûre pendant toute la durée de vie de l'installation, l'on utilise des structures et des composants et des systèmes de très grande qualité et avec une redondance¹ et une diversité² élevées
- Interface homme-machine moderne.

1.2 Conception et contenu du rapport de sécurité

Le présent rapport de sécurité est celui exigé selon OENu [2]³. Il décrit par conséquent les caractéristiques du site retenu de Niederruntigen, le but et les grandes lignes du projet de construction et d'exploitation de l'EKKM, l'exposition au rayonnement prévisible de l'installation ainsi que les données personnelles et organisationnelles importantes.

Le rapport de sécurité est conçu en fonction des exigences thématiques déjà citées.

Le chapitre 2 traite du but et des grandes lignes du projet et fournit un aperçu général du site retenu de Niederruntigen ainsi que de la conception de l'installation. Cette dernière comprend le raccordement au réseau haute tension, le refroidissement et l'organisation sommaire des ouvrages qui composent l'installation. Il aborde également le stockage des déchets radioactifs et des éléments combustibles usés ainsi que les bases de la protection en cas d'urgence.

Le chapitre 3 décrit les caractéristiques du site de Niederruntigen, surtout en matière de géographie et de démographie, de voies d'accès et d'installations industrielles, de météorologie, d'hydrologie et de géologie et de risques sismiques. Il contient aussi des indications sur le potentiel de risques.

Le chapitre 4 traite de la radioprotection et de l'exposition aux rayonnements aux environs immédiats de l'installation.

Enfin, le chapitre 5 présente les principes et les mesures projetées pour tenir compte des facteurs humains et organisationnels (Human and Organizational Factors, HOF) ainsi qu'en ce qui concerne l'organisation du projet et le développement de cette dernière.

1 Pour une seule et unique fonction, l'on dispose de composants identiques ou similaires qui ne sont normalement pas nécessaires.

2 Pour la même fonction, l'on utilise plusieurs composants de conception, de configuration ou de fabrication différentes.

3 Art. 23 let. a OENu [2]

1.3 Expérience de la requérante

Afin d'assumer leur responsabilité en matière d'approvisionnement énergétique de la Suisse et de protection du climat, aussi à l'avenir, les sociétés Nordostschweizerische Kraftwerke AG (NOK), Centralschweizerische Kraftwerke AG (CKW) et BKW FMB Energie S.A. (FMB) ont constitué un partenariat visant à planifier et à réaliser en temps utile les centrales nucléaires de remplacement de Beznau (EKKB) et Mühleberg (EKKM).

La requérante, la société de construction et d'exploitation « Centrale nucléaire de remplacement Mühleberg S.A. », avec siège à Mühleberg, canton de Berne, est une filiale commune à FMB, NOK et CKW.

Les partenaires ont acquis de longues années d'expérience dans l'étude, la construction et l'exploitation d'installations nucléaires.

FMB est l'unique propriétaire et exploitante de l'actuelle centrale nucléaire de Mühleberg dotée d'un réacteur à eau bouillante, alors que NOK est l'unique propriétaire et exploitante de l'actuelle centrale nucléaire de Beznau dotée de deux réacteurs à eau sous pression. Les deux centrales nucléaires, à savoir celles de Beznau et de Mühleberg sont exploitées depuis respectivement 1969 et 1972, et ont fait preuve, tant l'une que l'autre, d'un très bon comportement, à la fois sur le plan de la sécurité et de l'exploitation. Les installations nucléaires ont été rééquipées en permanence, afin d'être toujours au niveau le plus récent de la technique.

Avec ses sociétés sœurs de NOK Holding AG, NOK est l'actionnaire majoritaire, alors que les FMB ont une participation minoritaire de 9.5% dans la société Kernkraftwerk Leibstadt AG, exploitante de la centrale nucléaire de Leibstadt. Mandatée par le Conseil d'administration, la société NOK est responsable depuis 1999 de la direction de cette centrale.

Par ailleurs, les sociétés NOK et CKW participent aussi à la centrale nucléaire de Gösgen.

Tant les sociétés NOK que les FMB possèdent des droits de prélèvement d'électricité dans des centrales nucléaires françaises.

2 Le Projet EKKM

2.1 But

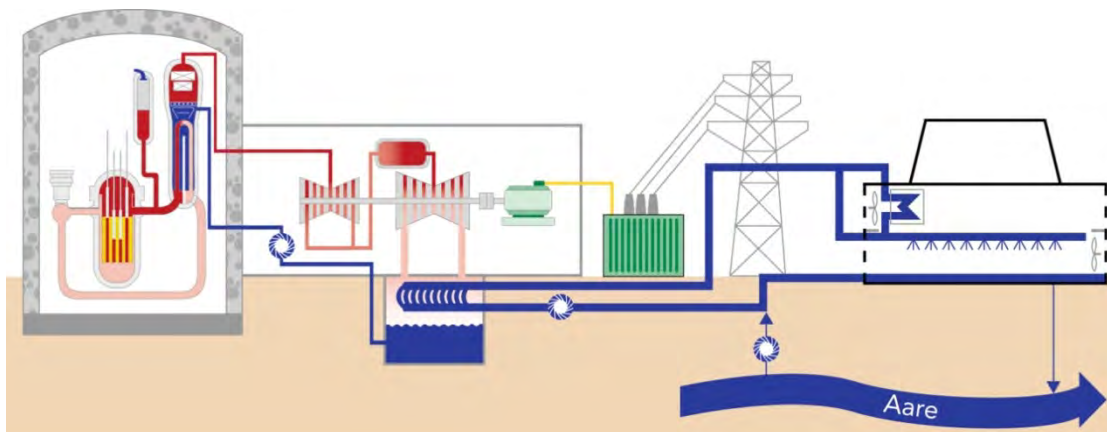
Le but de l'installation est d'exploiter l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité, ce qui comprend l'utilisation d'éléments nucléaires ainsi que le conditionnement et l'entreposage des propres déchets nucléaires ou des déchets d'autres installations nucléaires suisses. En option, l'on envisage aussi la mise à disposition de chaleur industrielle ou de chauffage urbain.

2.2 Grandes lignes du projet

2.2.1 Installation de production d'électricité

La nouvelle installation est dotée d'un réacteur à eau légère (REL), c.-à-d. qu'il s'agit d'une installation à eau sous pression ou à eau bouillante (cf. Fig. 2.2-1 et Fig. 2.2-2), et que le réacteur est refroidi et modéré par eau (H_2O ; eau légère). La nouvelle installation correspond à l'état actuel de la science et de la technique comme l'exige la Loi sur l'énergie nucléaire LENu¹ ainsi qu'aux mesures de protection obéissant aux principes reconnus aux plans national et international.

Fig. 2.2-1 : Schéma d'une centrale nucléaire dotée d'un réacteur à eau sous pression

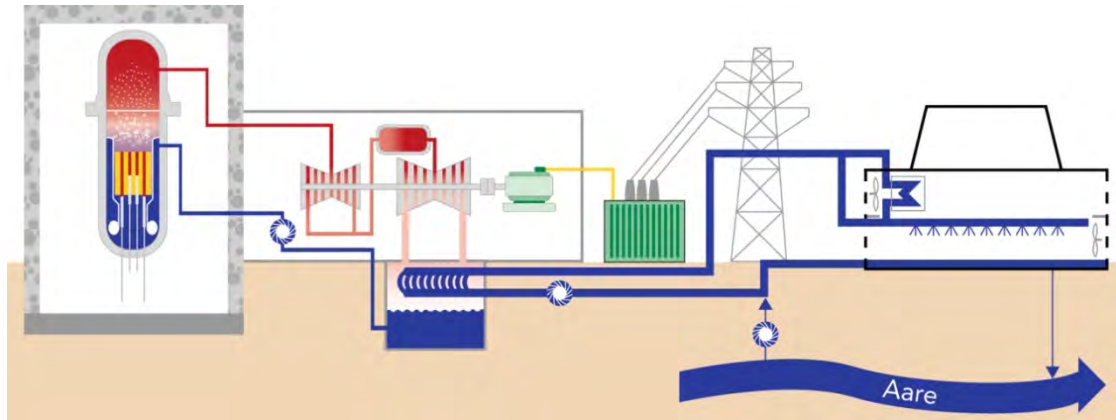


Le type de réacteur exact va être choisi avec les autres caractéristiques de l'installation au cours des travaux préparatoires de la procédure d'octroi du permis de construire. L'on se concentre sur des types et/ou systèmes de réacteurs déjà exploités ou en phase de réalisation au plan international ou dont la procédure d'approbation par les autorités concernées est déjà bien avancée. L'on renonce sciemment à la mise en place de prototypes.

Les types de réacteurs décrits dans le présent document sont des exemples de variantes correspondant à l'état actuel de la technique de réacteurs nucléaires modernes. Ils ne préjugent toutefois en rien du choix du type de réacteur ou de fournisseur de l'installation. Le choix aura lieu dans le cadre des travaux préparatoires de la demande de permis de construire selon les exigences légales en vigueur quant à l'acquisition d'installations nucléaires.

¹ Art. 4, al. 3, let. a LENu [1]

Fig. 2.2-2 : Schéma d'une centrale nucléaire dotée d'un réacteur à eau bouillante



La classe de puissance est déterminée par la puissance injectée dans le réseau électrique (puissance nette). Celle-ci est de 1450 MW, avec une marge de tolérance de plus ou moins 20 pour cent.

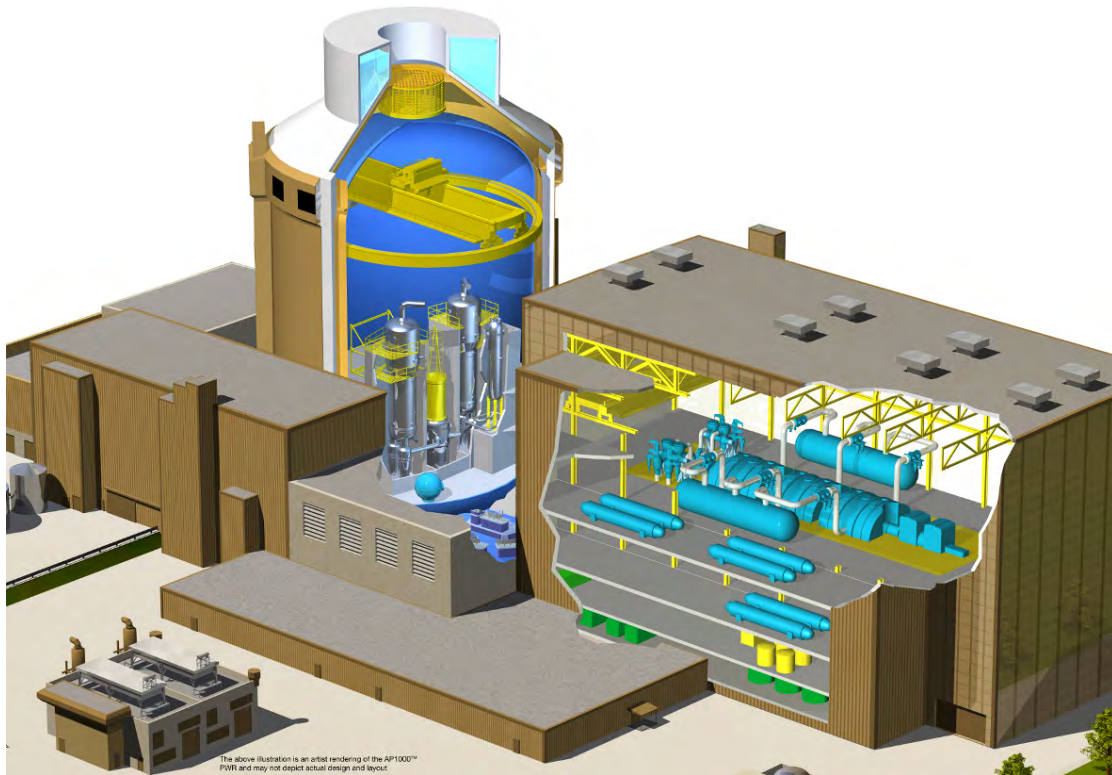
Concernant le système de refroidissement du réacteur, lequel met à disposition l'eau de refroidissement du condenseur, l'on a opté pour un système dit de refroidissement hybride. Ce mode de refroidissement est caractérisé par la construction d'une ou de deux tours de refroidissement (réfrigérants atmosphériques) d'environ 60 mètres de hauteur fonctionnant avec du courant d'air forcé, produit mécaniquement au moyen de ventilateurs, selon le principe de refroidissement combiné sec et humide. Le courant d'air humide provenant de la partie humide de la tour de refroidissement est mélangé à un deuxième courant d'air provenant de la partie sèche de la tour de refroidissement et ainsi réchauffée jusqu'au point de rosée. De cette façon, l'on évite largement des trainées de vapeur visibles. Ce système de refroidissement dit hybride est décrit plus en détail au chapitre 2.4.2.1.

L'installation englobe des ouvrages et des équipements destinés à la manutention et à l'entreposage de déchets radioactifs et d'éléments de combustible usés.

Dans le cadre de l'étude, l'on a examiné diverses installations équipées de systèmes de réacteurs des générations III et III+ tels que

- Réacteur européen à eau sous pression (EPR) de AREVA
- Réacteur économique simplifié à eau bouillante (ESBWR) de General Electric-Hitachi (cf. Fig. 2.2-4)
- Réacteur à eau bouillante avancé (ABWR) de General Electric-Hitachi ou Westinghouse-Toshiba
- Réacteur avancé et passif (AP 1000) de Westinghouse-Toshiba (cf. Fig. 2.2-3)
- Réacteur à eau bouillante (SWR 1000) d'AREVA.

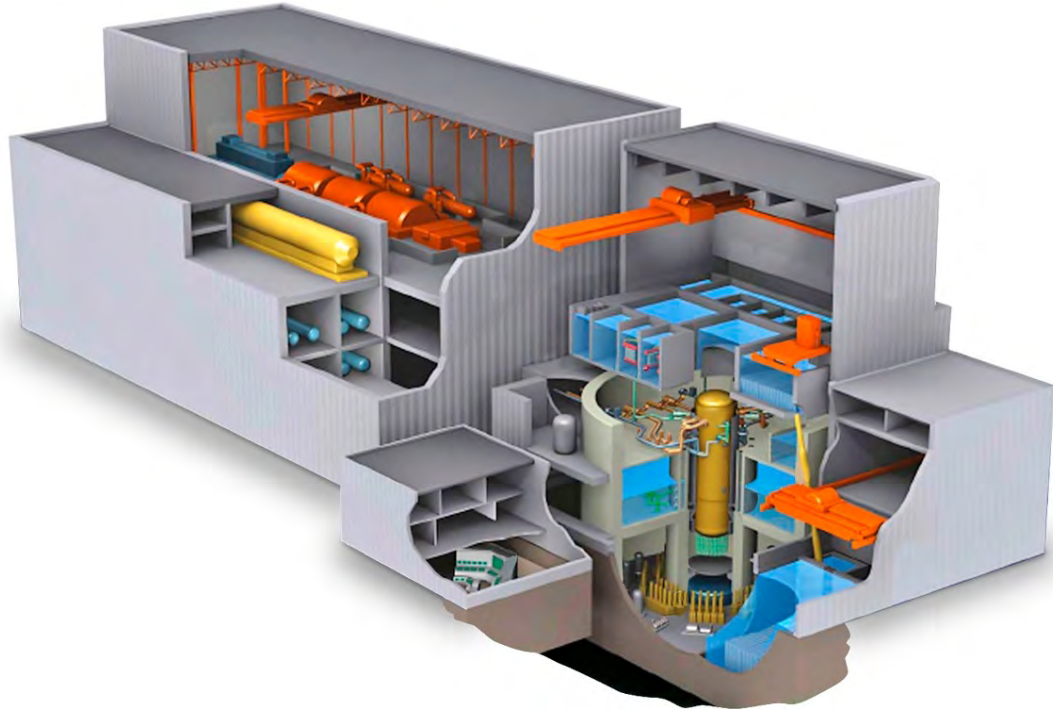
Fig. 2.2-3 : Exemple d'une installation moderne dotée d'un réacteur à eau sous pression : AP1000 de Westinghouse-Toshiba



Source : Westinghouse

D'autres systèmes REL sont possibles. Dans le cadre de la conception actuelle de l'installation, et de la description qui suit des installations, le REP sert d'installation de référence, ce qui est valable aussi pour les études d'adéquation (EA) du site, ce type de réacteur étant représentatif de la conception moderne d'une installation REL. Par ailleurs, les conceptions d'installations REL ont beaucoup de similitudes, malgré le fait que la disposition exacte de nombreux composants de l'installation soit différente pour chaque type d'installation. Cette démarche n'est aucunement préjudiciable au choix ultérieur du système de réacteur et des fournisseurs de l'installation.

Fig. 2.2-4 : Exemple d'une installation moderne dotée d'un réacteur à eau bouillante : ESBWR de General Electric-Hitachi



Source : General Electric Company

2.2.2 Installations de conditionnement et d'entreposage

La Loi fédérale sur l'énergie nucléaire (LENu ; RS 732.1) stipule l'obligation d'évacuation des déchets radioactifs produits par une installation nucléaire¹. Cette obligation est satisfaite par le fait que les déchets produits par l'EKKM, comme représenté d'ailleurs dans le rapport « Justificatif de l'évacuation des déchets radioactifs produits par l'installation » [71], sont évacués intégralement et systématiquement via les étapes prévues légalement², à savoir conditionnement, entreposage et stockage dans un dépôt en couches géologiques profondes.

Pour cela, l'EKKM sera dotée d'équipements de conditionnement, de stockages provisoires et, plus tard, de dépôts dits en profondeur. Alors que ces derniers font l'objet d'une procédure de plan sectoriel en cours [72], les équipements nécessaires au conditionnement ainsi que les stockages provisoires font l'objet de la demande d'autorisation générale pour l'EKKM.

¹ Cf. art. 31, al. 1 LENu [1]

² Art. 3, let. b LENu [1]

2.2.2.1 Installations de conditionnement

Les installations de conditionnement servent à préparer les déchets radioactifs en vue de leur entreposage et ainsi aussi de leur stockage dans des dépôts en couches géologiques profondes. Elles servent surtout au broyage, à la décontamination, au compactage, à l'incinération, à l'enrobage dans des matrices, et à l'emballage des déchets radioactifs¹.

Les installations de conditionnement se trouvent sur le site même de la centrale nucléaire ou, dans des cas particuliers, aussi sur le site d'autres installations nucléaires, compte tenu du fait que la convention y afférant conclue avec le propriétaire de l'installation de conditionnement doit stipuler que les exigences fixées quant à la construction et à l'exploitation d'un tel équipement sont remplies. Les installations de conditionnement sur le site de l'EKKM seront construites et exploitées de la même manière que les autres installations de l'EKKM et conçues conjointement.

2.2.2.2 Stockages provisoires

Pour les éléments combustibles usés et les déchets radioactifs de toutes catégories, il est nécessaire de disposer de stockages provisoires. Concernant les déchets radioactifs, il s'agit principalement de déchets de toutes les catégories conformément à l'Ordonnance fédérale sur l'énergie nucléaire (OENu ; RS 732.11)², c.-à-d. de déchets de haute, moyenne et faible activité ainsi que de déchets alphatoxiques.

Les déchets de haute activité (HAA) sont entreposés avec les éléments combustibles usés. Ces derniers font partie de la catégorie des déchets radioactifs de haute activité, dès qu'il est constaté qu'ils ne peuvent pas être réutilisés. Avant, ils étaient classés comme éléments nucléaires. Pour l'entreposage, cette différenciation ne joue aucun rôle. C'est pourquoi nous ne parlerons, par la suite, que de l'entreposage d'éléments combustibles usés. En dehors de ces derniers, les déchets radioactifs de haute activité³ comprennent les solutions vitrifiées de produits de fission issues du retraitement d'éléments combustibles usés⁴, si ce dernier a lieu⁵. Lesdites solutions de produits de fission sont transportées dans des conteneurs de transport et d'entreposage hermétiques et acheminés dans un stockage provisoire équipé en conséquence. Les éléments combustibles usés peuvent être soit acheminés également au moyen de fûts de transport et d'entreposage hermétiques dans un tel stockage provisoire soit acheminés au moyen de bassins de stockage remplis d'eau dans des bâtiments appropriés (stockage à sec et/ou humide).

¹ Cf. art 3, let. g LENu [1]

² Art. 51 OENu [2]

³ Art. 51, let. a, ch. 2 OENu [2]

⁴ Retraitement : démontage mécanique des éléments combustibles usés, dissolution chimique de l'oxyde combustible et séparation en uranium, plutonium et produits de fission (cf. art. 3, let. m LENu). Des installations de retraitement se trouvent à l'étranger. En principe, les déchets radioactifs issus d'éléments combustibles usés produits en Suisse, doivent être évacués en Suisse (cf. art. 30, al. 2 LENu) et donc repris et acheminés vers les autres étapes d'évacuation.

⁵ Les assemblages combustibles usés ne peuvent pas être exportés en vue de leur retraitement pendant une période de dix ans à compter du 1^{er} juillet 2006 ; l'Assemblée fédérale peut, par arrêté fédéral simple, prolonger ce délai de dix ans au plus (cf. art. 106, al. 4 LENu).

Les déchets alphatoxiques (ATA) sont issus du retraitement⁴. Ils peuvent aussi provenir en petite quantité de l'exploitation d'une installation nucléaire. Leur stockage a lieu en même temps que celui des déchets de faible à moyenne activité, mais dans une zone de stockage spécifique prévue à cet effet.

Les déchets de faible à moyenne activité (SMA) résultent de l'exploitation et de la désaffectation des installations nucléaires. Ils peuvent également résulter du retraitement⁴ d'éléments combustibles usés, si ce dernier a lieu,⁵. Ils sont alors placés dans des stockages provisoires équipés en conséquence, de préférence là où il est possible de manier conjointement un grand nombre de conteneurs.

Jusqu'à leur évacuation, les déchets radioactifs sont entreposés dans des dépôts en couches géologiques profondes. Les stockages provisoires prévus pour les déchets produits par l'EKKM seront conçus, réalisés et exploités selon les principes en vigueur pour les installations nucléaires (cf. chap. 2.5 et 4.1.4.1). En outre, leur dimensionnement et leur exploitation sont conçus conformément aux exigences légales en vigueur¹, c.-à-d. de façon à ne pas porter atteinte à l'aptitude au stockage final des conteneurs de déchets et à offrir une capacité suffisante pour couvrir les besoins prévisibles.

Les installations de conditionnement se trouvent sur le site même de la centrale nucléaire ou, dans des cas particuliers, aussi sur le site d'autres installations nucléaires, compte tenu du fait que la convention y afférant conclue avec le propriétaire de l'installation de conditionnement doit stipuler que les exigences fixées quant à la construction et à l'exploitation d'un tel équipement sont remplies.

La capacité d'entreposage est calculée de sorte que les stockages provisoires aménagés sur le site soient, en tout temps, capables d'accueillir tous les déchets produits par l'EKKM, mais aussi éventuellement ceux issus d'autres installations nucléaires, c.-à-d. ceux non transportables directement dans un dépôt en couches géologiques profondes ou dans un autre stockage provisoire, et ce, pour ce qui est des déchets de faible à moyenne activité produits durant l'exploitation et le démantèlement de l'EKKM, y compris les déchets de retraitement éventuels et les éléments combustibles usés issus des dernières années d'exploitation de la centrale nucléaire de Mühleberg actuelle. L'on tient compte ici d'une modification de volume par combustion et/ou fusion dans d'autres installations nucléaires telles que ZWILAG.

L'extension de la capacité d'entreposage aura lieu par étapes en tenant compte de la disponibilité des dépôts en couches géologiques profondes ainsi, le cas échéant, que de la capacité d'entreposage des déchets radioactifs produits par l'EKKM dans d'autres installations nucléaires. Dans le cas, à ne pas sous-estimer a priori, de la non-disponibilité d'un dépôt en couches géologiques profondes durant l'exploitation et la désaffectation de l'EKKM, il faudra au maximum créer la possibilité d'entreposer l'ensemble des déchets précités.

¹ Art. 12, al. 2 OENu

La capacité d'entreposage maximale pour les déchets de faible à moyenne activité produits par l'EKKM doit être quantifiée comme suit¹ :

HAA : 180 conteneurs de transport et de stockage contenant des éléments combustibles usés et des déchets radioactifs², dont une dizaine contenant des éléments combustibles usés de l'actuelle KKM ou, alternativement, un volume d'éléments combustibles de 1'500 m³ (y compris le volume des éléments combustibles usés de l'actuelle KKM) et, le cas échéant, un volume supplémentaire de 600 m³ de solutions vitrifiées de produits de fission issues du retraitement d'éléments combustibles usés.

ATA : 1'000 m³.

SMA : 20'000 m³, dont environ 70% de déchets issus de la désaffectation de l'installation.

Ces quantités ne sont que des valeurs de référence, du fait que la conception détaillée et/ou la puissance de la centrale nucléaire de remplacement projetée seront fixées ultérieurement.

2.3 Description de l'installation

Par principe, lors de la planification de la conception et de la disposition de l'installation, l'on s'appuie sur une disposition des bâtiments principaux sur le site selon les indications fournies par les constructeurs. Cela vaut particulièrement pour l'installation du réacteur, les bâtiments abritant les équipements essentiels pour la sécurité, les bâtiments de traitement et de conditionnement des éléments et des déchets radioactifs ainsi que le bâtiment des machines. En plus, l'on tient compte de conditions marginales multiples, des critères de protection et des exigences en matière de protection des personnes, de l'environnement, d'objets spéciaux ou du paysage. Enfin, l'on prend en compte également les charges et les critères relatifs à la sécurité et à la protection de l'installation ainsi qu'aux déroulements et processus de travail sûrs et simples liés à la construction, à l'exploitation et à la maintenance.

2.3.1 Vue d'ensemble du site d'implantation

2.3.1.1 Situation

La future EKKM devrait être érigée sur la rive gauche de l'Aar, à quelque 12 km à l'ouest de Berne et à environ 1 km en aval de la centrale hydroélectrique de Mühleberg (WKW) construite en 1920 sur le lac Wohlén. Le terrain agricole porte le nom de *Niederruntigen* et se situe en amont de la rivière par rapport à l'actuelle installation KKM sur le territoire communal de Mühleberg, canton de Berne. Les terrains à bâtir nécessaires à la nouvelle installation nucléaire appartiennent aux FMB.

¹ Les indications de volume des déchets radioactifs se réfèrent au volume des déchets selon Archimède, lequel, en tant que propriété importante des déchets conditionnés, représente un paramètre comparable de production de déchets avec d'autres installations nucléaires.

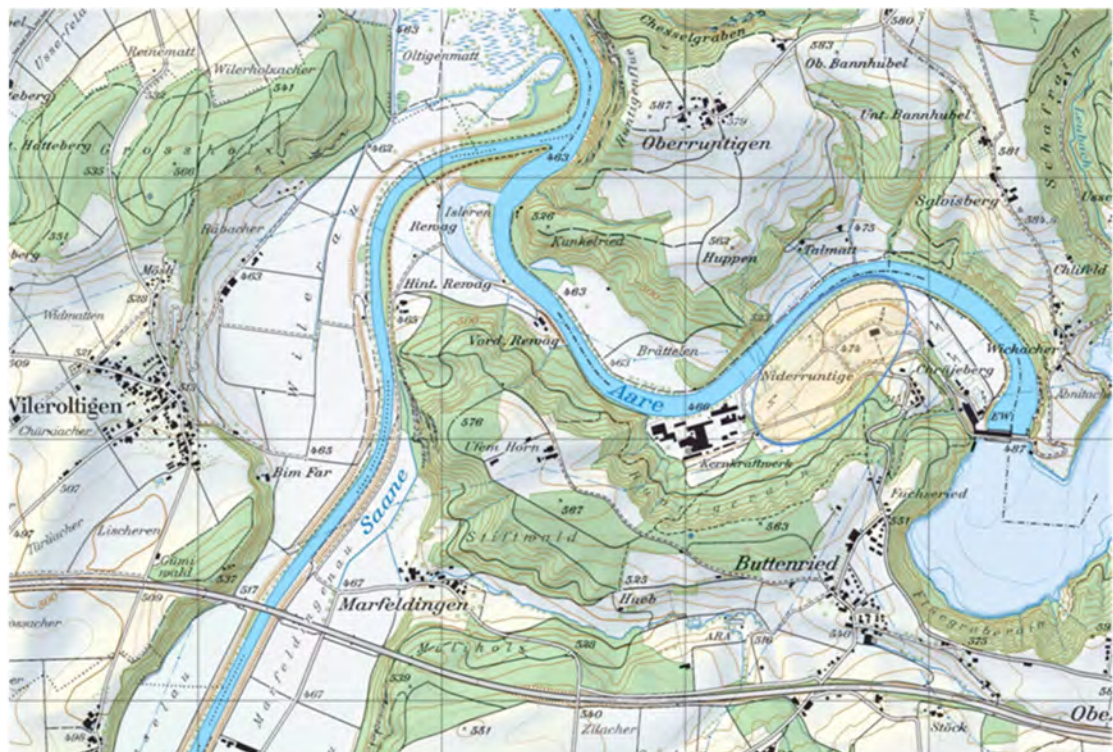
² Les indications concernant la production d'éléments combustibles usés et/ou de déchets radioactifs de haute activité, s'appuient sur des conceptions conservatrices du cœur du réacteur avec un burnup peu élevé ainsi que sur la géométrie des éléments combustibles de certains types de réacteurs en comparaison avec l'utilisation volumétrique plus réduite des conteneurs de transport et de stockage actuelle.

Le terrain se trouve en partie en zone industrielle et en partie en zone agricole, mais ne jouxte pas directement d'autres zones résidentielles ou à bâtir. La forêt du « Runtigenrain » est limitrophe au sud. Pour d'autres détails concernant le site ou le choix de ce site, se reporter au rapport relatif à la concordance avec l'aménagement du territoire [41].

L'autoroute A1 Berne-Lausanne passe à env. 1 km au sud du site d'implantation prévu. La route cantonale T1 Berne-Lausanne passe également au sud du site, mais à 1.5 km. La ligne de chemin de fer la plus proche (Berne-Neuchâtel) passe à env. 4 km au sud du site, mais celui-ci n'y est pas relié.

Fig. 2.3-1 montre la vue d'ensemble et environs à l'échelle 1 : 25 000.

Fig. 2.3-1 : Vue d'ensemble du site et des environs



L'objet IFP n° 1316 « Lac de retenue Niederried » et la zone alluviale d'importance nationale 53 « Niederried-Oltigenmatt » sont situés à env. 1 km à l'ouest du site et en aval de Runtigenau sur la rive droite. Le périmètre prévu pour le projet EKKM se trouve en dehors du secteur A_u de protection des eaux (eaux souterraines exploitables et zones attenantes considérées comme particulièrement menacées).

Le site d'implantation de Niederruntigen apparaît approprié au vu des critères suivants importants pour une centrale nucléaire :

- Intégration au réseau électrique : aujourd'hui déjà, le site de Mühleberg est l'un des nœuds de connexion essentiels du réseau de haute tension suisse. Le réseau de transport autour de Mühleberg va être encore complété par les projets du plan sectoriel des lignes de transport d'électricité (PSE) [18]). Déjà maintenant, ces mesures sont extrêmement urgentes pour la stabilité du réseau de la région Berne-Mittelland. Les conditions préalables sont donc réunies pour pouvoir aussi soutirer la puissance électrique d'une nouvelle installation.
- Proximité des zones de prélèvement : par sa situation centrale dans la zone d'approvisionnement traditionnelle des FMB, et la proximité des grandes agglomérations de Suisse occidentale, le site de Mühleberg contribue à une sécurité d'approvisionnement accrue.
- Disponibilité d'un réfrigérant pour l'exploitation normale et en cas d'accident.
- Faible densité de population : grâce à la faible densité de population dans les environs par rapport à la moyenne suisse, peu de gens seront gênés durant les phases de construction et d'exploitation.
- Paysage : grâce à l'emplacement spécial du site retenu dans la profondeur de la vallée de l'Aar et aux ouvrages qui ne dépassent pas le sommet de la colline, exception faite de l'étroite cheminée d'évacuation, l'installation projetée ne sera visible qu'à partir de peu de localités se trouvant en majeure partie à proximité immédiate. La gêne optique occasionnée par l'EKKM est ainsi faible et correspond aux exigences de la législation sur la protection des paysages.
- Acceptation grâce à l'installation existante : l'exploitation sûre et réussie de l'actuelle KKM par les FMB a permis d'établir des relations de confiance et à une acceptation élevée de l'énergie nucléaire dans la commune-siège et dans les environs.
- Encombrement : sur le site de Mühleberg, les FMB possèdent de grandes réserves de terrains. Dans le cadre de l'étude de faisabilité, l'on a constaté que l'on avait suffisamment de place pour y installer tous les types de réacteurs envisagés actuellement. En outre, il y a aussi suffisamment de surfaces disponibles pour les installations de chantier et de stockage durant la phase de construction.
- Desserte : le site de Mühleberg se trouve à proximité d'une ligne de chemin de fer, d'une autoroute et d'une route cantonale, laquelle peut être aménagée pour les camions de la catégorie la plus lourde, ce qui joue un rôle important durant la phase de construction.
- Sol de fondation : la stabilité de la roche à peu de profondeur garantit l'ancrage sûr des fondations des ouvrages importants pour la sécurité de l'ensemble de l'installation.

Fig. 2.3-2 et Fig. 2.3-3 représentent un photomontage de l'EKKM équipée d'un réacteur de type EPR en qualité d'exemple d'installation nucléaire correspondant à l'état actuel de la science et de la technique d'une installation nucléaire sur le site de Niederruntigen.

Fig. 2.3-2 : Photomontage de l'EKKM (disposition possible des ouvrages), prise de vue : Salzweid.
L'actuelle KKM est à l'arrière-plan.



Fig. 2.3-3 : Photomontage de l'EKKM équipée d'un réacteur de type EPR comme exemple (disposition possible des ouvrages), prise de vue : Talmatt.



2.3.1.2 Topographie

Sur le site de la centrale nucléaire, la vallée de l'Aar s'étend du nord-est en direction du sud-ouest. Le terrain va de la rive de l'Aar jusqu'à la forêt limitrophe au sud, soit à une altitude entre env. 465 m et 490 m au-dessus de la mer avec une terrasse naturelle en tant que niveau intermédiaire autour du site de la centrale de conduite à quelque 470 m – 480 m d'altitude. Plus loin au sud, le terrain se prolonge en pente jusqu'au Runtigenrain à une altitude d'env. 560 m.

2.3.2 Conception de l'installation

L'installation nécessite une superficie de terrain de 15 à 20 ha. Elle sera érigée sur une terrasse en hauteur par rapport à la rive de l'Aar, et la majeure partie des bâtiments et des composants de l'installation seront entourés d'une clôture commune. Dans le secteur de la tour de refroidissement, cette terrasse peut être abaissée et adaptée au terrain naturel. Elle est en pente légère vers l'ouest, ce qui facilite l'écoulement des eaux vers le bassin de retenue. Ces mesures servent de protection contre les crues et les inondations, l'évacuation des eaux en cas de fortes précipitations et à la récupération d'eau d'extinction éventuelle.

L'orientation de l'installation, à savoir de l'axe principal par le bâtiment du réacteur (RG), le bâtiment des machines (MH) et la tour de refroidissement (KT), est parallèle à l'Aar du nord-est (NE) vers le sud-ouest (SO). Cette orientation tient compte des exigences des fondations du RG dans la roche, de l'adaptation sur le terrain avec peu d'excavation et de remblai ainsi que de la position et de la portée de la plus grande grue de montage. Lors de l'optimisation du projet, et selon le choix du type de réacteur, l'orientation RG-MH pourrait être inversée, et la tour de refroidissement orientée à l'est.

Dans le cadre des mesures devant être prises dans la région de Mühleberg en vue d'accroître la stabilité du réseau dans l'Espace Mittelland, le poste de commutation Ouest (sous-station SS Ouest) sera déplacée à proximité de la centrale hydroélectrique de Mühleberg et intégrée dans la SS Est, entre autres avec le nœud du réseau 380 kV. Ces travaux sont indépendants du projet EKKM et devraient être exécutés jusqu'en 2015. Plus tard, le poste de commandement principal (ZLS) des FMB sera déplacé à un endroit encore à définir (pas obligatoirement à proximité de l'installation).

L'électricité produite sera acheminée des transformateurs de l'installation nucléaire à un niveau de tension de 380 kV à la SS Est par voie souterraine. L'énergie auxiliaire provenant du réseau sera acheminée aussi par des lignes souterraines à 132 kV à partir de la SS Est. Pour d'autres détails concernant le raccordement au réseau, se reporter au chapitre 3.7.

2.3.3 Les bâtiments essentiels et leurs dimensions

2.3.3.1 Installation du réacteur

Ladite installation du réacteur (îlot nucléaire) englobe le bâtiment du réacteur (RG) ainsi que, selon le système de réacteur, les bâtiments de sécurité, de diesels, d'alimentation de secours, de conditionnement, d'entreposage et de contrôle. Ces bâtiments abritent le système du réacteur, les systèmes auxiliaires et de sécurité pour le réacteur, l'enceinte de confinement, les approvisionnements en énergie importants pour la sécurité, les systèmes de refroidissement d'urgence et leurs équipements, un atelier pour des travaux avec du matériel radioactif et le domaine de remplacement et de rechargement du combustible, y compris les unités de stockage et les équipements de conditionnement des déchets radioactifs. Fig. 2.3-4 est une représentation schématique de bâtiments et de systèmes importants pour une centrale nucléaire à l'exemple d'un réacteur à eau sous pression.

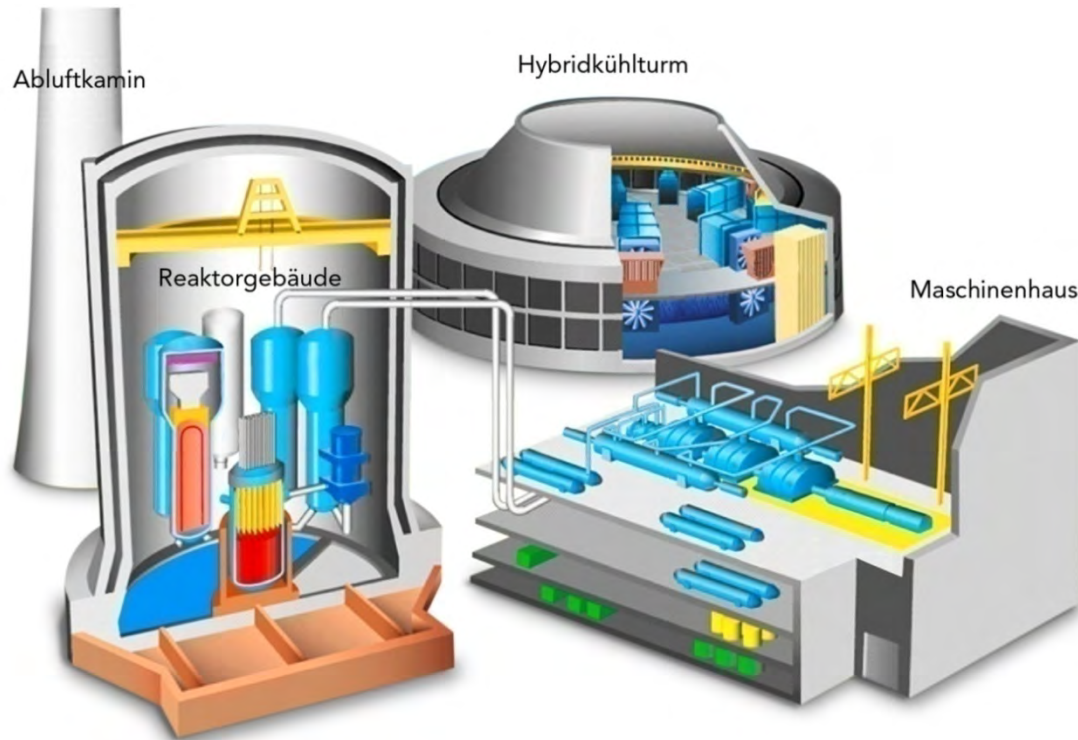
Le *bâtiment du réacteur*, en cas de réacteur à eau sous pression à l'image de l'EPR, abrite la cuve du réacteur avec les éléments de combustible et les barres de commande ainsi que leurs mécanismes d'entraînement, les pressuriseurs, les pompes de refroidissement du réacteur et les générateurs de vapeur, qui transforment en vapeur l'eau du circuit secondaire à partir de l'énergie calorifique de l'eau du circuit primaire. Cette vapeur sert à entraîner les turbines à vapeur se trouvant dans le *bâtiment des machines*. Avec un réacteur à eau légère, la vapeur est produite dans le réacteur et envoyée directement aux turbines à vapeur, c'est-à-dire qu'il n'y a alors aucun pressuriseur ni générateur de vapeur.

L'exploitation de la centrale nucléaire engendre des substances radioactives liquides et solides. Il s'agit, en particulier, de résines échangeuses d'ions, de filtres provenant des circuits d'eau et des installations de ventilation qui retiennent des particules radioactives ainsi que des condensats d'évaporateur provenant du nettoyage des effluents. D'autres déchets d'exploitation tels que les pièces, composants et équipements de protection contaminés s'y ajoutent après les inspections, les travaux d'entretien et de maintenance. Tous ces déchets sont collectés séparément dans le *bâtiment de traitement* et/ou dans le *bâtiment de conditionnement des déchets radioactifs*, réduits et préparés en vue de leur traitement ultérieur, en partie ou intégralement jusqu'à leur conditionnement avant le stockage définitif.

Le *bâtiment de contrôle* abrite les organes de commande et de mesure électriques importants pour la sécurité ainsi que le poste de commandement principal.

La *cheminée d'évacuation* rejette à l'environnement les effluents gazeux provenant de la zone nucléaire et en partie de la zone conventionnelle de l'installation. Après une forte décroissance radioactive dans une ligne d'immobilisation, les produits de fission, c.-à-d. les gaz rares radioactifs de courte durée de vie tels que le xénon et le krypton sont évacués. L'air évacué par la cheminée est surveillé en permanence en ce qui concerne la radioactivité, afin que les valeurs limites soient respectées.

Fig. 2.3-4 : Représentation schématique de bâtiments et de systèmes importants d'une centrale nucléaire équipée d'un réacteur à eau sous pression (DWR) et d'un système de refroidissement hybride



2.3.3.2 Installations conventionnelles : bâtiment des machines, bâtiment électrique, bâtiment annexe

Le *bâtiment des machines* abrite les turbines à vapeur, l'alternateur, le condenseur principal, les systèmes de condensation et d'eau d'alimentation, pompes incluses, le séparateur d'eau, le réchauffeur intermédiaire, les préchauffeurs pour une efficacité accrue, le système d'épuration du condensat, le système de traitement et de rejet des effluents gazeux ainsi que les systèmes de régulation et de refroidissement pour le groupe turbo-alternateur. A l'extérieur, ou dans un autre bâtiment, l'on trouve les transformateurs machines, les interrupteurs principaux ou de l'alternateur ainsi que l'alimentation pour les propres besoins de l'installation.

D'autres bâtiments abritent la station de pompage pour l'eau primaire, le traitement de l'eau, les ateliers de maintenance, le magasin de pièces de rechange, le simulateur d'entraînement, les contrôles d'entrée et de sortie pour les personnes et le matériel, le matériel du Service du feu, des bureaux, des vestiaires, la cantine et l'accueil.

À l'extérieur de l'installation proprement dite (terrasse clôturée), l'on trouve le captage et réintroduction de l'eau de refroidissement ainsi que les pompes correspondantes sur la rive de l'Aar, un réservoir d'eau installé sur la colline voisine, une nouvelle voie d'accès, les places de stationnement, le centre de visiteurs et un hélicoptère.

2.3.3.3 Stockage de déchets radioactifs et d'éléments combustibles

Il est prévu de construire un bâtiment pour l'entreposage de déchets d'exploitation radioactifs de faible et/ou moyenne activité d'une capacité correspondant à la durée de vie globale de l'installation. Ce stockage provisoire prévu sur le site de l'EKKM est considéré comme une installation nucléaire au sens de la Loi fédérale sur l'énergie nucléaire LENu [1] et fait donc partie intégrante de la demande d'autorisation générale. Les déchets issus de la désaffectation ne sont produits qu'à la fin de la période d'exploitation. Par conséquent, en fonction des circonstances, il serait nécessaire d'augmenter la capacité d'entreposage des déchets radioactifs de faible et/ou moyenne activité ou de construire éventuellement un bâtiment supplémentaire (cf. chap. 2.2.2).

Dans le bâtiment du réacteur et/ou dans le bâtiment du combustible attenant de la nouvelle installation, il est prévu d'aménager des stockages provisoires à sec pour les éléments de combustible non irradiés et des bassins pour l'entreposage simultané d'éléments de combustible irradiés issus de plusieurs cycles d'exploitation et du déchargement du cœur du réacteur. Dans le respect des exigences en matière de sécurité concernant la criticité, les éléments de combustible sont conservés dans ces bassins et ces stockages provisoires jusqu'à leur évacuation et/ou leur (re)chargement dans le cœur du réacteur. Il est également prévu que les bassins puissent accueillir d'autres composants radioactifs (p. ex. barres de commande, instrumentation du cœur du réacteur).

Par ailleurs, l'on prévoit de construire un bâtiment pour le stockage de déchets radioactifs de haute activité (HAA), pour tous les éléments de combustible irradiés produits pendant toute la durée de vie de l'installation ainsi que pour ceux produits par l'actuelle centrale KKM durant les dix dernières années de son exploitation (cf. chap. 2.2.2). Ce bâtiment de stockage, réalisé sur le site de l'EKKM, vaut également comme installation nucléaire au sens de la Loi fédérale sur l'énergie nucléaire [1] et fait donc partie intégrante de la demande d'autorisation générale.

2.3.3.4 Tour de refroidissement

Il est prévu de construire une ou deux tours de refroidissement hybrides. Ces deux variantes sont présentées au chap. 2.4.2 (cf. chap. 2.3.4 pour la disposition possible de ces ouvrages).

2.3.3.5 Dimensions sommaires des bâtiments essentiels

Le Tableau 2.3-1 suivant montre les dimensions sommaires des bâtiments essentiels. Le développement de la conception de l'installation ainsi que l'optimisation des composants peuvent conduire à des ajustements mineurs.

Tableau 2.3-1 : Dimensions des bâtiments essentiels (en mètres)

Bâtiment	Longueur ou diamètre	Largeur	Hauteur (à partir du Bâtiment Zéro)
RG	50 - 60	40 - 60	35 - 70
MH	80 - 120	40 - 60	40 - 50
1 KT	140 - 180		50 - 60
2 KT	120 - 140		50 - 60
HAA	80 - 200	20 - 80	20 - 30
SMA ¹	70 - 80	55 - 80	20 - 30
Cheminée d'évacuation	env. 10		80 - 130

2.3.4 Disposition des ouvrages

Bien que la disposition exacte des composants précités de l'installation dépende du type d'installation, les conceptions des installations nucléaires dotées d'un réacteur à eau légère REL présentent de nombreuses similitudes. La disposition des ouvrages du type d'installation EPR servant de base au présent projet peut donc être considérée comme représentative, comme le montrent Fig. 2.3-5 ainsi que Fig. 2.3-6 pour une installation pourvue de deux tours de refroidissement.

Comme cela a déjà été mentionné, la disposition des bâtiments centraux du réacteur et du secteur des turbines correspond en majeure partie à la disposition standard du fournisseur, et à la disposition standard d'AREVA en ce qui concerne le réacteur à eau sous pression EPR. Pour d'autres bâtiments tels que bureaux, atelier, pompes, traitement de l'eau, etc., ce sont surtout les courtes distances (chemins, conduites) ainsi que des processus et des procédures sûrs et simples qui sont privilégiés.

Les dispositifs de captage et de réintroduction de l'eau de refroidissement se trouvent sur la rive de l'Aar. La position des stations de pompage pour l'eau de refroidissement du réacteur et l'eau de refroidissement auxiliaire sera optimisée, afin de réduire la longueur des conduites reliant l'Aar à la tour de refroidissement et cette dernière au condenseur principal.

Les bureaux, le simulateur d'entraînement ainsi que la cantine se situent près de l'entrée avec des sas pour le contrôle du personnel et du matériel. Les ateliers ainsi que les magasins de pièces de rechange se trouvent au nord du bâtiment du réacteur (RG) et du bâtiment des machines (MH), auxquels ils sont liés par des chemins courts.

Les stockages provisoires pour les déchets radioactifs et/ou les éléments combustibles sont situés au bord de l'installation. Après la désaffectation et la décontamination de l'installation, ils pourraient être séparés au moyen d'une clôture.

¹ sans déchets provenant du démantèlement

Fig. 2.3-5 : Exemple de plan de situation d'une installation nucléaire dotée d'un réacteur EPR et une tour de refroidissement hybride. Cette disposition correspond aux illustrations avec photomontage (Fig. 2.3-2, Fig. 2.3-3). Sous réserve de l'optimisation future du projet ainsi que du choix du système de réacteur et du fournisseur ; route non optimisée.

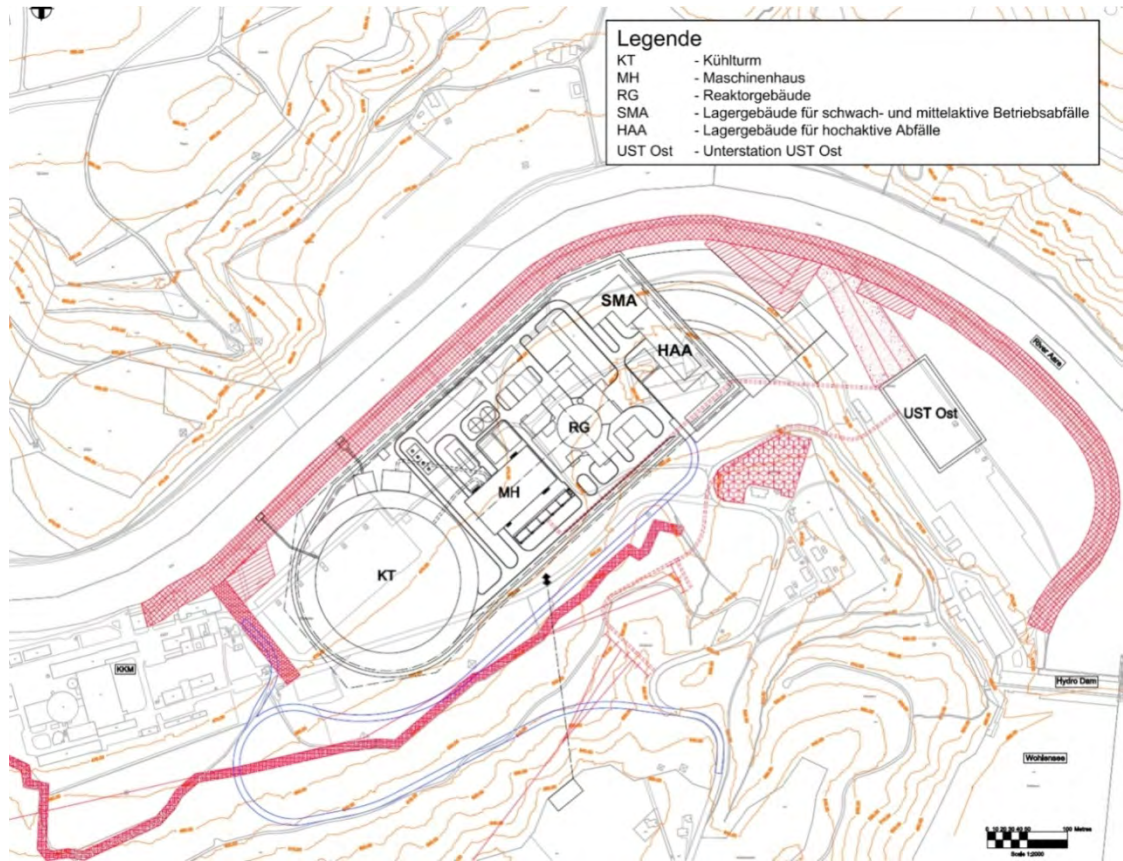
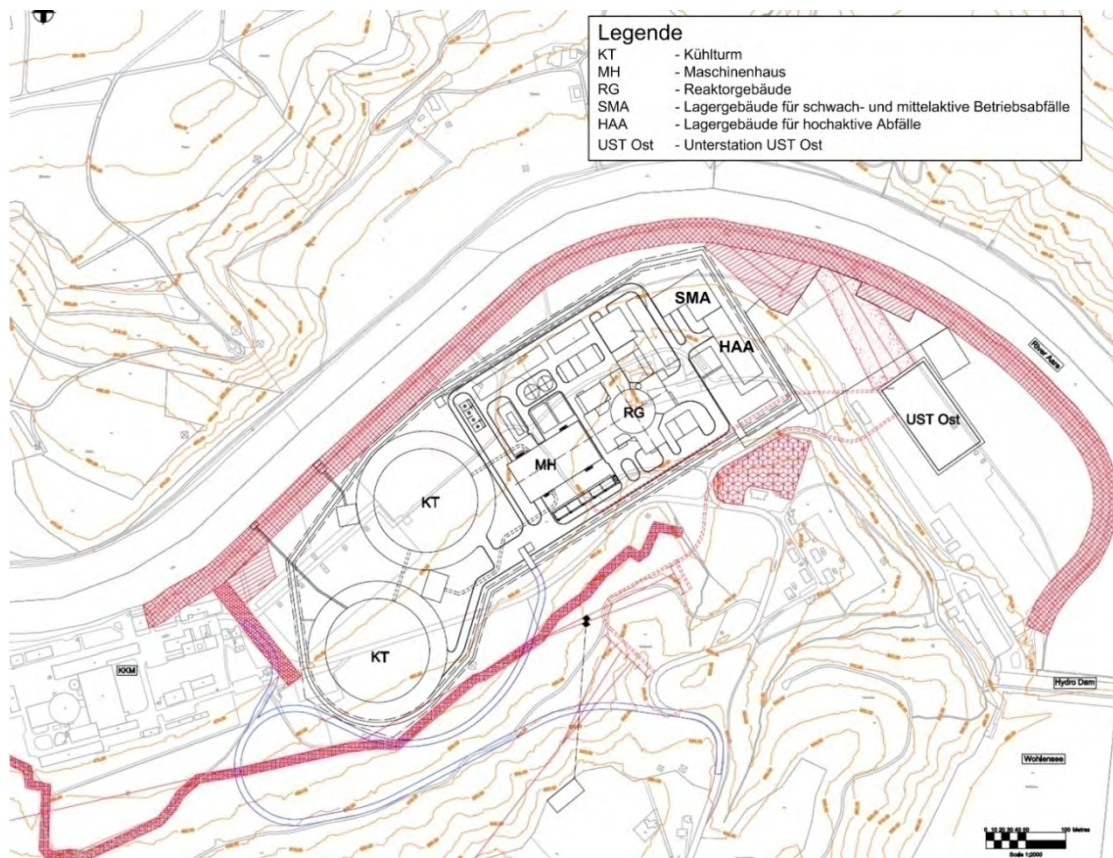


Fig. 2.3-6 : Exemple de plan de situation d'une installation nucléaire dotée d'un réacteur EPR et d'un refroidissement hybride avec deux tours de refroidissement hybride. Cette disposition correspond aux illustrations avec photomontage (Fig. 2.3-2, Fig. 2.3-3). Sous réserve de l'optimisation future du projet ainsi que du choix du système de réacteur et du fournisseur.



2.3.5 Desserte et logistique

Ce chapitre traite du déroulement sommaire des travaux selon l'état de la planification provisoire, des surfaces temporairement nécessaires ainsi que des possibilités d'équipement technique (desserte) de l'EKKM. Dans le cadre du développement du projet, l'on examine différentes installations avec des systèmes de réacteurs des générations III et III+, tels que les exemples du EPR de AREVA, du ESBWR et du ABWR de General Electric-Hitachi ainsi que du AP1000 de Westinghouse-Toshiba. D'autres systèmes de réacteurs à eau légère (REL) sont aussi à choix. Dans le cadre de la logistique des travaux actuelle, le type de réacteur EPR sert d'installation de référence. Cette procédure n'est aucunement préjudiciable au choix ultérieur du système de réacteur et du fournisseur de l'installation. Ce n'est que lorsqu'une technologie aura été choisie, que l'on pourra calculer plus exactement les valeurs indiquées dans le cadre de la prochaine phase de planification (autorisation de construire).

2.3.5.1 Programme des travaux de construction

La durée totale de la construction, soit du début des travaux à l'exploitation commerciale, devrait s'étendre sur 7 à 8 ans. Le déroulement des travaux est représenté ici de la 2^e à la 6^e année ; Tableau 2.3-2 ; le point zéro correspondant aux premiers travaux de bétonnage des fondations.

Tableau 2.3-2 : Échéancier du déroulement des travaux

	année -2	année -1	année +1	année +2	année +3	année +4	année +5	année +6
Début des travaux	•							
1. Béton			•					
Mesures préparatoires								
Travaux de terrassement								
Génie civil, constructions								
Installations, montage								
Contrôles, mise en service, essais, végétalisation								
Début de l'exploitation								•

Le déroulement total des principaux travaux (terrassement, génie civil, constructions), y compris les montages des installations et la mise en service, s'étend sur plus de 5 années. Les mesures de terrassement et de génie civil essentielles ont lieu durant la première année (p. ex. travaux d'excavation et de nivellement ainsi que la sécurisation et étanchéification des fouilles) ; ensuite ont lieu les travaux de construction proprement dits de la 1^{re} année à la 4^e année (construction des ouvrages, principalement en béton armé) et des installations (p. ex. montage des systèmes et composants électriques). Auparavant, l'on a besoin d'environ un an (2^e année) pour les mesures préparatoires (p. ex. construction des infrastructures et des places de chantier).

Aux moments forts, le chantier de l'EKKM occupera quelque 2000 à 3000 personnes.

2.3.5.2 Besoin temporaire de surfaces

Lors de la phase des travaux, l'on aura besoin de surfaces pour les installations temporaires. L'on distingue entre surfaces temporaires sur le site de la construction, la place logistique externe, le village de baraques de chantier pour loger le personnel et les surfaces pour une manutention optimale (gare temporaire) ; cf. Tableau 2.3-3 suivant.

Est considéré comme site de la construction l'aire située à proximité immédiate du chantier, à savoir les sites de Niederruntigen et Talmatt.

Durant toute la phase des travaux, le besoin temporaire de surfaces est évalué à environ 40 ha, dont un tiers pour le site de la construction et env. deux tiers pour les aires externes.

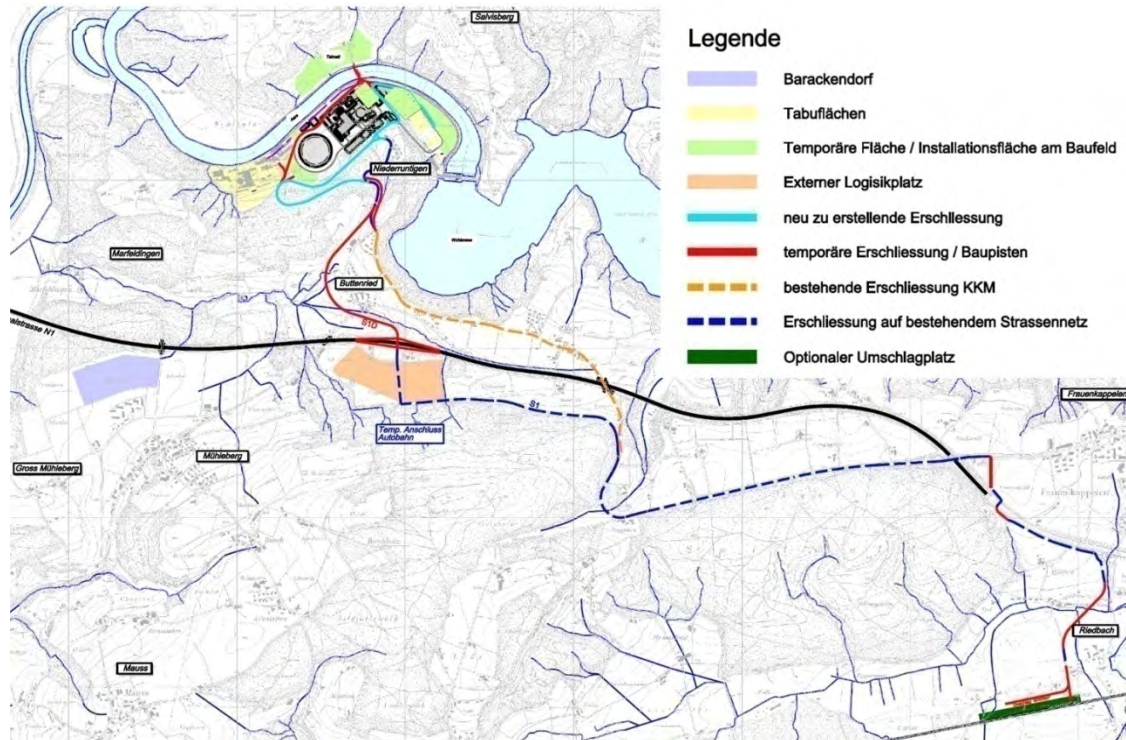
Tableau 2.3-3 : Besoin temporaire de surfaces pour la phase de construction de l'EKKM

Lieu	Surface (ha)	Nature possible de l'affectation
Surface temporaire sur le site de construction (Niederruntigen et Talmatt)	env. 13	Bureaux et places de stationnement Halls de montage pour le confinement et la construction des installations Ouvrages en béton Emplacement de manutention Décharge de terre végétale (partielle) Installation de traitement de l'eau Ateliers et magasins
Aire de logistique externe	env. 13	Entrepôt intermédiaire de marchandises Ateliers et équipements annexes Entrepôts Parking pour camion (contrôle d'accès) Surfaces de circulation et de logistique Surfaces de dépôt intermédiaire pour la terre d'excavation et la terre végétale
Village de baraques de chantier	env. 10	Logements Vestiaires Cantine Aire de loisirs Surfaces de circulation
Option Riedbach	env. 3	Emplacement de manutention et voies ferrées

Les surfaces possibles pour ces installations temporaires sont représentées à Fig. 2.3-7. Elles ne seront pas entièrement utilisées, mais représentent les différentes dispositions possibles. Le choix définitif des surfaces dépend de la desserte de l'installation nucléaire, du type d'installation et de sa conception, du déroulement des travaux et, enfin, de la procédure de réalisation des modules de construction et des grands composants non transportables.

Sur le site de Niederruntigen, ainsi que dans les environs immédiats, il y a suffisamment de surfaces disponibles pour couvrir les besoins de la construction de l'EKKM. Ces surfaces appartiennent déjà en partie à la société BKW FMB Energie S.A.

Fig. 2.3-7 : Desserte et surfaces éventuelles pour les installations temporaires durant la phase des travaux de construction de l'EKKM



2.3.5.3 Desserte

2.3.5.3.1 Généralités

Ce qui est déterminant pour la desserte de l'installation, ce sont les marchandises qui devront être transportées durant la phase de construction. En dehors du transport du personnel, il y aura d'énormes quantités de matériaux, à commencer par l'évacuation du matériau d'excavation. Ce qui est également très important est la fourniture de matériaux pour le bétonnage (adjuvants), le matériau d'excavation et les adjuvants au béton étant définis comme marchandises en vrac. En comparaison, la quantité de marchandises (p. ex. acier de construction et composants divers) est faible.

L'on ne s'étendra pas en détail ici sur des solutions de desserte alternatives durant la phase de construction telles que des bandes transporteuses ou des installations de transport à câbles. Elles seront étudiées dans le cadre de la prochaine phase de planification en vue de l'octroi du permis de construire.

Une desserte par la route jusqu'au site de la construction est inévitable. En dehors des possibilités d'accès en voiture de tourisme et en camion nécessaires jusqu'au chantier, p. ex. pour le personnel du chantier, les services de secours ou les sapeurs-pompiers, il y a des matériaux (= marchandises) devant être absolument livrés par la route. Ce sont en partie de grands composants individuels, de sorte que la voie d'accès au site de la construction doit être aussi praticable pour les transports exceptionnels.

L'on a étudié la capacité des routes de transport en Suisse en matière de poids et de dimensions pour acheminer les grands composants. Il apparaît ainsi probable que des travaux de construction seront inéluctables pour assurer les voies d'accès. Ces mesures, ainsi que le montage définitif éventuel de quelques grands composants sur le chantier, seront définies dans le cadre de la demande de permis de construire. Par principe, il est possible de transporter les grands composants jusqu'au futur site de la centrale nucléaire.

Durant l'exploitation, les quantités à transporter seront modestes, et les transports effectués aussi par la route.

2.3.5.3.2 Objectif de la desserte routière

Afin de trouver une variante de desserte à la fois efficace et respectueuse de l'environnement, la planification s'est appuyée sur les principes suivants :

- Synergies entre la phase de construction et la phase d'exploitation : pour réduire au strict minimum les impacts sur le paysage dus aux travaux de construction, la desserte du site est conçue de telle sorte pour la phase de construction, qu'elle pourra être aussi utilisée durant la phase d'exploitation.
- Desserte par la route : étant donné que certains composants nécessaires à la centrale nucléaire ne peuvent pas être transportés par le rail en raison de leurs dimensions spéciales, il est indispensable de créer une bonne desserte du site par la route. Le transport de personnel et les livraisons d'autres marchandises se feront également de cette manière. Durant la phase d'exploitation, un raccordement routier sera de toute façon également nécessaire.
- Direction de la desserte : lors du choix de la direction de la desserte, la situation de la future centrale, des surfaces temporaires ainsi que le type de desserte (uniquement route ou rail et route) jouent un rôle. Du point de vue topographique, la desserte par le nord ou l'est s'avère difficilement réalisable. Par conséquent, la desserte du site peut être au mieux réalisée à partir de l'ouest ou du sud.

Les possibilités de desserte imaginées sur la base de ces principes ont été évaluées également au vu des critères d'appréciation suivants :

- Gêne pour les groupes d'habitation
- Impact sur l'environnement
- Critères en matière de logistique de construction (p. ex. praticabilité des routes, séparation entre route créée pour la phase de construction et route publique)
- Synergies entre la phase de construction et la phase d'exploitation
- Rapport coût / efficacité.

2.3.5.3.3 Description de la variante de desserte préférée

Compte tenu des critères d'appréciation susmentionnés, la préférence est accordée à une desserte routière exclusivement et à partir du sud. Pour cela, il est prévu de créer un raccordement autoroutier temporaire, c'est-à-dire pour la phase de construction. La semi-jonction existante menant à Mühleberg se limite à une sortie en direction de Neuchâtel et à une entrée en direction de Berne. Seule une jonction complète permet une desserte à partir des deux directions.

Le tronçon séparant le raccordement autoroutier de la zone de construction devra être nouvellement réalisé en majeure partie (cf. Fig. 2.3-7). Il est prévu de construire un pont provisoire au-dessus de l'Aar pour desservir la surface temporaire de Talmatt sur l'autre rive.

Étant donné que toutes les surfaces nécessaires à la phase de construction se trouvent à proximité immédiate du site et/ou au sud de l'autoroute, ce raccordement routier permettra de bien desservir toutes les surfaces ainsi aussi reliées entre elles. En tant qu'option au transport de grandes quantités de matériel par le rail (sauf les grands composants), l'on étudie une desserte combinée rail/route avec une place de manutention et une gare de chantier à Riedbach. Il serait ainsi possible de transporter des marchandises via le réseau ferroviaire existant et de les transporter à partir de et jusqu'à Riedbach, la desserte du chantier se faisant alors par la route avec des camions après le transbordement. Pour cette variante, il faut réaliser la liaison entre la place de manutention et le réseau routier existant de rang supérieur. Il est à noter que des tronçons de liaisons routières actuelles pourront être utilisés.

2.3.5.3.4 Phase d'exploitation de l'EKKM

En comparaison avec la phase de construction, les volumes de matériel à transporter seront moindres durant la phase d'exploitation de l'installation nucléaire. La desserte durant la phase d'exploitation se fera par la route de desserte de l'actuelle KKM ainsi que par la nouvelle voie d'accès prévue pour la phase de construction du nouveau site, du fait qu'elle sera conservée.

Le raccordement autoroutier temporaire pourra alors être supprimé.

2.3.5.4 Récapitulation et évaluation

La variante de desserte préférée est une pure liaison routière, laquelle peut être éventuellement complétée par une option rail/route.

La construction d'une nouvelle route de desserte permettra de garantir un accès indépendant de la circulation routière publique. Il va de soi que la route publique existante pourra toutefois être utilisée dans des cas exceptionnels.

Durant la prochaine phase de planification (permis de construire), d'autres options de desserte seront étudiées, afin de transporter des matériaux en vrac vers une place de manutention raccordée temporairement au réseau ferroviaire existant, p. ex. par le biais de bandes transporteuses ou d'installations de transport à câbles.

Avec la variante retenue, il est possible de desservir le site de Niederruntigen sans entraver la circulation sur la route de desserte de l'actuelle KKM.

2.3.6 Actuelle centrale nucléaire de Mühleberg (KKM)

La phase de construction de l'EKKM sera conçue de manière à ne pas provoquer de nuisance pour l'actuelle KKM, que ce soit durant l'exploitation normale ou la période de révision annuelle.

Pour la période de révision de la KKM, il est prévu d'aménager un parking à proximité du site de la centrale, sans toutefois gêner les surfaces temporaires nécessaires à la construction de l'EKKM. Pour le démantèlement de la KKM, aucune surface temporaire ne sera nécessaire en dehors du site même de la centrale, de sorte que ni l'exploitation ni les travaux ultérieurs de désaffectation de la KKM ne seront perturbés durant les phases de construction et d'exploitation de l'EKKM. Un trafic supplémentaire éventuel pourra être maîtrisé par une coordination appropriée sur les voies existantes.

Avec la nouvelle route de desserte, l'accès à la KKM, aux groupes d'habitation et à la centrale hydroélectrique demeure garanti durant la phase de construction de l'EKKM, même dans des cas exceptionnels. Cela vaut aussi pour les transports conventionnels et radioactifs durant la phase d'exploitation ou de désaffectation de la KKM, qui aura lieu probablement en parallèle à l'exploitation de l'EKKM¹. Il est possible qu'une partie des travaux liés au démantèlement de la centrale puissent avoir lieu durant la phase de construction de l'EKKM. La variante de desserte choisie pour l'EKKM n'entravera en rien l'accès à la KKM.

2.4 Refroidissement

2.4.1 Introduction

Durant l'exploitation normale d'une centrale nucléaire, le refroidissement est généralement garanti par :

- le refroidissement principal destiné à évacuer les rejets de chaleur du condenseur (circuit de refroidissement entre le réacteur et/ou le générateur de vapeur et le condenseur) ainsi éventuellement qu'à refroidir divers systèmes dans la partie conventionnelle (non nucléaire) de l'installation ;
- le refroidissement auxiliaire de systèmes situés dans le bâtiment des machines (p. ex. pompes d'alimentation en eau), dans le bâtiment du réacteur (p. ex. systèmes d'évacuation de la chaleur résiduelle) et dans les bâtiments annexes (p. ex. bassins de stockage des éléments combustibles). Afin de garantir le principe des barrières de confinement destinées à protéger contre le rejet de substances radioactives, le système de refroidissement auxiliaire se compose, pour chaque voie, de deux circuits de refroidissement couplés l'un à l'autre, soit d'un circuit de refroidissement intermédiaire surveillé en tant que barrière et d'un autre circuit d'eau brute secourue, lequel transfère la charge thermique à la source froide externe. Le rejet de chaleur dû au refroidissement de composants non nucléaires est évacué également par le système de refroidissement auxiliaire selon la conception de l'installation.

¹ Les FMB s'efforceront de mettre l'actuelle KKM hors service aussi rapidement que possible après la mise en service de l'EKKM. À l'heure actuelle, l'on ne peut exclure une exploitation parallèle des deux installations, afin de garantir la sécurité d'approvisionnement, non seulement pour les FMB elles-mêmes, mais aussi pour les partenaires participant à la construction de l'EKKM durant la première phase d'exploitation de celle-ci.

Alors que le refroidissement principal n'est, par principe, pas important du point de vue de la sécurité, les systèmes et composants du refroidissement intermédiaire et, selon la technologie de l'installation, du refroidissement auxiliaire sont au contraire importants sur le plan de la sécurité et sont classés et/ou conçus en conséquence.

Le chapitre suivant décrit le mode de refroidissement représentatif de l'EKKM. Les divers circuits de refroidissement sont conçus de manière différenciée selon le type de technologie du réacteur choisi. Ce choix, justement, aura lieu ultérieurement pour l'EKKM, de sorte que les modes d'exécution et les indications présentés par la suite ne correspondent pas en détail à la future conception de l'EKKM, mais sont fournis uniquement à titre d'exemples.

Le mode de refroidissement doit satisfaire aux exigences de la législation fédérale sur la protection des eaux, en particulier à celles de l'Ordonnance sur la protection des eaux OE aux [32] quant au prélèvement d'eau de refroidissement et à l'augmentation de la température en cas de réintroduction (*citation*) :

- Pour les déversements dans les cours d'eau et les retenues, les exigences suivantes sont en outre applicables :
 - la température des eaux de refroidissement ne doit pas être supérieure à 30 °C ; l'autorité peut autoriser des dépassements minimes, de courte durée, en été
 - le réchauffement des eaux ne doit pas être supérieur à 3 °C par rapport à une température aussi peu influencée que possible et dans les tronçons appartenant à la zone à truites du cours d'eau, il ne doit pas être supérieur à 1.5 °C ; la température de l'eau ne doit pas dépasser 25 °C
 - le déversoir doit garantir un mélange rapide des eaux¹
 - les eaux doivent être réchauffées assez lentement pour ne pas entraîner d'atteintes nuisibles aux biocénoses.

De la même façon, il convient de respecter les exigences légales en matière de composition chimique des eaux rejetées ; voir le rapport d'impact sur l'environnement de la demande d'autorisation générale EKKM [33].

Par ailleurs, concernant la conception de l'installation, l'on part du principe que les ouvrages seront construits aussi bas que possible pour des raisons esthétiques et d'impact visuel sur le paysage ; la tour de refroidissement ne devant pas être sensiblement plus haute que les autres bâtiments. La quantité de vapeur visible d'une tour de refroidissement doit être réduite au minimum.

¹ Ici, cela signifie la réintroduction des eaux dans l'Aar

2.4.2 Refroidissement du réacteur

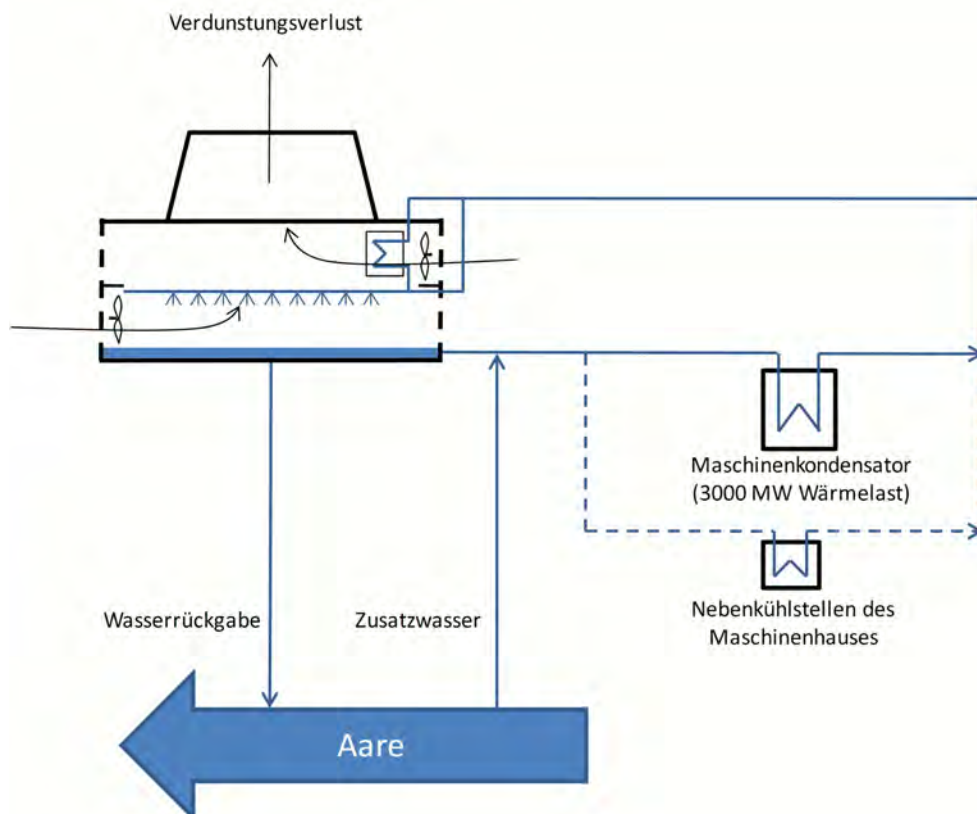
2.4.2.1 Tour de refroidissement hybride

Pour le refroidissement du réacteur, il est prévu de réaliser un circuit de refroidissement comprenant une tour de refroidissement hybride d'env. 60 m de haut, fonctionnant avec un courant d'air forcé selon le principe de refroidissement combiné sec et humide. Il s'agit de ladite tour de refroidissement hybride (HKT).

Avec ce mode de refroidissement, l'air ambiant constitue la source froide principale, lequel, lors du refroidissement de l'eau réchauffée (eau chaude) par le condenseur, est refroidi par la transmission de chaleur à l'air de refroidissement et par l'évaporation d'une partie de l'eau dans la tour de refroidissement. La majeure partie de l'eau est collectée dans le bassin relié à la tour de refroidissement et renvoyée au condenseur ; les déperditions d'eau causées par l'évaporation étant compensées par l'alimentation en eau captée dans l'Aar. Afin que des substances dissoutes ne s'accumulent pas de façon excessive dans le circuit d'eau de refroidissement, une petite quantité de cette eau est évacuée (purgée) par un apport d'eau captée dans l'Aar. Ledit apport d'eau est ainsi la somme de l'alimentation en eau destinée à compenser les pertes dues à l'évaporation et la quantité d'eau réintroduite dans l'Aar. Cet apport d'eau s'élève à environ 2 à 3% de la quantité d'eau du circuit de refroidissement du réacteur.

Fig. 2.4-1 schéma de principe d'un circuit de refroidissement du réacteur.

Fig. 2.4-1 : Principe d'un circuit de refroidissement du réacteur



Une tour de refroidissement hybride (HKT) se compose d'une partie destinée à l'évaporation (partie humide) et d'une partie sèche. Dans la partie humide inférieure, l'eau chaude est pulvérisée comme dans une tour de refroidissement à tirage naturel et soumise à une ventilation forcée au moyen de grands ventilateurs disposés sur la circonférence. Le courant d'air ainsi obtenu est alors mélangé à un deuxième courant d'air dans la partie sèche supérieure. Ce courant d'air est également aspiré par des ventilateurs et circule par le biais de l'échangeur de chaleur, lui-même recevant une partie de l'eau chaude. Par le mélange des deux courants d'air, l'humidité relative est réglée de telle sorte que les traînées de vapeur rejetées dans l'environnement, caractéristiques du fonctionnement d'une tour de refroidissement classique à tirage naturel, soient largement évitées. L'eau du circuit est collectée dans un bassin inférieur et renvoyée au condenseur.

En raison des conditions météorologiques sur le site d'implantation, l'on s'attend à ce que l'air évacué se situe, la plupart du temps, au-delà de la limite de saturation d'humidité (point de rosée), de sorte que la quantité de vapeur visible sera négligeable. Dans certaines conditions (temps froid et humide), il ne peut être exclu que de la vapeur apparaisse. De telles conditions s'accompagnant toutefois la plupart du temps de formation de brouillard, la vapeur visible sera à peine perceptible.

2.4.2.2 Variantes possibles d'utilisation d'une tour de refroidissement hybride HKT

Les études de faisabilité réalisées pour l'EKKM s'appuient sur une installation d'env. 1 600 MW de puissance électrique nette. Les rejets thermiques devant être évacués sont ainsi de l'ordre de 3000 MW. Elles montrent que les exigences légales et conditions esthétiques mentionnées ci-avant peuvent être respectées avec l'utilisation de tours de refroidissement hybrides.

Eu égard à la classe de puissance de la future installation (cf. chap. 2.2.1), deux variantes ont été examinées, à savoir d'une part, une variante avec une grande tour de refroidissement unique et, d'autre part, une variante avec deux tours de refroidissement plus petites. Les deux variantes se distinguent l'une de l'autre par la température moyenne de l'eau dans le circuit de refroidissement du réacteur et déterminent donc, en partie, le rendement de l'installation. Ledit écart de la limite de refroidissement, c.-à-d. la différence de température de l'eau refroidie dans le bassin de collecte de la tour de refroidissement par rapport à l'air humide extérieur joue ici un rôle important : plus cette différence est moindre, plus grand est le rendement. Eu égard aux conceptions de tours de refroidissement étudiées jusqu'ici, et jugées réalisables d'un point de vue actuel, les limites de refroidissement atteintes varient de 18 °C pour une seule tour de refroidissement à 14 °C pour deux tours de refroidissement. Ces valeurs sont toutefois approximatives, et pourront être optimisées après le choix de la technologie de l'installation.

Dans l'état actuel des études entreprises, une tour de refroidissement hybride a un diamètre d'env. 160 à 180 m et une hauteur maximale de 60 m. En cas de variante avec deux tours de refroidissement, le diamètre se réduit à env. 130 m par tour pour une hauteur inchangée (Remarque : les deux tours de refroidissement devraient être au moins séparées d'un demi-diamètre l'une de l'autre, cf. Fig. 2.3-6, où le plan horizontal des tours de refroidissement est représenté par le cercle intérieur).

Pour les installations avec une puissance électrique nette inférieure (1 100-1 400 MW), une seule tour de refroidissement suffit avec un diamètre inférieur d'env. 140-160 m. Pour estimer l'espace de construction disponible et les répercussions esthétiques et l'impact visuel, l'on s'est basé sur les plus grandes dimensions. Les valeurs arrondies vers le haut concernant la consommation d'eau du refroidissement du réacteur d'une installation d'env. 1600 MW de puissance électrique nette se présentent comme suit :

- Captage de l'eau de l'Aar : 0.8 à 1.7 m³/s, y c. le captage d'eau dans le circuit de refroidissement du réacteur pour compenser la perte par évaporation et l'eau restituée
- Réintroduction de l'eau dans l'Aar : 0.2 à 0.5 m³/s
- Quantité d'eau évaporée : 0.6 à 1.2 m³/s.

Les variations de valeurs sont dues aux conceptions différentes de l'installation et aux paramètres de conception également différents de la tour de refroidissement ainsi qu'aux écarts saisonniers des conditions météorologiques. La quantité d'eau captée dans l'Aar correspond à l'apport d'eau destiné à compenser les pertes dues à l'évaporation.

Pour respecter la limite de température prescrite maximale de 30 °C pour l'eau déversée (cf. chap. 2.4.1), l'on mélange, entre autres en été, un apport d'eau (supplémentaire) de l'Aar de 0.6 m³/s maximum à l'eau restituée.

Le circuit de refroidissement du réacteur, avec une tour hybride, peut satisfaire aux exigences citées au chap. 2.4.1 quant à la limitation du réchauffement de l'eau de l'Aar, et ce, dans toutes les phases de l'exploitation. En aval du point de réintroduction de l'eau dans l'Aar, l'augmentation de température sera en moyenne d'env. 0.02 °C, soit bien en-deçà de la valeur limite de 3 °C.

Pour le traitement et/ou conditionnement de l'apport d'eau (supplémentaire) et de l'eau de recirculation dans le circuit de refroidissement du réacteur, l'on a ajouté des produits chimiques à l'eau. Les systèmes de refroidissement sont conçus de façon à pouvoir respecter les valeurs limites légales correspondantes ; voir le rapport sur la demande d'autorisation générale concernant l'impact sur l'environnement [33] pour des explications plus détaillées.

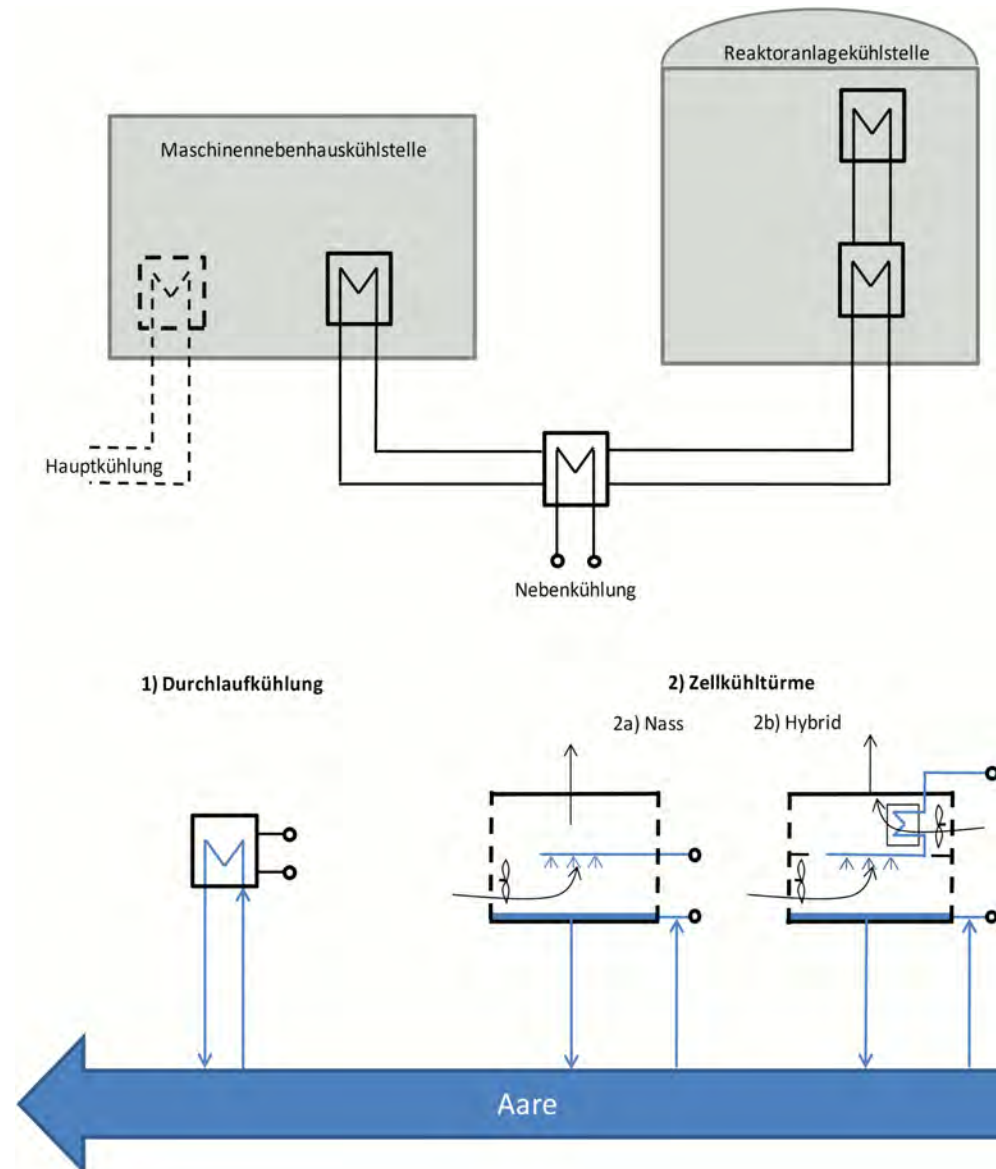
2.4.3 Refroidissement auxiliaire

Ledit refroidissement auxiliaire prend en charge le refroidissement de systèmes et de composants en phase d'exploitation ainsi que l'extraction de la chaleur résiduelle dégagée lorsque le réacteur est à l'arrêt. Pour maintenir le principe des barrières pour contenir les substances radioactives, le refroidissement auxiliaire est conçu avec deux circuits de refroidissement couplés l'un à l'autre pour chaque voie : soit un circuit de refroidissement intermédiaire surveillé en tant que barrière et un autre circuit de refroidissement auxiliaire, lequel transfère la charge thermique à la source froide. Les circuits de refroidissement intermédiaires et auxiliaires doivent être conçus de manière redondante, afin de garantir un niveau de sécurité et une disponibilité élevés.

Fig. 2.4-2 montre la conception éventuellement possible du refroidissement auxiliaire. Concernant le refroidissement auxiliaire durant la phase d'exploitation et lors de l'arrêt du réacteur, deux variantes sont prises en considération :

- Refroidissement en circuit ouvert avec l'eau de l'Aar
- Tours de refroidissement cellulaires.

Fig. 2.4-2 : Schéma de principe du refroidissement auxiliaire avec variantes possibles pour le refroidissement auxiliaire



Les rejets thermiques évacués par les points de refroidissement auxiliaires du bâtiment des machines pourraient l'être aussi en partie au moyen du refroidissement du réacteur. Sur les types d'installations étudiées, la capacité installée des systèmes de refroidissement auxiliaires varie de 100 MW à 180 MW. Les charges thermiques résultant du refroidissement intermédiaire nucléaire en phase d'exploitation varient de 20 MW à 40 MW.

Si les rejets thermiques sont introduits directement dans l'Aare (première variante), le prélèvement d'eau en phase d'exploitation augmenterait au maximum de 2 m³/s. En cas d'arrêt du réacteur (p. ex. pour cause de rechargement de combustible), le refroidissement du réacteur est interrompu et la consommation d'eau du refroidissement auxiliaire peut, en fonction de la vitesse d'arrêt, augmenter au maximum jusqu'à 4 m³/s. L'augmentation de température avec ce type de

refroidissement demeure également avec au maximum 0.6 °C (en moyenne 0.2-0.3 °C) en deçà de la limite prescrite de 3 °C.

La deuxième variante comprend des tours de refroidissement cellulaires (humide ou hybride) fonctionnant avec du courant d'air forcé. La réserve d'eau dans ces cellules est alimentée par l'eau de l'Aar. Les besoins en eau sont toutefois sensiblement moins élevés que ceux du refroidissement du réacteur. Pour ce cas, les quantités de consommation d'eau indiquées au chapitre 2.4.2.2 demeurent valables, aussi pour le refroidissement intégral de l'installation ; de la même façon, la valeur moindre indiquée pour l'augmentation de la température de l'eau en aval du point de réintroduction de l'eau dans l'Aar demeure aussi valable.

2.4.4 Refroidissement de secours

Les technologies avancées en matière de conception de réacteurs nucléaires comprennent des systèmes dits de refroidissement de secours destinés à maîtriser des défaillances dans le cadre des règles de dimensionnement et/ou à atténuer les effets de défaillances hors dimensionnement. Lors de la conception de ces fonctions de sécurité pour l'EKKM, il faudra tenir compte des exigences légales correspondantes selon l'Ordonnance fédérale sur l'énergie nucléaire (OENu ; RS 732.11)¹, par exemple quant à la redondance et à la diversité ainsi qu'en ce qui concerne les critères des autorités de sûreté en matière de dimensionnement².

Pour garantir la redondance lors du dimensionnement, il convient notamment de tenir compte dudit principe N-2, c'est-à-dire qu'en plus d'une erreur isolée (défaillance d'un système de refroidissement de secours), il est parti du principe que pour des raisons de maintenance, un autre système de refroidissement de secours n'est pas disponible.

En règle générale, toutes les technologies examinées sont en mesure de satisfaire à ces exigences, compte tenu du fait que les concepts de dimensionnement peuvent être très différents les uns des autres. Les variantes de refroidissement auxiliaires évoquées au chapitre précédent (refroidissement en circuit ouvert et/ou tours de refroidissement cellulaires) peuvent représenter les sources froides impératives à mettre à disposition pour quelques conceptions d'installations. Pour ce faire, ils doivent être dimensionnés conformément aux exigences légales et réglementaires. Les preuves détaillées que le concept de dimensionnement qui sera choisi ultérieurement satisfait bien à ces exigences et critères, seront fournies pour la première fois dans le cadre des vérifications relatives à l'octroi du permis de construire.

Dans le cadre du dimensionnement, les technologies examinées en cas d'accident de perte de réfrigérant primaire octroient une exploitation automatique et ininterrompue jusqu'à 72 heures. Par conséquent, l'on dispose ainsi de suffisamment de temps pour mettre sur pied un approvisionnement en eau de rechange, au cas où l'approvisionnement en eau prévue lors du dimensionnement pour le refroidissement de secours serait défaillant. Une première alternative consiste à prélever de l'eau dans l'Aar grâce à l'action des sapeurs-pompiers. Une autre alternative est un réservoir d'eau d'une capacité de quelques milliers de m³, installé non loin de la nouvelle installation à une altitude d'environ 50 m au-dessus du niveau zéro de l'installation. Il

¹ Art. 10 OENu ; RS 732.11

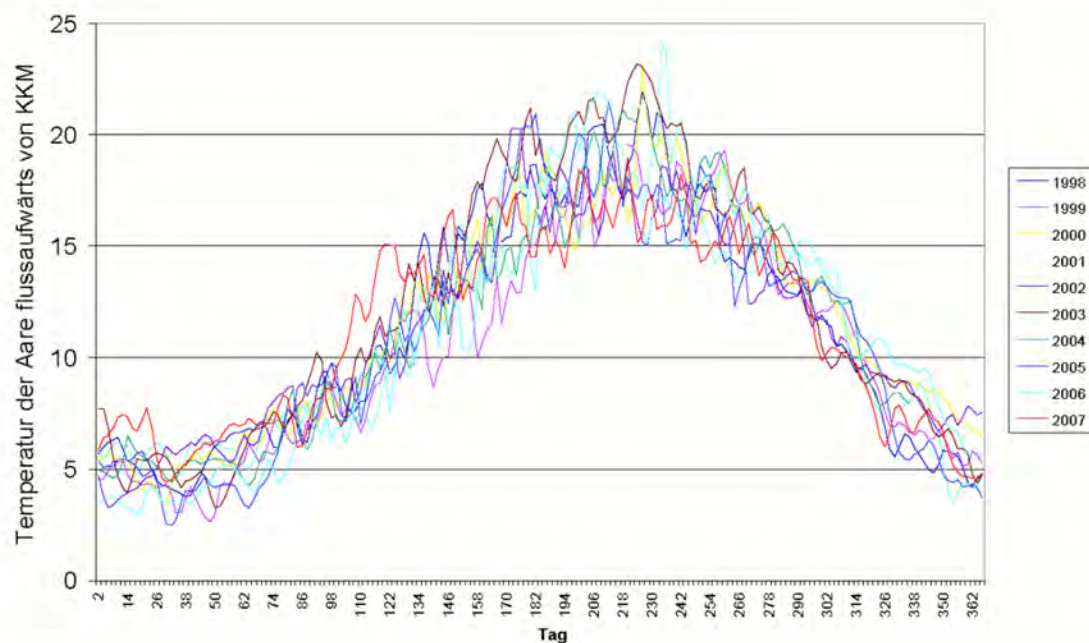
² Directive DSN R-101 [34]

pourrait aussi être utilisé en cas d'exploitation normale, p. ex. pour l'approvisionnement en eau d'extinction en cas d'incendie ou pour l'approvisionnement en eau potable. L'utilisation de la nappe phréatique (eaux souterraines) sur le site constitue une autre alternative. Selon les estimations actuelles (se basant sur des valeurs de mesure des forages de 2008 ; cf. chapitre 3.5.1.4.1) au moins quelque 500 l/min seraient ainsi à disposition, ce qui, en fonction de la technologie choisie pour le réacteur, est suffisant pour 20 à 100% de l'extraction de la chaleur résiduelle à compter de 72 heures après la survenance d'une défaillance.

2.4.5 Conditions climatiques extrêmes, réchauffement climatique

Actuellement, la température moyenne annuelle de l'Aar en amont de la centrale nucléaire de Mühleberg (KKM) est d'environ 11-12 °C. Durant la période 1998-2007, une température située entre 24 et 25 °C n'a été relevée que pendant deux jours en 2001 (cf. Fig. 2.4-2), de sorte que la probabilité qu'un cas extrême survienne peut être considérée comme très faible. En raison du phénomène de réchauffement climatique, la fréquence de tels cas extrêmes pourrait légèrement augmenter à l'avenir, mais ce possible accroissement est très difficilement estimable d'un point de vue actuel.

Fig. 2.4-2 : Valeurs moyennes de jour de la température de l'Aar en amont de la centrale nucléaire de Mühleberg (KKM) pour la période 1998-2007



Concernant le comportement de l'installation jusqu'à la fin de l'exploitation commerciale (cf. chap. 3.3.11), l'on s'attend à un accroissement moyen des conditions environnementales (air et eau) d'env. 3 °C. Même avec cette augmentation de température de l'eau et de l'air, les résultats fournis dans le présent chapitre concernant le refroidissement et donc le dimensionnement des circuits de refroidissement de l'installation, demeurent inchangés pour l'essentiel. Notons encore ici que le degré de rendement de la nouvelle installation pourrait varier légèrement en cas de température plus élevée de l'air humide.

En cas de températures élevées de l'Aar¹, une réduction de puissance peut s'avérer un remède efficace pour l'actuelle KKM, du fait que le circuit de refroidissement du réacteur est alimenté directement par l'eau de l'Aar. Concernant le circuit de refroidissement prévu pour l'EKKM, l'atmosphère constitue toutefois la source froide principale, de sorte qu'une réduction de puissance, voire même un arrêt du réacteur, ne serait pas judicieux (l'augmentation de la température de l'eau est en moyenne d'env. 0.02 °C et/ou de d'env. 0.2-0.3 °C) avec un refroidissement auxiliaire par des tours de refroidissement cellulaires et/ou un refroidissement en circuit ouvert alimenté par l'eau de l'Aar (cf. chap. 2.4.3).

2.4.6 Résumé

Pour le refroidissement du réacteur de l'EKKM, l'on prévoit un circuit de refroidissement doté d'une tour de refroidissement hybride (refroidissement combiné sec/humide avec courant d'air forcé). Pour le refroidissement auxiliaire, l'on prévoit soit un refroidissement direct avec l'eau de l'Aar, soit un refroidissement avec de petites tours de refroidissement cellulaires.

Au total, les exigences légales concernant l'utilisation de cours d'eau peuvent être respectées quelles que soient les conditions météorologiques.

Au cas où le refroidissement global (refroidissement du réacteur et refroidissement auxiliaire) ne serait assuré qu'avec des tours de refroidissement, la prise d'eau de l'Aar irait jusqu'à 2.3 m³/s (valeur moyenne = env. 1 m³/s) pour une installation d'une puissance électrique de 1600 MW. La quantité d'eau évaporée est comprise entre 0.6 et 1.2 m³/s.

Au cas où le refroidissement du réacteur serait assuré avec une tour de refroidissement hybride et où le refroidissement auxiliaire serait un refroidissement en circuit ouvert, la prise d'eau irait jusqu'à 4.3 m³/s (valeur moyenne = env. 3 m³/s).

En cas de puissance de l'installation plus faible ou plus grande, il faut réduire ou augmenter ces valeurs en conséquence.

Les effets possibles de conditions climatiques extrêmes et du réchauffement climatique n'influencent pas sensiblement les caractéristiques du refroidissement ; la sécurité n'est pas non plus touchée dans ces cas extrêmes.

2.4.7 Exploitation parallèle KKM – EKKM²

Le présent chapitre traite des répercussions possibles sur le refroidissement pour le cas où l'installation existante (KKM) et la nouvelle installation (EKKM) seraient exploitées simultanément.

Le site de Niederruntigen se trouve en amont de la centrale nucléaire existante de Mühleberg (KKM) : le point de réintroduction de l'eau de refroidissement de l'EKKM dans l'Aar se situera donc en amont du point de captage de l'eau utilisée pour le refroidissement de la KKM. Cet emplacement a été choisi de sorte à rendre possible un mélange de l'eau évacuée par l'EKKM

¹ Une situation similaire est survenue pour plusieurs centrales nucléaires en Europe durant la canicule en été 2003.

² Les FMB s'efforceront de mettre l'actuelle KKM hors service aussi rapidement que possible après la mise en service de l'EKKM. À l'heure actuelle, l'on ne peut exclure une exploitation parallèle des deux installations, afin de garantir la sécurité d'approvisionnement, non seulement pour les FMB elles-mêmes, mais aussi pour les partenaires participant à la construction de l'EKKM durant la première phase d'exploitation de celle-ci.

avec l'eau de l'Aar en amont du point de captage de l'eau de refroidissement de la KKM, de sorte que de grands gradients thermiques dans l'eau en amont des pompes d'aspiration de la KKM peuvent être évités.

Comme cela a déjà été expliqué au chapitre 2.4.3, l'alimentation en eau de l'EKKM atteint au maximum $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$; étant donné que la quantité d'eau évaporée atteint au maximum $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (été) et au minimum $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (hiver), seule cette quantité d'eau est effectivement prélevée de l'Aar. Étant donné qu'il ne faut pas s'attendre à des débits de l'eau de l'Aar inférieurs à env. $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (hiver) (cf. chap. 3.4.4.1.3), il y a toujours assez d'eau de refroidissement pour la KKM (maximum nécessaire = $11.6 \text{ m}^3/\text{s}$).

L'augmentation maximale de la température de l'eau de refroidissement de l'EKKM rejetée dans l'Aar atteint 0.6 °C (cf. aussi chap. 2.4.3). En comparaison avec la hausse de température des eaux usées pouvant aller jusqu'à 13 °C pour la KKM qui fonctionne exclusivement avec un refroidissement en circuit ouvert, cela est mineur et ne représente aucune véritable restriction d'exploitation pour la KKM. Pour celle-ci, la limitation réelle est la température de l'eau en amont des deux sites. Afin de pouvoir respecter la limite de température moyenne 33 °C au point de réintroduction de l'eau de la KKM dans l'Aar après le passage dans la centrale, un arrêt de l'EKKM ne représenterait pas un remède en cas de températures élevées de l'eau de l'Aar selon la saison (cf. chap 2.4.5), et il faudrait réduire la puissance de la KKM selon les rapports de température constatés. Cette situation ne survient que de façon isolée. La fréquence d'une température de l'eau supérieure à 20 °C atteint 3.7% par an durant la période 1998-2007 (cf. aussi Fig. 2.4-2). Du fait des répercussions du réchauffement climatique, cette fréquence augmenterait légèrement.

Les conséquences reconnaissables, d'un point de vue actuel, du réchauffement climatique ne modifient pas essentiellement les conclusions indiquées dans le présent chapitre.

2.5 Respect des exigences légales et réglementaires

L'actuelle réglementation¹ (système de prélèvement) comprenant des exigences pour l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire en Suisse se compose de lois, d'ordonnances ainsi que de directives édictées par les autorités concernant, en majeure partie, l'exploitation et la technologie des centrales nucléaires existantes.

Par ailleurs, les directives édictées par les autorités ne sont que partiellement adaptées à la législation en vigueur. La demande d'autorisation générale s'appuie sur les exigences actuelles des autorités, dans l'attente que cette adaptation soit réalisée prochainement, et notamment en ce qui concerne les directives comprenant des principes de conception spécifiques aux réacteurs à eau légères REL, comme l'exige l'Ordonnance fédérale sur l'énergie nucléaire OENu².

Conformément à la pratique en vigueur jusqu'ici, l'on tient compte pour la demande d'autorisation générale aussi des exigences techniques en matière de sécurité des autorités du pays d'origine de la technologie, de même que des règles internationales édictées par l'IAEO³, l'EU⁴ et la WENRA⁵.

Par principe, pour l'étude, la construction, l'exploitation et le démantèlement, la requérante s'engage à respecter les exigences légales en vigueur et à tenir compte des directives formulées par les autorités.

2.5.1 Mesures de protection, niveaux de sécurité et principes régissant la conception

La base et le contenu du rapport de sécurité s'appuient sur la législation fédérale actuelle, c.-à-d. la Loi sur l'énergie nucléaire LENu [1] et la Loi sur la radioprotection LRaP [3], y compris les ordonnances d'exécution en découlant ainsi que les ordonnances et directives promulguées par les autorités de surveillance en vigueur aujourd'hui.

Les principes applicables à l'utilisation de l'énergie nucléaire⁶, ainsi que les mesures de protection nécessaires conformément aux principes reconnus au plan international pour garantir la sécurité⁷, sont définis dans la Loi sur l'énergie nucléaire LENu [1]. Les exigences de rang supérieur de la Loi sur la radioprotection LRaP [3] précisent la protection de l'homme et de l'environnement contre les dangers dus aux rayonnements ionisants.

L'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2] fixe d'autres obligations en matière de mesures de protection et exige une protection suffisante contre les défaillances ayant leur origine tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des installations nucléaires. Ces mesures de protection englobent une

¹ État en décembre 2008

² Art. 10, al. 2 OENu (RS 732.11).

³ Organisation internationale de l'énergie atomique IAEO (International Atomic Energy Agency) : Fundamental Safety Principles, Safety Requirements, Safety Guides

⁴ Union européenne EU : European Utility Requirements (EUR) for REL Nuclear Power Plants

⁵ Western European Nuclear Regulators' Association WENRA : Reference Levels

⁶ Art. 4 LENu ; RS 732.1

⁷ Art. 8 LENu ; RS 732.1

conception selon le principe dit de la « défense en profondeur »¹ qui, combinée avec des processus d'exploitation appropriés, représente une protection échelonnée contre la survenance et les répercussions des défaillances. Cet échelonnement se présente comme suit :

- éviter les écarts par rapport à l'exploitation normale (norme)
- détecter et corriger de tels écarts, afin d'éviter des défaillances
- maîtriser les défaillances
- réduire les répercussions des défaillances et/ou le rejet de substances radioactives
- prendre des mesures de protection contre les cas d'urgence dans le voisinage de l'installation nucléaire.

De la même façon, la conception englobe plusieurs barrières de sécurité physiques, dont l'intégrité est garantie par des fonctions de sécurité actives ou passives, ou une combinaison des deux, ainsi que par des mesures liées à l'exploitation.

Les principes de conception concernant les fonctions de sécurité sont définis dans l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu². Les principes essentiels sont :

- déclenchement automatique des fonctions de sécurité
- redondance et diversité des fonctions de sécurité
- fonctionnalité, même s'il se produit une erreur isolée quelconque indépendamment de l'événement déclencheur
- comportement du système axé sur la sécurité en cas de dysfonctionnement d'un équipement
- séparation dans l'espace et possibilité de vérification des circuits redondants destinés à remplir une fonction de sécurité.

Lors de la phase d'étude et de conception de la nouvelle installation, les mesures de protection susmentionnées sont prises en compte et/ou mises en œuvre. Les preuves correspondantes de cette mise en œuvre seront fournies pour la première fois dans le dossier de demande de permis de construire.

Par ailleurs, la conception de l'EKKM tient compte également de sa déconstruction. Cela sera également décrit ultérieurement dans le cadre de la demande de permis de construire.

¹ Principe de mise en place de plusieurs mesures de sécurité redondantes et indépendantes les unes des autres destinées à réduire le risque qu'une erreur critique entraîne un dommage au cœur du réacteur ou une défaillance de l'enceinte de confinement.

² Art. 10 OENu ; RS 732.11

2.5.2 Réglementation concernant l'exploitation normale et les défaillances

Comme l'exigent la Loi fédérale sur l'énergie nucléaire LENu¹ et la Loi fédérale sur la radioprotection LRAp², l'homme et l'environnement doivent être protégés du rayonnement ionisant. Des mesures de protection correspondantes³, entre autres lors de la conception de l'installation nucléaire, doivent garantir cette protection. Ces mesures de protection et les défaillances à prendre en compte sont aussi précisées dans l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu⁴.

Les risques sont causés par des incidents graves déclenchés soit à l'intérieur (événements dits *internes*) soit à l'extérieur (événements dits *externes*) de l'installation et ont pour conséquence un écart par rapport à l'exploitation normale de l'installation.

Par principe, la protection contre des événements dits internes à l'installation nucléaire est garantie par la conception et le dimensionnement de cette dernière (incidents d'exploitation et défaillances dans le cadre des règles de dimensionnement, cf. chap. 2.5.3). ci-après). La conception et le dimensionnement peuvent en partie offrir une protection contre les événements externes et/ou cette protection est exigée en matière de conception par les autorités de sûreté. En règle générale, l'efficacité des mesures préventives prises pour la protection est évaluée au vu des résultats des analyses de risques spécifiques à l'installation (analyses probabilistes de sécurité APS).

Au moment de la rédaction de la demande d'autorisation générale, seuls les grands traits de l'installation devant être construite ont été fixés. La conception définitive de l'installation sera définie ultérieurement et documentée dans le dossier de demande de permis de construire. Les mesures de protection contre les événements internes sont spécifiques à la conception et ne peuvent pas être fixées à ce jour. La demande d'autorisation générale ne contient donc aucun examen ; la définition des événements internes et l'analyse détaillée de leurs effets, et/ou des défaillances pouvant en résulter, seront également documentées dans le dossier de la demande de permis de construire.

Alors que la protection contre des événements internes à l'installation est spécifique à la conception de cette dernière, et n'est pas concernée par les caractéristiques du site, ces dernières peuvent s'avérer importantes en ce qui concerne la probabilité d'apparition et/ou la répercussion d'événements externes. Ces derniers sont donc analysés pour évaluer les risques et/ou l'adéquation du site (cf. chap. 3.6).

Les exigences légales en vigueur quant aux mesures de précaution nécessaires en cas de défaillance seront remplies pour la conception de la nouvelle installation. Cela permet de garantir que des mesures de protection suffisantes peuvent être prises pour maîtriser et/ou atténuer les risques.

¹ Art. 4, al. 1 LENu

² Art. 1 LRAp

³ Art. 5, al. 1 LENu

⁴ Art. 8, al. 1 – 3 OENu

2.5.3 Analyses de défaillances

Les défaillances, auxquelles il faut s'attendre pendant la durée de vie de l'installation nucléaire, sont maîtrisées par celle-ci, également pour le cas où il se produit une erreur isolée quelconque, indépendamment de l'événement déclencheur¹. La fréquence de ces *défaillances dites dans le cadre des règles de dimensionnement* (défaillance survenant plus d'une fois sur 1 million d'années d'exploitation) correspond, sans erreurs isolées, à la fréquence de survenance de l'événement déclencheur, sinon cette dernière fréquence est multipliée par la probabilité d'une erreur isolée.

La gamme des défaillances potentielles sera analysée dès que la conception définitive de l'installation aura été fixée pour l'EKKM. Ensuite, les défaillances dans le cadre des règles de dimensionnement seront subdivisées en trois catégories conformément aux exigences des autorités². Le débit de dose maximale de rayonnements pour chaque personne se tenant dans le voisinage de l'installation est fixé pour chacune de ces trois catégories³ et doit être respecté pour toute défaillance dans la catégorie correspondante.

Les analyses relatives à la gamme des défaillances ainsi que celles concernant les défaillances et/ou les preuves du respect des valeurs limites de dose (analyses radiologiques) seront réalisées pour la première fois dans le cadre de la demande de permis de construire.

On entend par *défaillances hors dimensionnement* les défaillances extrêmement improbables (fréquence inférieure à 1 fois pour 1 million d'années d'exploitation). Elles sont, par exemple, déclenchées par des erreurs multiples ou des événements très rares. Pour de telles défaillances, aucune valeur limite de dose de radiation n'a été fixée, mais pour celles dont les conséquences peuvent être graves, l'autorité de surveillance exige des mesures préventives⁴. Pour les constructions devant être nouvellement réalisées, de telles mesures peuvent être mises en œuvre au moins en partie dans le cadre de la conception. C'est ainsi que les normes internationales EU (EUR) prévoient, pour le dimensionnement de nouvelles centrales nucléaires, lesdites « Design Extension Conditions » (DEC). Il s'agit ici d'événements très rares et/ou de défaillances déclenchées par des erreurs multiples (« Complex Sequences »), pouvant être maîtrisés par une conception correspondante de l'installation et sans moyen auxiliaire provenant de la gestion des accidents (« Accident Management »). Dans le cadre de la conception de l'EKKM, il est prévu de tenir compte de telles extensions.

Par ailleurs, pour limiter les répercussions desdites défaillances hors dimensionnement, il est prévu des mesures préventives dans le cadre de la protection des cas d'urgence internes⁵.

L'évaluation des défaillances hors dimensionnement et l'estimation de l'efficacité et de la fiabilité des mesures préventives prises ont lieu au vu des résultats des analyses de sécurité déterministes et probabilistes devant être réalisées en fonction de la spécificité de l'installation (cf. [93]) et dans le cadre de la demande de permis de construire. Il est tenu également compte ici de la fiabilité du personnel de l'installation (Human Reliability Analysis, HRA).

¹ Directive DSN R-101 [34]

² Directive DSN R-100 [45]

³ Art. 94 et art. 96 ORaP [4]

⁴ Art. 94 ORaP [4]

⁵ Directives DSN R-102 [39] et R-103 [40]

2.6 Protection en cas d'urgence

2.6.1 Situation initiale

Pour protéger des risques d'irradiation, le dimensionnement d'une installation nucléaire s'appuie sur ledit concept de défense en profondeur (concept « Defense in Depth », cf. chap. 2.5.1). Ce concept englobe la protection contre les cas d'urgence internes pris en compte dans le dimensionnement de l'installation. Le dernier niveau dudit concept de défense en profondeur est constitué par la protection contre les cas d'urgence externes à l'installation. Celle-ci intervient lorsque les répercussions d'une défaillance ne se limitent plus seulement à l'installation elle-même. La protection contre les cas d'urgence internes et externes est expliquée plus en détail aux chapitres 2.6.3 et 2.6.4.

Conformément à la Loi fédérale sur l'énergie nucléaire LEnu¹, des mesures de protection en cas d'urgence doivent être préparées pour limiter les dégâts en cas d'émission de quantités dangereuses de substances radioactives. Conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OEnu², les concepts correspondants de protection en cas d'urgence sont décrits dans le rapport de sécurité accompagnant la demande de permis de construire. Selon cette même ordonnance³, l'organisation de l'exploitation doit être conçue pour assumer elle-même la responsabilité de la préparation des plans d'urgence et de leur mise en œuvre ainsi que de l'appréciation systématique de la planification d'urgence. Conformément aussi à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OEnu⁴, un règlement pour les cas d'urgence devra être déposé avec la demande d'autorisation d'exploiter.

En dehors des dispositions de l'Ordonnance sur la radioprotection ORaP [4], les mesures de protection s'appuient sur ledit Concept des mesures à prendre en fonction des doses (CMD) contenu dans l'Ordonnance fédérale relative à l'organisation d'intervention en cas d'augmentation de la radioactivité (OROIR [82])⁵. Le CMD fixe un intervalle de doses comportant un seuil de dose inférieur (SDI) et un seuil de dose supérieur (SDS) (valeurs ou niveaux d'intervention « intervention levels » selon la terminologie internationale) pour prendre les mesures de protection appropriées pour restreindre le risque pour la santé de la population (séjour dans la maison pour les groupes de personnes sensibles, séjour dans la maison / dans la cave / dans l'abri, évacuation, ingestion de tablettes d'iode, mesures dans l'agriculture) en cas de dépassement des valeurs individuelles, dans la mesure où leur ordonnance est jugée possible et judicieuse.

¹ Art. 5 Abs. 2 LEnu

² Annexe 4 OEnu

³ Art. 30 et 33 OEnu

⁴ Art. 28 et 41 ainsi qu'annexe 3 OEnu

⁵ L'ordonnance est en cours de révision et doit être transformée en une Ordonnance sur l'organisation d'interventions en cas d'événements naturels et ABC (Ordonnance d'interventions ABC). Le CMD révisé est appliqué par analogie dans le présent chapitre, bien que certaines différences d'opinion subsistent entre experts de la Confédération et des cantons quant à la révision du concept, en particulier en ce qui concerne l'évacuation préventive.

Par ailleurs, des exigences sont fixées quant à la protection en cas d'urgence [46] ; elles contiennent, entre autres, la définition de deux zones de protection en cas d'urgence. « La zone 1 couvre, autour de l'installation nucléaire, la région dans le périmètre de laquelle un accident grave peut causer, pour la population, un danger exigeant des mesures de protection rapide ». Eu égard à la proximité immédiate des sites KKM et EKKM, l'on prend ici comme zone 1 celle déjà définie pour la centrale existante (rayon de 2.8 km). Entre autres, la définition exacte de la zone 1 s'appuie sur la puissance du réacteur et la conception de l'installation et sera fixée ultérieurement dans le cadre de la demande de permis de construire conformément à l'Ordonnance fédérale sur la protection en cas d'urgence au voisinage des installations nucléaires [46].

Conformément à l'Ordonnance fédérale sur la protection en cas d'urgence au voisinage des installations nucléaires [46], la zone 2, contiguë à la zone 1, couvre une aire d'un rayon d'environ 20 km divisée en secteurs à risques. Les zones sont fixées par le Conseil fédéral ; elles sont vérifiées chaque année et documentées par l'autorité de surveillance¹.

La zone 3 désigne le reste de la Suisse.

Les mesures de protection en cas d'urgence à prendre, lorsque des défaillances se produisent et représentent un danger pour le voisinage de l'installation, sont réglementées dans les documents établis par la Commission fédérale pour la protection ABC (ComABC) [47].

2.6.2 Organisation de l'exploitation en cas d'urgence

La préparation et la mise en œuvre de mesures de protection en cas d'urgence seront contenues dans l'organisation de l'exploitation de la future titulaire de l'autorisation, qui se développera tout au long du projet. Dans ce cadre, il faudra tenir compte des exigences des autorités en vigueur.

L'état-major de l'exploitation en cas d'urgence sera responsable, en harmonie avec la protection en cas d'urgence [47] de la reconnaissance et de l'appréciation des défaillances, de la prise de mesures visant à les maîtriser, ainsi que de l'annonce des défaillances et/ou de l'information des autorités et des organes compétents.

La planification d'urgence a lieu dans l'installation selon le règlement pour les cas d'urgence précité, et ce, à plusieurs niveaux :

- Surveillance de l'installation : contrôle de l'installation par l'équipe en charge de l'exploitation, détection de dérangements et si possible, intervention destinée à la sécurité.
- Mesures de surveillance de la radioactivité : stations de mesures pour surveiller le débit de dose ambiante à l'intérieur et à l'extérieur du périmètre de l'installation.
- Alerte et alarme : communication d'une annonce de défaillance par l'état-major d'urgence aux autorités compétentes (DSN, CENAL / OFPP, organe compétent du canton-site). L'alerte et l'alarme sont fixées dans les ordonnances correspondantes [48], [82], [94].
- Compte rendu sur le suivi de la défaillance adressé par l'état-major d'urgence aux organes compétents.

¹ « Plans de zones pour la planification d'urgence », cf. www.hsk.ch

2.6.3 Protection en cas d'urgence interne à l'installation

La protection en cas d'urgence interne à l'installation s'appuie sur l'application systématique du concept de défense en profondeur « Defense in Depth », c.-à-d. sur une prévoyance échelonnée de la sécurité établie lors de la conception de l'EKKM, en relation avec une formation approfondie du personnel d'exploitation (entre autres grâce à l'utilisation d'un simulateur d'entraînement avant la mise en service de la centrale nucléaire pour la formation du personnel d'exploitation).

Une instrumentation suffisante en matière de défaillances ainsi qu'un « *Safety Parameter Display System (SPDS)* » et un « *Post Accident Sampling System (PASS)* » doivent être à la disposition de l'équipe en charge de l'exploitation et/ou de l'état-major d'urgence.

Par ailleurs, l'on développe des stratégies destinées à atténuer les répercussions d'accidents graves « *Severe Accident Management Guidance, SAMG* » ainsi que des aides à la prise de décisions correspondantes.

2.6.4 Protection en cas d'urgence externe à l'installation

Les installations dotées de systèmes de réacteurs des générations III et III+ - entrant en ligne de compte pour l'EKKM et examinées dans le cadre de l'étude – présentent un dispositif de sécurité extrêmement perfectionné avec des conceptions avancées telles que des systèmes multiples et/ou passifs de refroidissement d'urgence du cœur du réacteur et des équipements supplémentaires comme « Core Catcher »¹. Ainsi, même les répercussions de défaillances graves demeurent, avec la plus grande probabilité, internes à l'installation. Des mesures pour la protection en cas d'urgence externe à l'installation ne sont prévues que pour des défaillances hors dimensionnement extrêmement invraisemblables avec une possible émission de substances radioactives dans l'environnement présentant un risque pour la population au sens de l'Ordonnance sur la radioprotection ORaP [4] et/ou l'atteinte d'une valeur d'intervention selon le concept CMD.

Jusqu'au choix définitif de la conception spécifique à l'installation par la requérante de l'autorisation, les déroulements de défaillances éventuelles ne peuvent être appréciés qu'au plan qualitatif. Une analyse détaillée de défaillances graves, y compris de leurs répercussions éventuelles sur le voisinage de la centrale nucléaire et de la population résidente, ne pourra donc être réalisée qu'à une date ultérieure, à savoir dans le cadre de la demande de permis de construire. Si cette analyse révèle des déroulements de défaillances pouvant entraîner le dépassement des valeurs d'intervention selon le concept CMD, de sorte que des mesures de protection correspondantes selon le concept CMD s'avèrent nécessaires, la requérante devra en discuter avec les organes compétents de la Confédération, du Canton de Berne et des communes voisines avant la mise en service de l'installation.

¹ Équipement destiné à saisir / maîtriser une éventuelle fusion du cœur du réacteur

Concernant le niveau de prévoyance des mesures de protection citées dans le concept CMD, il convient de retenir ceci :

- I. Ordonner le *séjour dans la maison* pour les groupes sensibles de la population (enfants, jeunes, femmes enceintes) : pour ces groupes sensibles de la population, il faut prévoir un séjour à la maison. Cette mesure peut être communiquée rapidement par la radio et ne requiert aucune autre mesure d'accompagnement (aucun blocage des accès, pas de déviations routières, etc.). La population concernée par cette mesure peut faire usage des infrastructures existantes. Pour le reste de la population, il n'est pas nécessaire de prendre des mesures à titre individuel.
- II. Ordonner le *séjour dans la maison / à la cave / dans l'abri* : lorsque cette mesure est ordonnée, la population concernée par cette mesure peut faire usage des infrastructures existantes. Dans un bâtiment, la meilleure protection est garantie dans les pièces intérieures ou au sous-sol (cave / abri). Conformément à la Loi fédérale sur la protection de la population et sur la protection civile (LPPCi [83]) , chaque habitant et habitante doit disposer d'une place protégée dans un abri situé à proximité de son lieu d'habitation et atteignable dans un délai raisonnable (dans sa propre maison ou sinon dans des abris publics). D'un point de vue actuel, la possibilité d'utiliser des abris publics en cas d'urgence dans une installation nucléaire suisse paraît très limitée. Mettre des abris publics à disposition, et les équiper complètement, prendrait en effet trop de temps, notamment dans le domaine de l'encadrement, et solliciterait des ressources logistiques et en personnel qui ne sont absolument pas disponibles en cas de défaillance dans une centrale nucléaire. En revanche, l'Exécutif communal peut ouvrir les abris publics aux habitants et habitantes n'ayant sinon aucune autre protection possible ou qui se trouvent dans un bâtiment public. Il n'y aurait alors pas d'occupation d'abri à proprement parler. La mesure du *séjour dans la maison / à la cave / dans l'abri* est également rapidement communicable par la radio et facilement réalisable. Étant donné que l'on peut supposer qu'il y aura des évacuations et des mouvements de fuite spontanés, une mesure d'accompagnement comme la gestion de la circulation (déviations routières, etc.) est nécessaire.
- III. Ordonner l'*ingestion de tablettes d'iode* conformément à l'Ordonnance fédérale sur les comprimés d'iode [84] , laquelle régit l'approvisionnement à titre préventif de la population en comprimés renfermant un sel d'iode dans les zones 1 et 2 à proximité d'une installation nucléaire (remise à tous les ménages ainsi qu'aux responsables des entreprises, des écoles, des foyers pour personnes âgées ainsi que d'autres institutions publiques). De plus, une remise permanente de tels comprimés est garantie par le biais des pharmacies et des drogueries dans les zones 1 et 2. Ainsi, si cette ordonnance est édictée, chaque individu se situant dans les zones 1 et 2 pourra recourir immédiatement aux mesures de précaution existantes. Des tablettes d'iode sont également disponibles pour la zone 3 (éloignée). Les cantons doivent assurer une distribution décentralisée adéquate. Dans l'éventualité d'un incident majeur en zone 3, il est prévu une remise des comprimés à la population dans un délai de douze heures suivant l'ordre de distribution.
- IV. *Restrictions de la consommation d'aliments* : la législation suisse sur les denrées alimentaires définit déjà, à chaque instant, les valeurs limites et de tolérance pour les diverses denrées alimentaires et les radionucléides les concernant [95]. En outre, le Conseil fédéral a la

possibilité de fixer des valeurs limites adaptées à l'événement et s'appuyant sur la protection de la santé¹. En cas de défaillance avec émission de radioactivité, des plans de prélèvement par échantillonnage conformes aux concepts existants sont remis par la Confédération aux autorités compétentes.

V. *Évacuation préventive* : le concept d'évacuation préventive (temporaire) de la population doit être encore élaboré par le Canton de Berne² pour la zone 1 de l'EKKM en s'appuyant sur les réflexions suivantes :

- a L'évacuation préventive est une option prévue pour les cas de défaillances qui, au vu du laps de temps à disposition, laisse une plage de temps suffisamment grande pour ordonner et exécuter, mais comprend en même temps le potentiel d'une émission considérable de substances radioactives, avec laquelle un séjour protégé dans la maison / à la cave / dans l'abri est insuffisant. De la même façon, l'on peut prendre en compte une évacuation préventive lorsqu'un séjour protégé dans la maison / à la cave / dans l'abri s'avère impossible plus longtemps ou ne saurait être exigé des personnes concernées. La zone d'évacuation se limite au voisinage de l'installation (zone 1 EKKM) et concerne donc une population d'environ 2500 personnes (voir chap. 3.1.2.1). Il n'est question en aucun cas de prendre des mesures contraignantes, étant donné que la liberté individuelle et la responsabilité propre prévalent sur l'application de mesures décidées par les organes de conduite. Il faut garantir, par le biais d'une information franche et transparente, que les personnes concernées puissent estimer à tout instant les conséquences de leur propre comportement.
- b En cas d'évacuation préventive, l'on ne disposera jamais du temps nécessaire pour mettre à disposition les infrastructures de transport requises. Comme pour d'autres concepts d'évacuation (p. ex. événements majeurs chimiques), le concept d'évacuation doit s'appuyer, en premier lieu, sur les propres moyens. Il sera ainsi demandé à la population concernée d'évacuer aussi rapidement que possible la zone de danger et par ses propres moyens. Les mesures de l'organe de conduite compétent se limitent à aider les habitants et habitantes stationnaires ou des groupes cibles particuliers (écoles, EMS, etc.), par exemple en organisant un bus navette devant se rendre à des points de ramassage désignés et prendre en charge toutes les personnes qui ne peuvent pas s'éloigner de la zone dangereuse par leurs propres forces.
- c Les mesures de l'organe de conduite cantonal se concentreraient sur une évacuation préventive, à une information transparente et régulière ainsi qu'à la gestion de la circulation. En périphérie de la zone 1, l'on mettrait ainsi en place des postes de barrage et des déviations, afin d'éviter toute gêne dans l'évacuation de la zone 1 et d'indiquer la menace de danger dans le périmètre de la centrale. Des avis d'état du trafic renseignent sur les embouteillages et les gênes ainsi que sur les possibilités de déviations éventuelles. Dans le même temps, l'on désigne des centres d'hébergement de secours, préparés pour la population de la zone 1 EKKM. Afin que cette dernière puisse quitter la zone 1

¹ Art. 18 LRaP

² En zone 1, la population transitoire est négligeable en comparaison avec la population résidente (cf. chap.xx) ; l'on peut donc ici parler d'habitants au lieu de population.

rapidement et sans encombrement, une « gestion de la circulation » efficace serait aussi nécessaire dans le sens d'une aide organisationnelle. Cela pourrait signifier que l'autoroute A1, qui traverse la zone 1, soit interdit d'accès entre l'échangeur de Weyermannshaus et la sortie de Kerzers (Chiètres) en ce qui concerne le trafic de transit venant de l'extérieur, afin de disposer d'un axe de sauvetage et d'évacuation rapide et performant ; des indications sur tout autre voie d'évacuation (y compris des lieux de séjour et/ou de rassemblement potentiels) constitueraient d'autres parties intégrantes de la gestion de la circulation. Le premier point de rassemblement pourrait être ainsi, par exemple, le centre d'achat « Westside », qui offre suffisamment de places de stationnement et d'autres infrastructures pour le séjour temporaire de personnes cherchant une protection.

- d Une estimation sommaire du potentiel de personnes ayant besoin d'assistance et devant être évacuées par des moyens cantonaux indique environ 250 personnes au maximum, soit 10% de la population résidente. La part du lion est formée par les pensionnaires des établissements médico-sociaux pour personnes âgées (EMS) dans la zone 1 ainsi que par les élèves isolés des quatre écoles locales. En revanche, dans le cas de l'EKKM, aucun hôpital n'est concerné. Comme moyens de transport, l'on dispose ici de cars postaux (à partir de la gare routière de Berne) ou d'une entreprise de cars de tourisme.
- e L'exploitation de centres d'hébergement d'urgence pourrait être confiée à la Protection civile. Étant donné que les moyens à disposition des formations cantonales ne suffisent pas, il faudrait responsabiliser les organisations de protection civile régionales. Eu égard à l'évacuation en direction de l'ouest, le Canton de Berne et le Canton de Fribourg devraient s'entendre sur une solution commune.

D'un point de vue actuel, et compte tenu des principes susmentionnés, une évacuation préventive devrait être réalisable dans un laps de temps de 4 à 6 heures. Le Canton de Berne établira à l'avenir un concept d'évacuation détaillé réglementant l'évacuation sur la base même de ces principes ainsi que des accords de prestations éventuels.

La Centrale nationale d'alarme (CENAL) est compétente pour ordonner les mesures de protection dans le voisinage d'installations nucléaires, et ce, jusqu'à ce que le « Comité directeur radioactivité » (CODRA, cf. [82]) ait mis en place sa capacité d'intervention opérationnelle et que le Conseil fédéral soit en mesure, en qualité d'autorité suprême, d'ordonner d'autres mesures de protection et de prendre des décisions. Des mesures à prendre au cours de ladite « phase sol » et/ou au-delà de la période de prévision ne font donc pas partie du concept de protection d'urgence prédéfini par la Confédération et les cantons, mais doivent être au contraire fixées et exécutées sur place face à la situation réelle.

2.6.5 Appréciation succincte

En règle générale, la protection de l'exploitation en cas d'urgence est très bien établie en Suisse. Elle s'appuie sur des exigences légales et fixées par les autorités ainsi que mises en œuvre dans le cadre de concepts fiables¹.

La protection en cas d'urgence s'appuie, en premier lieu, sur la mise en œuvre systématique dudit « concept de défense en profondeur » (Defense in Depth), par lequel les répercussions de défaillances, même graves, peuvent être limitées avec la plus forte probabilité à l'installation elle-même. Les mesures de la protection en cas d'urgence externe ne seraient donc à prendre que dans un cas extrêmement invraisemblable, mais sont toutefois facilement réalisables. La mise en œuvre aura lieu également à l'avenir en coopération avec les organes compétents de la Confédération, du Canton de Berne et des communes. Le futur concept d'évacuation du Canton de Berne devrait être établi en harmonie avec les conditions-cadre décrites ci-avant. L'analyse détaillée de défaillances graves ainsi que leurs répercussions possibles sur le voisinage de l'installation nucléaire et la population résidente seront documentées dans la demande de permis de construire, de même que les mesures de protection à prendre le cas échéant. Compte tenu du peu de population aux alentours de l'EKKM, les problèmes de mise en œuvre de ces mesures, même sous une certaine pression du temps, se maintiennent dans des limites raisonnables.

Les organisations d'intervention en cas d'urgence, ainsi que les états-majors correspondants des installations nucléaires déjà existantes, sont depuis longtemps en fonction et mis à l'épreuve régulièrement dans le cadre d'exercices d'alerte réguliers locaux, nationaux et internationaux². Ils fournissent de manière compétente et en temps utile les indications nécessaires à la CENAL (appréciation de la situation, évolution probable de la défaillance, etc.), destinées à la prise de décisions quant à des mesures éventuelles.

La planification d'urgence pour l'EKKM sera conçue de la même manière que pour la centrale KKM voisine. L'organisation en cas d'urgence de l'EKKM sera ainsi ancrée dans un réseau organisationnel déjà établi. L'expérience acquise durant de longues années avec la centrale KKM quant au développement, à la conception et à la mise en œuvre de la réglementation en cas d'urgence peut être exploitée de manière optimale et adaptée aux circonstances là où cela s'avère nécessaire. Vu la faible population locale, et la croissance démographique modérée au voisinage de la future centrale 3.1.2), l'on ne s'attend pas à des difficultés à long terme pour la planification d'urgence en ce qui concerne les mesures présentées de la protection d'urgence externe. L'on peut donc dès aujourd'hui partir du principe que la mise en œuvre pratique des mesures de protection en cas d'urgence aura lieu en harmonie avec les recommandations de l'AIEA³.

¹ Cf. p. ex. les recommandations et concepts de la ComABC (Commission fédérale pour la protection ABC, www.komabc.ch)

² Cf. directive DSN B-11

³ Cf. Agence internationale de l'énergie atomique AIEA (International Atomic Energy Agency) : Safety Guide NS-G-3.2 (chap. 6)

2.7 Classification des systèmes, structures et composants

Les ouvrages, systèmes et équipements d'une installation nucléaire sont classifiés en fonction de leur importance pour la sécurité nucléaire en classes de sécurité, en classes de structures nucléaires et en classes sismiques. Les critères de classification des systèmes, structures et composants importants pour la sécurité nucléaire sont fixées par la loi¹ et précisées encore dans des exigences² promulguées par les autorités de sûreté. Les critères tiennent compte de l'importance des équipements pour maîtriser des cas de défaillances, respecter les objectifs en matière de protection et les valeurs limites de dose prescrites.

La preuve du respect de toutes ces exigences ainsi que la classification des équipements et systèmes importants sur le plan de la sécurité nucléaire seront fournies dans le cadre de la demande de permis de construire.

2.8 Gestion de la qualité (GQ)

2.8.1 GQ pour la viabilité du site et la demande d'autorisation générale

Lors de toutes les recherches et travaux réalisés dans le cadre de la viabilité du site et de l'élaboration des documents pour la présentation de la demande d'autorisation générale, les exigences et/ou les attentes de qualité de la requérante et/ou des autorités et services publics ont toujours été au premier plan. Pour ces travaux, l'on a constitué un groupe de projet composé de spécialistes hautement qualifiés avec, en partie, une grande expérience de la technique nucléaire. Ce groupe a été soutenu par des spécialistes expérimentés des maisons-mères et/ou des installations nucléaires existantes des maisons-mères ainsi que par des experts reconnus. Une assurance de la qualité (AQ) a été mise en place, afin de garantir le respect des exigences des destinataires (ainsi que les exigences relatives aux délais et aux coûts).

Selon l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu³ l'introduction d'un programme de GQ est prévu pour le projet d'étude des nouvelles installations. Celle-ci prévoit les éléments suivants :

- Définition des déroulements et processus
- Spécifications des exigences pour les divers contrôles et tâches (étendue, intensité, résultats demandés) et les exécutants (qualification, expérience)
- Fixation des responsabilités (exécution, contrôle et décision)
- Définition du rôle des unités organisationnelles concernant les tâches et responsabilités.

¹ Appendice 4 OENu

² Directives DSN R-04, R-06, R-35 (appendice 1) et R-46 (appendice 3)

³ Art. 25 OENu [2]

Plusieurs intervenants externes (fournisseurs, experts) seront impliqués dans le projet d'étude, raison pour laquelle les thèmes y afférant tels que l'évaluation des qualifications des entreprises externes, les interfaces entre la requérante et les entreprises externes ainsi que le contrôle de qualité des travaux externes effectués représentent une part importante du futur programme GQ.

Bien que ce programme GQ ne soit pour l'instant pas encore en vigueur, les processus importants AQ ont été intégrés dans les travaux relatifs à la demande d'autorisation générale. Un plan AQ a particulièrement été élaboré avec les éléments suivants :

- Plan pour le contrôle des travaux et/ou des documents, la forme ainsi que l'étendue et l'intensité du contrôle sont différentes, cela sera fixé au cas par cas (p. ex. selon l'importance de la sécurité)
 - Review (processus formel, interne ou externe, résultats des contrôles et mesures qui en découlent / les solutions seront documentées)
 - Contrôle informel et/ou « walk-through », c.-à-d. communication directe entre les responsables des documents et les experts (retour direct dans le travail, aucune remise de documentation, les résultats du contrôle et leur mise en application doivent cependant être traçables)
 - Desk-Check, c'est-à-dire contrôle informel (sans documentation) selon le principe des quatre yeux
- Évaluation de la qualification des offreurs externes et de leur contrôle de qualité avant l'adjudication des travaux
- Désignation du responsable AQ, lequel est compétent pour l'application des mesures AQ citées ci-dessus
- Désignation des méthodes décisionnelles (mise en application des résultats de contrôle lors de désaccords / contradictions, homologation des travaux et/ou des documents).

Les travaux fournis dans le cadre de l'élaboration de la demande d'autorisation générale étaient soumis à ce plan AQ, lequel, dans le cadre du contrôle de qualité des documents de la demande d'autorisation générale a été soumis à l'audit d'une société externe accréditée.

Les experts / entreprises externes qui ont pu être acquises en qualité de soutien externe, ont effectué leur travail dans le cadre de leur propre assurance-qualité.

2.8.2 GQ pour le projet d'étude, la construction, l'exploitation et la désaffectation

Les activités durant le projet d'étude se dérouleront (comme mentionné au chap.2.8.1) selon les exigences de l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu dans le cadre d'un programme GQ, afin que la qualité nécessaire des produits, processus et prestations soit garantie. Cela sera également le cas lors de la phase de construction, la phase d'exploitation et la phase de désaffectation.¹

Les programmes GQ seront développés et élaborés sur la base des normes internationales telle la norme européenne EN ISO-9000 ou le concept de Total Quality Management (TQM). Par ailleurs, les standards de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)² serviront de base dans le développement des programmes GQ.

Dans ces programmes GQ, la qualité exigée ainsi que les objectifs de sécurité seront sollicités pour toutes les activités qui devront être effectuées par les personnes ou les unités organisationnelles correspondantes. Le développement de ces programmes GQ est donc étroitement lié au développement de l'organisation et/ou au développement de programmes pour la prise en compte des facteurs humains et organisationnels (Human and Organisational Factors, HOF) tel que décrit au chap. 5.

Les documents pour le programme GQ seront remis pour la première fois dans le cadre de la demande de permis de construire³.

1 Art. 25, art. 30, art. 45, let. h OENu [2]

2 IAEA Safety Requirements « The Management System for Facilities and Activities », GS-R-3 ainsi que les normes y afférentes, par exemple : IAEA Safety Guide « Application of the Management System for Facilities and Activities », GS-G-3.1

3 Art. 24, al. 2 let. d OENu [2]

3 Caractéristiques du site

Ce chapitre comprend la description des données les plus importantes sur l'adéquation du site. Cela correspond aux exigences légales pour la présentation des caractéristiques du site¹ et se base aussi sur les normes de l'Agence internationale de l'énergie atomique AIEA [110].

3.1 Géographie et population

3.1.1 Géographie

3.1.1.1 Généralités

Le site de l'EKKM se trouve dans la vallée de l'Aar, à env. 12 km à l'ouest de Berne, dans la zone agricole de Niederruntigen sur le territoire de la commune de Mühleberg, dans le canton de Berne. Les coordonnées de la situation approximative du bâtiment du réacteur (coordonnées topographiques) sont E 587800/N 202400. La distance la plus courte avec les autres cantons est pour le canton de Fribourg env. 3 km jusqu'au territoire de la commune de Chiètres, pour le canton de Soleure env. 16 km jusqu'au territoire de la commune de Schnottwil, pour le canton de Vaud env. 16 km jusqu'au territoire de la commune de Faoug et pour le canton de Neuchâtel env. 18 km jusqu'au territoire de la commune du Landeron. Sur le plan national, le site se trouve dans une situation centrale, de sorte que les distances avec les États voisins sont relativement importantes. La distance la plus courte avec la France est d'environ 38 km jusqu'au département du Doubs. La commune allemande la plus proche, Wyhlen dans l'État du Baden-Württemberg, se situe à env. 70 km, alors que la province italienne la plus proche, Verbano-Cusio-Ossola, se situe à env. 100 km au sud-est. L'Autriche est à plus de 170 km.

3.1.1.2 Site et abords immédiats

Le site se trouve dans le Mittelland suisse, lequel est limité au nord par le Jura et au sud par les Alpes. Durant l'ère tertiaire, un bassin s'est formé au nord des Alpes actuelles, dans lequel se sont sédimentés les matériaux érodés de l'espace alpin dans diverses conditions de dépôt ; ces sédiments sont qualifiés de molasse. Poussé par le soulèvement des Alpes vers la fin du tertiaire, le Jura a été plissé et surélevé par rapport au Mittelland. Sur le site, la molasse d'eau douce inférieure forme le socle rocheux actuel et atteint des épaisseurs de couches d'env. 2000 m au-dessus des paquets de strates mésozoïques. Dans les environs du site, la molasse est en couches pratiquement horizontales, elle est tectoniquement très peu influencée. Au quaternaire, dans une suite de plusieurs ères glaciaires et interglaciaires, la surface de la molasse a été modelée. Durant l'ère glaciaire, les glaciers de l'Aar et du Rhône se sont rencontrés près du site et ont poussé jusqu'au pied du Jura où ils ont déposé des sédiments de rochers isolés sous forme de moraines et de gravier fluvio-glaciaires. En ce temps, le glacier du Rhône charriait des matériaux à haute teneur cristalline, alors que le glacier de l'Aar charriait pour sa part des matériaux à forte teneur calcaire. Durant l'ère glaciaire, les vallées ont continué à se séparer en surface, notamment dans les secteurs périglaciaires. Durant les ères glaciaires suivantes, les vallées ont à nouveau été partiellement remplies de gravier. Ainsi, lors de la dernière ère glaciaire, la vallée de l'Aar, qui

¹ Cf. art. 23, let. a, ch. 1 LENu [2]

s'étendait à l'origine de Berne vers le nord, a été bloquée et l'Aar s'est frayé un chemin épigénétique dans une nouvelle vallée vers l'ouest pour atteindre son cours actuel. Aux environs du site, plusieurs affleurements semblables à des parois de molasse d'eau douce témoignent de la coupure intensive. La vallée de l'Aar est par endroit très étroite du fait que l'Aar n'a pas encore eu beaucoup de temps pour élargir la vallée. Pour la même raison, le gravier au bas de la vallée n'est pas très épais. La géologie et la tectonique du site sont traitées au chapitre 3.5.

Sur ces masses de roche de départ à forte teneur en calcaire de la terre brune s'est formée durant l'ère holocène aux alentours du site jusqu'à l'horizon cendreuse du podzol. Dans les couches de barrage, celle-ci peut présenter une transformation en gley. Dans le Mittelland, une forêt mixte de feuillus s'étend comme végétation naturelle. Aux environs du site, l'on trouve avant tout des forêts de hêtres proches de l'état naturel et exploitées par l'économie forestière.

À la limite ouest du site se trouve l'actuelle centrale nucléaire de Mühleberg, à l'est du site se trouve le poste de commutation de Mühleberg Est, au sud-est se trouve la cité ouvrière du Chräjeberg. Les plus importantes constructions sur l'aire du site sont le poste de commutation Ouest et le poste de commande du réseau des FMB. Le reste de l'aire est exploité à des fins agricoles. Les surfaces agricoles sont des champs, des pâturages et des prairies. Un verger se trouve entre le poste de commutation de Mühleberg Ouest et le poste de commande central. Au sud-est du site, l'on trouve le versant couvert des forêts d'Aumeister-Buchenwald. Le site se trouve sur la rive gauche de l'Aar. Celui-ci s'écoule à l'ouest de Berne dans une vallée étroite en partie fortement encaissée, ce qui a formé des méandres. Vu sous une plus grande perspective, le site est entouré par un tel méandre, la vallée et l'Aar passent vers la centrale hydroélectrique en direction sud-nord, pour atteindre une direction est-ouest à la hauteur du poste de commande central, puis l'Aar s'écoule du nord-est en direction du sud-ouest vers l'actuelle centrale nucléaire de Mühleberg où se rejoint le prochain méandre. Le méandre de l'Aar s'est tellement creusé vers le site, qu'une terrasse s'est formée sur le versant de glissement où a été installé le poste de commande central à env. 485m. Vers l'ouest, la terrasse est plate jusqu'au niveau du fond de la vallée, alors que vers le nord et l'est s'est formée une marche de terrasse pentue jusqu'à près de 15 m de haut.

La différence d'altitude entre le fond de la vallée et les flancs est de 100 m. Alors que le fond de la vallée de l'Aar se situe vers 465-467 m, les flancs atteignent une altitude de 560 m vers Salvisberg et 580 m vers Oberruntigen. À une distance du site un peu plus importante au sud, l'on atteint au Lediflue et au Stockeren 700 m, alors qu'à 4 km au nord du site à Seienbergwald et Frienisberg l'altitude peut atteindre 800 m. À 2 km à l'ouest du site, en direction nord-sud, s'étend la vallée de la Singine, dans laquelle débouche la vallée de l'Aar. Contrairement aux conditions hydrologiques actuelles, morphologiquement la vallée de l'Aar est à considérer comme une vallée latérale de la vallée de la Singine, la Singine ayant pu éroder une vallée nettement plus large. La vallée de l'Aar au-dessus de l'embouchure de la Singine présente plusieurs endroits étroits. Sur l'un d'eux fut construite en 1917-1920 la centrale hydroélectrique de Mühleberg, laquelle accumule le lac de Wohlen long de 10 km. Le site se trouve à env. 1.3 km au-dessous de la digue. 4 kilomètres plus loin, vers l'ouest et au-delà de la vallée de la Saane, l'on trouve un paysage de collines au même niveau que le Grand Marais. Ici commence le Seeland. Cette région est intensivement utilisée pour la culture maraîchère.

3.1.1.3 Climat

Le climat du site correspond au climat Cfb de la classification Köppen-Geiger [67]. Cela signifie qu'il est humide toute l'année et que la température moyenne du mois le plus froid se situe au-dessus de -3 °C, alors que le mois le plus chaud reste en dessous de 22 °C. Mühleberg fait encore partie du Mittelland, lequel reçoit moins de précipitations par an en raison de sa situation sous le vent derrière le Jura.

Pour des indications plus précises sur la météorologie du site, se reporter au chapitre 3.3.

3.1.2 Population

3.1.2.1 Répartition

Le Tableau 3.1-1 suivant indique le nombre d'habitants (état au 31.12.2007) de quelques-unes des plus importantes zones à forte concentration urbaine dans un rayon de 20 km autour du site. La plus grande zone à forte concentration urbaine à proximité du site est Berne, dont les secteurs ouest, les moins densément peuplés près de Riedbach, se trouvent à au moins 4.2 km du site. Les premiers centres urbains de Berne, Bethlehem et Bümpliz, se situent à plus de 8 km du site, alors que la Vieille Ville de Berne est éloignée d'env. 14 km.

Tableau 3.1-1 : Nombre d'habitant des plus importantes zones à forte concentration urbaine dans les environs du site (Source : Office fédéral de la statistique)

Agglomération	Nombre d'habitants 2007	Distance moyenne du site
Mühleberg	2 664	2.3 km
Wohlen près de Bern	8 992	7 km
Lyss	11 240	12 km
Köniz	37 448	12 km
Bern	122 658	12 km
Muri près de Bern	12 526	17 km
Bolligen avec Ittigen et Ostermundigen	31 671	17 km
Biel/Bienne	49 353	19 km

Un aperçu complet de la répartition de la population dans un rayon de 20 km figure dans le Tableau 3.1-2. Il s'y trouve la répartition de la population des communes qui se situent entièrement ou partiellement dans la zone 1 (rayon = 2.8 km), ainsi que la répartition de la population des communes en zone 2 dans un rayon de 20 km (basée sur les recensements de la population de 1990 et 2000 et les comptages annuels de 2003 et 2007). Les limites extérieures des communes du cercle de 20 km se basent ici sur les limites de secteurs du document « plans de zones pour la planification d'urgence », comme elles ont été fixées pour la dernière fois en septembre 2008 par la DSN [59]. Il est préalablement possible ici de se baser sur les plans de zones développés pour la KKM, étant donné que les installations KKM et EKKM sont distantes de moins de cent mètres l'une de l'autre. Une adaptation des plans de zones sera entreprise plus tard (cf. chap.2.6).

Sont situés entièrement ou partiellement en zone 1 les territoires des communes de Radelfingen, Seedorf, Wohlen, Ferenbalm, Golaten, Mühleberg et Wileroltigen. Les lotissements ou fermes isolées qui se situent réellement en zone 1 sont également indiqués dans le Tableau 3.1-2, en tant que quartiers de la commune. Les zones dans les environs proches du site ne sont pas densément peuplées ; la densité de la population des communes concernées par la zone 1 se situe entre 82 habitants/km² (Radelfingen) et 248 habitants/km² (Wohlen). En même temps, seulement 84 habitants de la commune de Wohlen résident en zone 1, son centre urbain se situant à 6 km du site. Mühleberg a une densité de population de 101 habitants/km², Wileroltigen 99 habitants/km², et Golaten 110 habitants/km². La densité moyenne de la population en Suisse est actuellement de 184 habitants/km² et se situe ainsi, malgré les grandes zones non habitées dans les Alpes, au-dessus de la densité de population des environs directs du site. En fait, le Mittelland est la partie de la Suisse la plus densifiée. Il faut aussi relever, lorsque l'on considère la densité de population des communes dans les zones 1 et 2, qu'elle s'élève à 443 habitants/km². Sur les 556 902 habitants dans ces zones, la part seule des communes situées dans l'agglomération de Berne, Berne incluse, avec ses 291 193 habitants en constitue plus de la moitié. En comparaison avec le Mittelland, les environs directs du site peuvent en conséquence être qualifiés de zones à faible densité.

Tableau 3.1-2 : Répartition de la population des communes dans la zone 1 (R=2.8 km) et dans la zone 2 (R=20 km) pour les années 1990, 2000, 2003 et 2007, avec une classification des zones 2003

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾							Terr. comm. en km ²	Densité de population Habitants /km²
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2			
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs¹		
BERNE	927497	943696	951957	962982	2484	429970			
District d'Aarberg	29530	32813	33346	33908	205	33141			
Aarberg	3353	3811	3946	3945		3946	5.6	7.92	498
Bargen	826	906	929	952		929	5.6	7.88	121
Grossaffoltern	2388	2791	2803	2809		2803	1.5,6	15.07	186
Kallnach	1273	1496	1533	1492		1533	4.5,6	10.64	140
Kappelen	870	1017	1093	1145		1093	5.6	10.92	105
Lyss	9601	10641	10875	11240		10875	5.6	11.78	954
Meikirch	2162	2469	2435	2388		2435	1.6	10.25	233
Niederried	242	273	275	288		275	4.5,6	4.54	64
Radelfingen	1199	1207	1229	1208		1027	1.2,3,4,5,6	14.73	82
Talmatt									
Oberruntigen									
Oltigen					202				
Ostermanigen									
Matzwil									
École de Matzwil									
Rapperswil	1915	2016	2063	2133		2063	1.6	18.20	117
Schüpfen	2665	3266	3248	3329		3248	1.6	19.82	168
Seedorf	2939	2920	2917	2979		2914	1.5,6	20.92	142
Trümlen					3				

¹⁾ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Dist. de Bern	246010	237090	237440	238069	84	232652			
Berne	134629	122484	122299	122658		122299	1.2	51.61	2377
Bolligen	6205	6000	6123	6117		6123	1.2	16.56	369
Bremgarten	3687	3784	3809	3956		3809	1.2	1.90	2088
Ittigen	11043	10997	10793	10688		10793	1.2	4.21	2539
Kirchlindach	2547	2682	2594	2714		2594	1.6	11.94	227
Köniz	36101	37196	37134	37448		37134	1.2	51.05	734
Muri	12821	12477	12428	12526		12428	1.2	7.64	1640
Oberbalm	851	856	883	897		883	1.2	12.38	72
Ostermundigen	16457	15202	15285	14866		15285	1.2	5.96	2494
Stettlen	2849	2817	2854	2847		2854	1.2	3.54	805
Wohlen	9101	8912	9137	8992		9053	1.2,6	36.26	248
Salvisberg									
Wickacher									
Mülital					84				
Hostetmatt									
Eymatt									
Zollikofen	8830	9188	9397	9682		9397	1.6	5.40	1793
Dist. de Biel/Bienne	52697	51209	50867	51707		50867			
Biel / Bienne	52670	48840	48524	49353		48524	5.6	21.24	2324
Leubringen / Evillard	2283	2369	2343	2354		2343	5.6	3.66	643
Dist. de Büren	211552	21807	21882	22226		5524			
Büetigen	601	691	779	803		779	5.6	3.62	222

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Busswil	1812	1877	1930	1949		1930	5.6	3.06	637
Diessbach	755	837	839	854		839	5.6	6.30	136
Dotzigen	1287	1356	1340	1345		1340	5.6	4.22	319
Meienried	62	63	59	50		59	5.6	0.67	75
Wengi	480	548	577	610		577	1.6	7.07	86
District de Erlach	9385	9980	10359	10734		10359			
Erlach	1067	1090	1091	1132		1091	4.5	3.48	325
Brüttelen	554	590	619	592		619	4.5	6.62	89
Finsterhennen	401	419	435	480		435	4.5	3.57	135
Gals	618	651	669	698		669	4.5	7.89	89
Gampelen	811	704	746	750		746	4.5	10.82	69
Ins	2715	2760	2877	3046		2877	4.5	23.88	128
Lüscherz	421	493	532	535		532	4.5	5.45	98
Müntschemier	1006	1099	1144	1266		1144	4.5	4.88	259
Siselen	586	614	608	591		608	4.5	5.53	107
Treiten	376	400	420	413		420	4.5	4.75	87
Tschugg	572	427	447	419		447	4.5	3.31	127
Vinelz	666	733	771	812		771	4.5	4.60	177
District de Fraubrunnen	35087	36769	37749	38895		19954			
Ballmoos	59	58	58	55		58	1.6	1.46	38
Bangerten	143	162	163	154		163	1.6	2.20	70
Deisswil	89	83	80	93		80	1.6	2.14	43
Diemerswil	171	171	182	204		182	1.6	2.84	72
Iffwil	309	425	398	411		398	1.6	5.05	81

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Moosseedorf	3429	3508	3455	3554		3455	1.6	6.34	561
Münchenbuch- see	8948	9197	9678	9603		9678	1.6	8.86	1084
Scheunen	71	60	71	70		71	1.6	2.19	32
Urtenen	5065	5177	5268	5450		5268	1.6	7.17	760
Wiggiswil	93	88	95	105		95	1.6	1.43	73
Zuzwil	494	462	506	515		506	1.6	3.47	148
District de Laupen	13460	14172	14239	14482	2195	12044			
Laupen	2495	2727	2694	2777		2694	2.3,4	4.10	677
Clavaleyres	56	56	54	50		54	3.4	1.00	50
Ferenbalm	1088	1271	1282	1252		1267	2.3,4,5	9.21	136
Haselhof					15				
Frauenkap- pelen	1072	1281	1269	1270		1269	1.2,6	9.28	137
Golaten	287	354	305	307	305			2.79	110
Gurbrü	233	252	247	267		247	3.4,5	1.84	146
Kriechenwil	451	414	403	398		403	2.3,4	4.76	84
Mühleberg	2794	2742	2707	2664		1233	1.2,3,4,5,6	26.27	101
Stauwehr									
Chräjeberg									
Uf em Horn									
Buttenried									
Oberei									
Teuftal									
Heggidorn									

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune			Nombre d'habitants ¹⁾						
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Mühleberg									
Steinriesel									
Buech						1474			
Allenlütten									
Mauss									
Stägenrain									
Strassacher									
Dälebach									
Gäu									
Gross Mühleberg									
Marfeldingen									
Rewag									
Münchenwiler	378	426	423	409		423	3.4	2.49	165
Neuenegg	4173	4282	4439	4678		4439	2.3	21.92	213
Wileroltigen	281	367	401	410	401			4.14	99
District de La Neuveville	5224	5792	6083	6140		4314			
La Neuveville	3238	3206	3420	3457		3420	4.5	6.82	507
Prêles	736	851	894	867		894	4.5	6.99	124
Amt Nidau	37747	38296	39501	40728		37734			
Nidau	7316	6578	6910	6652		6910	5.6	1.52	4376
Aegerten	1777	1672	1693	1656		1693	5.6	2.17	765
Bellmund	1035	1238	1310	1371		1310	5.6	3.81	360
Brügg	4235	3895	3904	3962		3904	5.6	5.00	792

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Bühl	362	386	378	421		378	5.6	2.98	141
Epsach	294	319	327	343		327	5.6	3.40	101
Hagneck	287	316	399	418		399	5.6	1.82	230
Hermrigen	252	270	260	264		260	5.6	3.44	77
Ipsach	2973	3272	3543	3747		3543	5.6	4.59	816
Jens	606	606	614	648		614	5.6	1.91	340
Ligerz	467	513	527	507		527	5.6	1.79	283
Merzligen	387	411	403	404		403	5.6	2.27	178
Mörigen	720	742	799	841		799	5.6	2.16	389
Orpund	2465	2489	2468	2620		2468	5.6	3.96	662
Port	2630	2802	2818	3206		2818	5.6	2.44	1314
Scheuren	353	423	446	452		446	5.6	2.10	215
Schwadernau	541	663	663	623		663	5.6	4.13	151
Studen	2293	2394	2477	2642		2477	5.6	2.71	975
Sutz-Lattrigen	935	1174	1212	1303		1212	5.6	3.61	361
Täuffelen	2400	2470	2462	2523		2462	5.6	4.40	573
Tüscherz- Alfermée	282	279	289	309		289	5.6	3.33	93
Twann	797	845	836	818		836	5.6	9.10	90
Walperswil	633	787	826	890		826	5.6	6.98	128
Worben	2082	1896	2170	2269		2170	5.6	2.80	812
District de Schwarzenburg	9394	9971	10089	10002		6756			
Albligen	435	479	474	465		474	2.3	4.29	109
Wahlern	5597	6124	6282	6227		6282	2.3	40.52	154

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Amt Seftigen	32839	34999	35777	36739		16625			
Belp	7945	8994	9360	9682		9360	1.2	17.60	550
Kehrsatz	3835	3579	3738	3840		3738	1.2	4.44	866
Niedermuhlern	506	525	529	538		529	1.2	7.23	74
Rüeggisberg	1866	1961	1927	1898		1927	1.2	35.73	53
Wald (BE) ²⁾	1171	1084	1071	1141		1071	1.2	13.28	86
FRIBOURG	206674	236339	246656	263241		93734			
District La Sarine	73187	80698	84144	89977		35942			
Fribourg	33913	31691	32849	33836		32849	3.4	9.31	3634
Granges- Paccot	1700	1990	2134	2322		2134	3.4	3.99	582
La Sonnaz ³⁾	560	836	859	959		859	3.4	6.90	139
District du Lac	22741	28085	29574	31497		29574			
Barberêche	498	550	563	526		563	3.4	9.15	57
Büchslen	118	161	162	162		162	3.4	1.58	103
Courgevaux	805	922	1045	1151		1045	3.4	3.39	340
Courlevon	225	258	273	283		273	3.4	3.27	87
Courtepin ⁴⁾	2152	2614	2821	2974		2821	3.4	4.07	731
Cressier (FR)	517	746	759	800		759	3.4	4.16	192
Fräschels	344	488	502	486		502	3.4	3.14	155
Galmiz	446	554	579	613		579	3.4	9.06	68
Gempenach	242	280	294	310		294	3.4	1.68	185
Greng	118	172	167	160		167	3.4	0.99	162
Gurmels ⁵⁾	2582	3361	3466	3762		3466	3.4	17.25	218

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Jeuss	236	352	413	417		413	3.4	1.78	235
Kerzers	3105	3813	4181	4416		4181	3.4	12.23	361
Kleinbösingén	355	521	558	570		558	2.3,4	3.01	189
Lurtigen	186	182	186	187		186	3.4	2.31	81
Meyriez	347	556	587	607		587	3.4	0.34	1812
Misery- Courtion ⁶⁾	1062	1239	1250	1331		1250	3.4	11.42	117
Muntelier	692	733	721	920		721	3.4	1.13	814
Murten	4668	5606	5618	5903		5618	3.4	12.03	491
Ried bei Kerzers ⁷⁾	703	846	815	937		815	3.4	7.58	124
Salvenach	346	422	455	488		455	3.4	3.83	128
Ulmiz	274	333	362	405		362	3.4	2.85	142
Villarepos	417	482	505	528		505	3.4	4.74	111
Bas-Vully	1148	1505	1729	1833		1729	3.4	9.95	184
Haut-Vully	829	1070	1171	1294		1171	3.4	7.58	171
Wallenried	326	319	392	434		392	3.4	3.87	112
District de la Singine	33663	38398	38969	39917		28218			
Alterswil	1656	1877	1895	1890		1895	2.3	16.10	117
Bösingen	2469	3139	3140	3254		3140	2.3	14.33	227
Düdingen	6298	6711	6970	7171		6970	2.3	30.80	233
Heitenried	933	1123	1144	1223		1144	2.3	9.09	135
Schmitten	2724	3301	3379	3566		3379	2.3	13.53	264
St. Antoni	1705	1957	1919	1935		1919	2.3	16.82	115
Tafers	2316	2500	2538	2659		2538	2.3	8.39	317

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants /km ²
Ueberstorf	1868	2138	2176	2323		2176	2.3	16.13	144
Wünnewil-Flamatt	4146	5005	5057	5104		5057	2.3	13.22	386
NEUCHÂTEL	159722	165731	167047	169782		12349			
District de Neuchâtel	49002	50395	50657	51991		12349			
Cornaux	1589	1482	1489	1495		1489	4	4.72	317
Cressier	1727	1917	1937	1906		1937	4.5	8.58	222
Le Landeron	3763	4229	4366	4318		4366	4	10.29	420
Marin-Epagnier	3883	3648	3924	4092		3924	4.5	3.37	1216
Thielle-Wavre	507	574	633	677		633	4	2.08	326
SOLEURE	229086	244015	246807	250240		2570			
District Bucheggberg	6304	7163	7193	7522		2570			
Balm bei Messen	91	113	114	102		114	1.6	2.17	47
Biezwil	249	290	306	320		306	1.6	4.18	77
Brunnenthal	147	193	207	194		207	1.6	0.90	217
Messen	686	973	992	1014		992	1.6	7.07	144
Schnottwil	752	947	951	1007		951	1.6	7.18	140
VAUD	577524	62094	639105	672039		6039			
District d'Avenches		31498	32246	33762		6039			
Avenches ⁸⁾	2540	2511	2522	2883		2522	3.4	17.55	164
Bellerive	472	538	573	598		573	3.4	2.24	268
Chabrey	167	201	213	240		213	3.4	3.95	61
Constantine	232	273	287	269		287	3.4	2.81	96

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

CANTON Secteur / Adm. /District Commune	Nombre d'habitants ¹⁾								
	Total	Total	Total	Total	en Zone 1	en Zone 2		Terr. comm.	Densité de population
	1990	2000	2003	2007	2003	2003	Secteurs ¹	en km ²	Habitants/ km ²
Cudrefin ⁹⁾	729	865	924	1053		924	3.4	15.84	66
Faoug	509	567	595	688		595	3.4	3.46	199
Montmagny	129	165	166	174		166	3.4	3.81	46
Mur	141	170	186	195		186	3.4	1.78	110
Oleyres	221	234	225	220		225	3.4	1.91	115
Vallamand	219	332	348	382		348	3.4	2.35	163
Villars-le-Grand	265	286	288	285		288	3.4	4.22	68
TOTAL	540061	539765	547319	556902	2484	544835			

Source : Office fédéral de la statistique (OFS)

- 1) population résidente permanente à la fin de l'année
- 2) depuis 2004 après la fusion des communes d'Englisberg et Zimmerwald
- 3) depuis 2004 après la fusion des communes de Cormagens, La Corbaz et Lossy Formangueries
- 4) depuis 2003 avec rattachement de Dourtaman
- 5) rattachement de Kleingurmels (2000), Liebistorf et Wallenbuch (2003) et Cordast (2005)
- 6) depuis 1997 après fusion des communes de Comérod, Courmillens, Courtion et Misery
- 7) depuis 2006 rattachement de Agriswil
- 8) depuis 2006 rattachement de Donatyre
- 9) depuis 2002 rattachement de Champmartin

3.1.2.2 Riverains les plus proches

Le lieu le plus proche avec une population résidente est Chräjeberg. Cette cité ouvrière a été créée par les Forces Motrices Bernoises pour le personnel de la centrale hydroélectrique et, plus tard, pour celui de la centrale nucléaire de Mühleberg et se situe à env. 300 m à l'est de l'EKKM (bâtiment du réacteur). À peu près à 500 m au sud du bâtiment du réacteur se trouve la cité ouvrière de Buttenried également créée par les Forces Motrices Bernoises. Au nord de l'EKKM, dans la commune de Radelfingen, se trouve la ferme inhabitée Talmatt qui est exploitée depuis le hameau d'Oberruntigen à une distance d'env. 500 m du bâtiment du réacteur. Weiler Salvisberg et Wickacker se trouvent chacune à une distance d'env. 800 m au nord-est du site de la commune de Wohlen. Le centre du village de Mühleberg se trouve approximativement à 1 600 m de la KKM actuelle et à peu près 2 300 m de la future EKKM. La localité d'Oberruntigen se situe à 1 km au nord du bâtiment du réacteur planifié. Les environs proches peuvent être qualifiés de faiblement peuplés, donc de densité faible.

¹ Les secteurs de danger sont définis dans les « Plans de zones pour la planification en cas d'urgence », cf. www.hsk.ch

3.1.2.3 Développement de la population aux environs du site

La répartition de la population à l'intérieur des zones 1 et 2 n'a pas connu de modifications importantes durant la période d'évaluation (1990-2007). Après une stagnation durant les années 1990, l'on constate ces dernières années, à nouveau, une croissance démographique.

Si l'on considère la croissance démographique des communes de la zone 1 durant ces 50 dernières années, l'on constate ainsi une forte hausse de 67%. Toutefois, cette augmentation est principalement attribuée à la commune de Wohlen dont la population est passée d'env. 3 000 à env. 9000 habitants. C'est ici que l'on remarque le plus fortement les processus suburbains, dus à une croissance extraordinaire provoquée dans les années 1970 par les nouveaux lotissements à Hinterkappelen. Les chiffres de Mühleberg et Radelfingen ne présentent pas d'effets suburbains significatifs, et depuis les années 1980, le nombre d'habitants est resté le même avec de légères variations. Il apparaît donc plausible que les deux communes, de même que Seedorf, ne soient plus comptées dans l'agglomération de Berne. À Berne même, depuis 2000, la population a cessé de diminuer. En comparaison avec le canton de Berne, la croissance démographique dans le canton de Fribourg est plus importante. Dans les années 1990-2000 le nombre d'habitants des districts du Lac et de la Singine a connu une croissance respective de 22.4% et 13.3%, seul le district d'Aarberg a connu une croissance comparable de 10.4%. Dans le district de Berne, avec - 3.4%, le nombre d'habitants est même en recul, ce qui se confirme aussi dans les prévisions.

Dans les prévisions, on distingue le scénario de tendance et les scénarios avec une dynamique de développement positive et négative. Le scénario de tendance est le scénario qui décrit le mieux le futur développement basé sur les chiffres existants. Dans ce scénario, dans le canton de Berne, l'on part sur une continuation de la croissance démographique jusqu'en 2030, la diminution successive des taux de croissance changera pour une diminution de la population dans la décade 2030-40. Pour le canton de Fribourg, l'on est parti sur une augmentation constante jusqu'en 2050, qui toutefois avec le temps va s'affaiblir. Les scénarios avec une dynamique de développement positive ou négative se situent en conséquence, dans le cas positif au-dessus du taux de croissance du scénario de tendance, dans le cas négatif, en-dessous. Pour le rayon élargi (15 km) de l'EKKM, l'on compte sur une augmentation de la population de 407 000 habitants (2000) à 494 000 pour l'année 2050, ce qui correspond à env. 20%.

3.1.2.4 Employés

Selon le recensement des entreprises de 2005, dans les communes avec une partie en zone 1, 3 548 personnes étaient employées. En comparaison avec la population résidente, la commune de Mühleberg présente une part importante d'employés, ceux-ci s'élevant à plus de 30% du nombre d'habitants. Une part importante revient à la KKM, qui emploie actuellement env. 300 personnes. La part également importante d'employés par rapport au nombre d'habitants de Seedorf se situe à 30%, alors que dans le reste des communes de la zone 1, les valeurs se situent entre 10% et 20% (source : Recensement des entreprises de 2005 de l'OFS).

Comme il faut s'y attendre, Berne possède aussi un très grand nombre d'employés. Dans le district de Berne, en 2005, 187 996 employés étaient recensés, soit 77% environ du nombre total d'habitants. Berne, en sa qualité de capitale du canton de Berne et ville fédérale de la Suisse, constitue le plus important centre administratif de la Suisse. De ce fait, l'agglomération de Berne connaît un afflux important de pendulaires, pour 238 575 places de travail (2000)

67 412 personnes pendulaient dans l'agglomération, ce qui correspond à 28.3%. Berne connaît ainsi, parmi les 5 grandes agglomérations de Suisse, le pourcentage de pendulaires le plus important (source : OFS). Comme cela est exposé en [41], l'on attend jusqu'en 2050, dans le rayon élargi du site, une croissance du nombre d'employés d'env. 4% par rapport à 2008, ce qui représente une croissance plutôt faible.

3.1.2.5 Population transitoire

En plus de la population stationnaire susmentionnée (habitants), il s'agit de considérer la population dite transtoire (personnes qui se trouvent temporairement dans les alentours du site), par le fait que celles-ci aussi peuvent être concernées par les conséquences possibles de la conception de l'installation ou d'un événement y afférant.

Il s'agit ici de personnes dans les domaines de la formation (écoles), de la santé (hôpitaux) et du tourisme (hôtels). La répartition de ces différentes catégories de population transitoire dans un rayon de 20 km (zones 1 et 2) sera traitée par la suite.

Formation

Les écoles prises en considération comprennent les degrés secondaires II (gymnases, écoles moyennes spécialisées et écoles professionnelles) et les hautes formations professionnelles (écoles supérieures spécialisées) ainsi que les Hautes écoles spécialisées et les universités. La répartition de la population transitoire dans la catégorie « Formation » est présentée dans le Tableau 3.1-3.

Tableau 3.1-3 : Population transitoire : formation (état 2007/2008)

Distance	Secteur d'arrondissement (segment 30°)												total
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	
0-3 km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-10 km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-20 km	1223	115	1835	42782	0	0	11874	0	0	0	500	5977	64306
0-10 km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0-20 km	1223	115	1835	42782	0	0	11874	0	0	0	500	5977	64306

Le cycle secondaire I n'est pas compris dans cette répartition. La part d'élèves du cycle secondaire I des communes du site est proche de 100%, la part d'élèves des plus petites communes voisines est insignifiante (du fait que le cycle secondaire I appartient à l'école obligatoire dont la responsabilité incombe à la commune).

Santé

Pour la désignation de cette catégorie de population transitoire, le nombre de lits a été multiplié par la moyenne d'occupation des lits dans le canton de Berne (91.7%). Cette valeur vaut aussi pour les deux hôpitaux du canton de Fribourg. La répartition de la population transitoire de la catégorie « Santé » est présentée dans le Tableau 3.1-4 .

Tableau 3.1-4 : Population transitoire : santé (état 2007)

Distance	Secteur d'arrondissement (segment 30°)												total
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	
0-3 km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-10 km	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
10-20 km	0	0	143	2066	0	0	61	0	49	121	0	295	2735
0-10 km	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
0-20 km	11	0	143	2066	0	0	61	0	49	121	0	295	2746

Tourisme

Pour le secteur touristique, les chiffres se basent sur la statistique d'hébergement des nuitées (nombre de lits et occupation). Pour les sites de camping, l'on a calculé les données de l'Office fédéral de la statistique. Comme base pour le taux d'occupation, l'on s'est référé au nombre moyen de nuitées en Suisse. La répartition de la population transitoire dans la catégorie « Tourisme » est présentée dans le Tableau 3.1-5.

Tableau 3.1-5 : Population transitoire : Tourisme (état 2008)

Distance	Secteur d'arrondissement (30° Segment)												total
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	
0-3 km	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4
3-10 km	30	0	0	93	0	22	8	6	0	9	13	0	181
10-20 km	96	16	135	1909	5	34	248	148	359	181	655	406	4192
0-10 km	30	0	0	93	0	22	12	6	0	9	13	0	185
0-20 km	126	16	135	2002	5	56	260	154	359	190	668	406	4377

Aspect global de la population transitoire

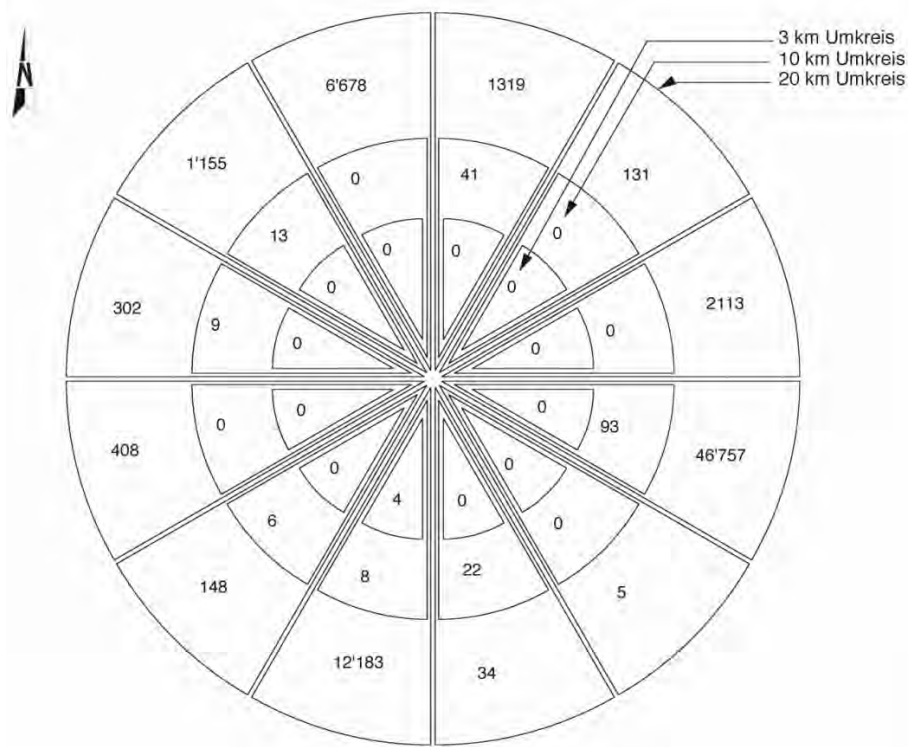
Les trois catégories de population transitoire présentent une répartition différenciée dans la région à 20 km du site (zones 1 et 2). L'on trouve presque exclusivement des installations de formation et des cliniques à une distance entre 10 et 20 km, et les villes de Berne, Fribourg et Bienne ressortent clairement (voir Tableau 3.1-3 et Tableau 3.1-4). Les installations touristiques (hôtels) sont réparties de manière égale, les villes ressortent moins clairement dans les données. Nombre d'hôtels se situent en effet dans les agglomérations (Tableau 3.1-5).

La somme de toutes les catégories de population transitoire (voir Tableau 3.1-6 et Fig. 3.1-1) est marquée par le nombre d'étudiants des villes de Berne, Fribourg et Bienne. Dans les autres régions, le nombre de personnes présentes est toutefois très faible.

Tableau 3.1-6 : Population transitoire : toutes catégories confondues

Distance	Secteur d'arrondissement (segment 30°)												total
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	
0-3 km	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4
3-10 km	41	0	0	93	0	22	8	6	0	9	13	0	192
10-20 km	1319	131	2113	46757	5	34	12183	148	408	302	1155	6678	71233
0-10 km	41	0	0	93	0	22	12	6	0	9	13	0	196
0-20 km	1360	131	2113	46850	5	56	12195	154	408	311	1168	6678	71429

Fig. 3.1-1 : Représentation graphique de toute la population transitoire par secteur d'arrondissement, de 30°



3.1.2.6 Évaluation

La mise en place d'une zone contrôlée autour du site d'une centrale nucléaire dans de petits pays comme la Suisse n'est pas réalisable. Les très hautes exigences de sécurité en matière de conception et d'exploitation garantissent que les accidents et/ou leurs éventuelles répercussions aux environs du site soient évités, sinon limités. La densité et la répartition de la population n'ont donc aucune importance particulière pour la conception proprement dite des nouvelles installations.

La densité de la population dans les environs proches de l'installation nucléaire devrait toutefois être faible (« Low Population Zone »), afin de maintenir au strict minimum les répercussions d'un rejet de radioactivité et de pouvoir procéder concrètement aux mesures en cas d'urgence. Comparée avec la densité moyenne de la population d'env. 400 habitants/km² dans le Mittelland suisse, la densité de la population dans les environs du site est faible (voir Tableau 3.1-2) ; les communes du site ayant une très faible densité de population. Le site de Niederruntigen se trouve ainsi dans une situation dite « de cuvette » (minimum local de densité de population), ce qui, pour un site de centrale nucléaire est en principe avantageux.

Du point de vue de la répartition de la population dans les environs du site, la construction et l'exploitation d'une centrale nucléaire ne sont donc pas problématiques. La zone proche est faiblement habitée, peu d'habitants sont donc concernés par les mesures de construction de la centrale, et durant l'exploitation, la planification en cas d'urgence (voir chap. 2.6) est facilitée.

Dans les autres zones, l'on atteint des densités de population typiques pour le Mittelland suisse, ce qui n'a aucune incidence négative sur l'adéquation du site.

Les conditions d'emploi dans la région revêtent une faible importance pour la viabilité du site, l'attrait de la région de Berne permet le recrutement de personnel qualifié pour l'exploitation de la centrale. À l'inverse, pour l'économie de la région de Berne, la sécurité d'approvisionnement est plus importante que l'impact de la centrale sur l'emploi.

La population des environs du site sera impliquée dans le processus de planification par des groupes d'accompagnement, afin d'augmenter la transparence et, là où cela est possible, d'intégrer les besoins des riverains dans la planification.

Autour du site, la population transitoire en comparaison à la population résidente n'est pas significative. Dans la zone 1 (rayon 2.8 km), l'importance de la population transitoire est négligeable.

3.1.3 Utilisation des sols

L'impact sur l'utilisation des sols dans les différentes communes est mentionné dans le Tableau 3.1-7, il est structuré de la même manière que le Tableau 3.1-2, de sorte qu'ici aussi les limites extérieures des communes dans le périmètre de 20 km se basent sur les limites des secteurs du document « Plans des zones pour la planification en cas d'urgence » (voir chap. 2.6). Ici, les surfaces boisées concernent surtout les forêts, y compris buissons et bosquets. Les surfaces improductives peuvent être des eaux stagnantes et des cours d'eau ainsi que des surfaces dépourvues de végétation et de la végétation improductive. Les zones d'habitat englobent les aires industrielles et d'habitat, les zones de trafic ainsi que les espaces verts et lieux de détente. Elles occupent actuellement 15.3% des sols communaux dans un rayon de 20 km. Dans un rayon de 20 km autour de l'EKKM prévue, le sol est essentiellement utilisé à des fins agricoles (env. 56%). Une partie assez importante du périmètre (env. 26%) est boisée. Dans les environs proches du site, on pratique surtout l'assolement (terre labourée – prairie). Les surfaces de culture et d'herbage sont entrecoupées de petites surfaces boisées. De grandes surfaces maraîchères se trouvent dans le district d'Erlach, la plus grande partie d'entre elles est à une distance d'env. 10 km du site, dans les communes de Müntschemier (Monsmier), Treiten et Finsterhennen.

Si l'on considère le rayon proche, soit les communes qui se situent entièrement ou partiellement dans la zone 1, l'image subjective d'une région imprégnée par l'agriculture avec une faible densité de population que l'on perçoit lors d'une visite du site, se reflète aussi dans les statistiques démographiques. Le pourcentage de zones d'habitat du rayon proche se situe vers 8.4%, celui des surfaces agricoles est pratiquement comparable aux autres rayons, soit env. 56.9%. Cependant, les surfaces boisées avec 31% et les surfaces improductives avec 3.7% constituent une grande part. L'Aar, la Singine et le lac de Wohlen sont importants pour la pêche.

Tableau 3.1-7 : Utilisation du sol dans un rayon de 20 km autour du site répartie en 4 secteurs principaux, chiffres du relevé de 2004/09

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale ¹⁾	Surfaces d'habitat et d'infrastruct.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
BERNE					
District d'Aarberg					
Aarberg	792	23.48	44.32	29.55	2.65
Bargen	789	6.97	70.47	18.63	3.93
Grossaffoltern	1510	10.86	62.32	26.03	0.79
Kallnach	1062	9.04	75.80	12.62	2.54
Kappelen	1088	10.94	73.90	14.34	0.83
Lyss	1178	35.57	30.22	33.79	0.42
Meikirch	1026	9.36	64.04	26.51	0.10
Niederried	455	5.27	53.19	36.48	5.05
Radelfingen	1472	6.73	57.81	31.45	4.01
Rapperswil	1820	8.63	62.64	28.63	0.11
Schüpfen	1980	10.76	55.81	32.93	0.51
Seedorf	2094	7.69	59.60	32.43	0.29
District de Berne					
Bern	5159	45.07	18.98	33.59	2.36
Bolligen	1656	12.38	43.30	44.02	0.30
Bremgarten	188	46.28	32.45	16.49	4.79
Ittigen	421	60.33	24.47	14.25	0.95
Kirchlindach	1192	8.47	66.86	23.74	0.92
Köniz	5108	18.38	50.47	30.79	0.35
Muri	765	49.54	26.14	21.83	2.48
Oberbalm	1235	4.62	74.33	20.89	0.16
Ostermundigen	598	42.64	31.77	25.42	0.17
Stettlen	355	22.25	50.99	26.48	0.28
Wohlen	3622	8.34	54.69	32.69	4.28

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale	Surfaces d'habitat et d'infrastruct.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
Zollikofen	541	41.96	44.18	12.57	1.29
District de Bienne					
Biel/Bienne	2125	45.41	8.00	45.32	1.27
Leubringen / Evillard	364	29.40	30.22	40.38	0.00
District de Büren					
Büetigen	362	9.94	62.71	26.52	0.83
Busswil	307	19.54	51.14	28.34	0.98
Diessbach	628	7.80	59.87	32.32	0.00
Dotzigen	422	14.93	55.69	26.07	3.32
Meienried	67	2.99	70.15	16.42	10.45
Wengi	706	7.65	72.95	16.71	2.69
District de Cerlier					
Cerlier	345	15.36	44.64	28.12	11.88
Brüttelen	661	7.11	69.89	22.39	0.61
Finsterhennen	357	11.20	71.43	15.97	1.40
Chules	791	8.09	52.97	33.75	5.18
Champion	1080	10.74	56.85	25.09	7.31
Anet	2390	9.54	66.65	20.96	2.85
Locras	543	7.73	44.57	46.04	1.66
Monsmier	488	18.65	77.87	1.84	1.64
Siselen	553	7.05	73.78	18.63	0.54
Treiten	474	8.23	73.00	17.09	1.69
Tschugg	332	10.84	43.98	44.88	0.30
Vinelz	463	13.82	50.97	34.99	0.22
District de Fraubrunnen					
Ballmoos	147	3.40	72.79	22.45	1.36

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale	Surfaces d'habitat et d'infrastruc.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
Bangerten	220	6.36	61.82	31.82	0.00
Deisswil	213	14.08	60.56	25.35	0.00
Diemerswil	281	6.05	74.02	19.93	0.00
Iffwil	503	7.95	55.47	36.58	0.00
Moosseedorf	632	30.54	30.22	35.92	3.32
Münchenbuchsee	890	34.27	38.43	26.97	0.34
Scheunen	219	3.20	45.66	51.14	0.00
Urtenen	716	20.25	44.41	30.31	5.03
Wiggiswil	143	16.78	68.53	12.59	2.10
Zuzwil	348	7.47	66.38	25.86	0.29
District de Laupen					
Laupen	408	25.74	38.97	30.15	5.15
Clavaleyres	98	4.08	79.59	16.33	0.00
Ferenbalm	923	11.38	67.93	18.96	1.73
Frauenkappelen	929	6.78	42.20	41.01	10.01
Golaten	278	8.27	51.44	20.50	19.78
Gurbrü	183	19.13	71.04	9.84	0.00
Kriechenwil	476	5.46	54.41	39.92	0.21
Mühleberg	2629	9.21	53.33	32.83	4.64
Münchenwiler	247	11.74	65.99	21.05	1.21
Neuenegg	2196	8.97	52.32	38.02	0.68
Wileroltigen	411	6.57	62.04	28.71	2.68
District de La Neuveville					
La Neuveville	681	18.36	18.50	62.70	0.44
Prêles	701	10.41	62.34	26.96	0.29

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale	Surfaces d'habitat et d'infrastruc.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
District de Nidau					
Nidau	152	84.21	0.00	3.95	11.84
Aegerten	216	29.17	37.50	28.24	5.09
Bellmund	381	14.70	51.97	33.07	0.26
Brügg	501	34.33	29.54	31.54	4.59
Bühl	298	7.05	88.93	3.36	0.67
Epsach	341	6.45	77.71	14.08	1.76
Hagneck	181	12.71	66.30	12.71	8.29
Hermrigen	345	7.54	50.14	42.03	0.29
Ipsach	460	7.39	69.57	22.83	0.22
Jens	190	50.53	45.26	3.68	0.53
Ligerz	178	12.92	32.02	51.12	3.93
Merzligen	226	10.62	72.12	16.81	0.44
Mörigen	216	21.30	59.26	16.67	2.78
Orpund	395	20.76	39.24	37.47	2.53
Port	243	41.15	25.51	29.22	4.12
Scheuren	210	10.48	55.71	25.71	8.10
Schwadernau	412	10.19	74.27	14.56	0.97
Studen	270	42.22	38.89	18.15	0.74
Sutz-Lattrigen	361	21.33	44.04	31.58	3.05
Täuffelen	440	23.41	59.77	10.68	6.14
Tüscherz-Alfermée	332	7.53	7.53	84.64	0.30
Twann	909	8.25	30.03	57.76	3.96
Walperswil	699	9.59	76.82	7.73	5.87
Worben	279	29.39	62.37	7.53	0.72

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale	Surfaces d'habitat et d'infrastruc.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
District de Schwarzenburg					
Albligen	428	7.48	56.31	34.81	1.40
Wahlern	4054	7.87	62.78	27.18	2.17
District de Seftigen					
Belp	1761	17.04	54.74	25.16	3.07
Kehrsatz	443	21.22	54.63	22.35	1.81
Niedermuhlern	720	6.11	75.83	18.06	0.00
Rüeggisberg	3570	4.34	64.29	29.55	1.82
Wald (BE)	1328	6.25	74.55	19.20	0.00
FRIBOURG					
District de La Sarine					
Fribourg	932	63.20	13.41	16.95	6.44
Granges-Paccot	398	31.16	45.73	15.33	7.79
La Sonnaz	690	7.39	66.38	22.17	4.06
District du lac					
Barberêche	913	5.70	59.91	19.93	14.46
Büchslen	161	8.70	78.26	13.04	0.00
Courgevaux	341	15.84	57.48	26.10	0.59
Courlevon	327	5.20	57.19	37.61	0.00
Courtepin	408	25.49	46.32	27.70	0.49
Cressier (FR)	415	10.84	69.40	19.52	0.24
Fräschels	314	10.51	71.34	17.20	0.96
Galmiz	905	7.85	70.61	18.67	2.87
Gempenach	166	6.02	75.30	18.67	0.00
Grengr	101	13.86	73.27	9.90	2.97
Gurmels	1721	10.40	68.91	20.05	0.64

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale	Surfaces d'habitat et d'infrastruc.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
Jentes	177	8.47	80.23	10.73	0.56
Chiètres	1222	15.96	68.58	14.81	0.65
Kleinbösingén	301	9.30	64.78	20.93	4.98
Lourtens	230	6.09	60.00	33.91	0.00
Meyriez	33	90.91	3.03	0.00	6.06
Misery-Courtion	1143	7.17	75.24	17.32	0.26
Montilier	113	36.28	26.55	33.63	3.54
Morat	1201	21.65	51.54	26.31	0.50
Ried bei Kerzers	757	11.89	80.45	7.13	0.53
Salvenach	384	7.81	69.53	22.66	0.00
Ulmiz	286	6.64	67.48	25.87	0.00
Villarepos	472	8.05	58.05	33.90	0.00
Bas-Vully	995	13.77	70.15	12.56	3.52
Haut-Vully	757	13.08	70.54	13.21	3.17
Wallenried	388	20.88	61.60	17.27	0.26
District de la Singine					
Alterswil	1608	6.59	76.55	16.23	0.62
Bösingen	1432	9.29	75.21	14.73	0.77
Guin	3082	12.43	67.42	13.24	6.91
Heitenried	905	6.74	73.59	18.67	0.99
Schmitten	1355	13.14	72.10	14.39	0.37
St. Antoni	1685	7.48	72.40	18.99	1.13
Tavel	837	14.93	63.68	21.27	0.12
Ueberstorf	1613	7.44	72.72	18.54	1.30
Wünnewil-Flamatt	1321	19.38	63.13	16.96	0.53

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale	Surfaces d'habitat et d'infrastruc.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
NEUCHÂTEL					
District de Neuchâtel					
Cornaux	472	31.14	45.76	22.25	0.85
Cressier	860	15.93	27.91	54.30	1.86
Le Landeron	1026	15.20	39.67	43.47	1.66
Marin-Epagnier	337	46.29	32.64	12.76	8.31
Thielle-Wavre	207	21.26	74.88	0.97	2.90
SOLEURE					
District de Bucheggberg					
Balm bei Messen	216	7.41	60.19	32.41	0.00
Biezwil	418	6.70	51.91	41.39	0.00
Brunnenthal	91	14.29	74.73	9.89	1.10
Messen	705	6.95	63.26	29.36	0.43
Schnottwil	717	8.65	59.00	32.22	0.14
VAUD					
District d'Avenches					
Avenches	1753	19.62	63.49	15.86	1.03
Bellerive	221	23.53	62.90	9.95	3.62
Chabrey	394	7.61	43.91	36.55	11.93
Constantine	281	14.95	68.68	14.23	2.14
Cudrefin	1586	8.01	60.59	22.70	8.70
Faug	347	19.60	54.76	25.07	0.58
Montmagny	382	4.45	72.51	21.20	1.83
Mur	177	14.69	75.14	9.04	1.13
Oleyres	190	7.37	70.53	22.11	0.00
Vallamand	235	19.57	57.02	22.13	1.28

CANTON Secteur / Adm. / District Commune	Surface totale	Surfaces d'habitat et d'infrastruc.	Surfaces agricoles	Surfaces boisées	Surfaces improductives
	ha	en %	en %	en %	en %
Villars-le-Grand	424	8.25	86.79	3.07	1.89
Total	125 703	15.29	56.29	26.2	2.23

Source : Office fédéral de la statistique (OFS)

- 1) Surfaces par point (données statistiques, ne correspond pas au cadastre officiel)
- 2) Les zones d'habitat et d'infrastructure comprennent : immeubles et aires industrielles, zones d'habitat particulières, espaces verts et lieux de détente, zones de trafic
- 3) Les surfaces agricoles comprennent : prairies et terres labourées, vergers, vignobles et cultures maraîchères
- 4) Les surfaces boisées comprennent : forêts, buissons et bosquets
- 5) Les surfaces improductives comprennent : eaux stagnantes et cours d'eau, végétation improductive et surfaces dépourvues de végétation

3.1.3.1 Développement de l'utilisation des sols dans l'environnement du site

Le développement de l'utilisation des sols dans l'environnement du site est présenté dans le Tableau 3.1-8. La tendance du développement des zones d'habitat au cours des dernières années est clairement identifiable. L'augmentation d'env. 2.5% des surfaces totales va au détriment des surfaces agricoles, lesquelles ont diminué dans la même proportion. Dans le secteur concerné, depuis le début des années 1980, les zones d'habitat ont augmenté de 3 100 ha. Avec 26.2% et 2.2%, le taux des surfaces de forêt et des surfaces improductives est resté constant.

Tableau 3.1-8 : Développement des quatre catégories principales de l'utilisation des sols dans un rayon (20 km) autour du site

	1979/85	1992/97	2004/09
Zones d'habitat	12.80%	14.13%	15.29%
Surfaces agricoles	58.89%	57.44%	56.29%
Surfaces boisées	26.07%	26.21%	26.20%
Surfaces improductives	2.24%	2.22%	2.23%

Source : Office fédéral de la statistique (OFS)

Il faut s'attendre à ce que le développement observé se poursuive et que le taux des zones d'habitat augmente, alors que le taux des surfaces agricoles exploitées va diminuer.

3.1.3.2 Évaluation

En ce qui concerne l'utilisation des sols pour la construction et l'exploitation d'une installation nucléaire, le site et son environnement sont adaptés. Dans la zone à faible densité de population et principalement utilisée à des fins agricoles, il faut s'attendre à très peu de conflits d'utilisation, d'autant plus que les FMB, dans le cadre de la nouvelle construction, sont propriétaires des terrains à bâtir. L'intégration des instruments urbanistiques et la prise en compte de l'impact du projet sur l'environnement sont traitées dans des rapports séparés de la demande d'autorisation générale [41] et [33].

3.2 Voies de transport, installations industrielles

Ce chapitre traite et évalue les caractéristiques du site en ce qui concerne les installations industrielles et les voies de transport.

En premier lieu, il s'agit de la description et de l'appréciation des dangers potentiels qui pourraient exister en raison d'installations industrielles, d'installations militaires et de voies de transport, en ce qui concerne l'évaluation de l'adéquation du site. Entrent en ligne de compte comme dangers potentiels :

- Installations industrielles (chap. 3.2.1)
- Installations militaires (chap. 3.2.2)
- Installations de gaz naturel à haute pression (chap. 3.2.3)
- Voies de transport (chap. 3.2.4)
- Transports de gaz propane par la route ou par le rail (chap. 3.2.5)
- Transports d'essence par la route ou par le rail (chap. 3.2.6)
- Transport de chlore gazeux par la route ou par le rail (chap. 3.2.7)
- Trafic aérien (chap. 3.2.4.3).

D'autres produits dangereux connus cités dans la littérature spécialisée ne sont ici et dans toute la Suisse présentement et probablement aussi dans l'avenir, pas importants, p. ex. LNG (gaz naturel liquide) - transports ou gaz propane liquide dans des conduites.

3.2.1 Installations industrielles

Dans un rayon d'env. 2 km autour du site de l'EKKM, hormis la centrale hydroélectrique de Mühleberg et la KKM, il ne se trouve aucune autre entreprise industrielle.

Une station-service est installée à Mühleberg, à une distance de 2.2 km du site. De petites entreprises artisanales sont installées dans les localités environnantes. À 2.3 km à l'est du site se trouve la décharge de Teuftal, dans laquelle sont déposées pour le moment les scories (issues de l'incinération des déchets), des déchets de matières solides et du réacteur. Les gaz émanant de la décharge sont brûlés dans une centrale à énergie totale de 180 kW. La capacité limite de la décharge sera probablement atteinte en 2035.

Les prochaines plus grandes zones artisanales se situent chacune à une distance d'env. 7 km à Aarberg (Chräjeninsel, 50 000 m²), Chiètres et Berne. Une importante fabrique de sucre est établie à Aarberg. Le plus proche quartier industriel de Berne est Gumme (Bern-Brünnen) ; là sont installés un centre technique de Swisscom, une centrale de distribution de la chaîne de supermarchés Coop, y compris une propre installation d'incinération des déchets, et la fabrique de chocolat Tobler de Suchard. Le centre d'achat Westside ouvert en 2008 marque la limite est du périmètre. À 8.5 km de distance, à Niederwangen, l'on trouve la centrale suisse de Cruzell, où sont fabriqués des vaccins. Une autre grande entreprise à une distance de 8.5 km est le centre de production de Wander à Neuenegg.

Comme on peut le constater dans la description, ces entreprises industrielles environnantes ne représentent aucun danger pour le site. À l'exception des deux installations de production d'électricité des FMB, il n'y a aucune entreprise industrielle à proximité immédiate ; les zones industrielles susmentionnées se situent déjà à de plus grandes distances du site, de sorte qu'aucune interaction n'est à attendre avec la centrale nucléaire projetée. Ainsi, aucune entreprise industrielle n'a de répercussion sur la conception de la nouvelle centrale en matière de mise en danger.

Même pour l'avenir, il ne faut pas s'attendre à la création de zones artisanales dans les environs proches du site.

Le laboratoire cantonal de Berne confirme qu'à l'exception de la centrale nucléaire et de la centrale hydroélectrique, aucun danger potentiel important connu avec de possibles répercussions d'événements sur l'EKKM ne figure au cadastre des dangers, lequel ne comprend pas les installations secrètes du DDPS.

Les risques liés aux installations industrielles dans les environs du site EKKM peuvent ainsi être exclus. La mise en danger possible par la centrale hydroélectrique de Mühleberg est décrite au chapitre 3.2.1.1 ; la description de la mise en danger possible par des installations militaires figure au chapitre 3.2.2. Pour l'évaluation des possibles influences réciproques entre l'EKKM et la KKM existante, se reporter au chapitre 3.6.4¹.

Une tour de refroidissement hybride est projeté pour l'EKKM. L'eau de refroidissement captée dans l'Aar pour le circuit primaire du réacteur sera épurée dans une installation de traitement de l'eau avant d'être utilisée pour la tour de refroidissement hybride. Une éventuelle pollution industrielle de l'eau de la rivière n'aurait en conséquence aucune répercussion sur la capacité de refroidissement.

¹ Les FMB s'efforceront d'arrêter dès que possible l'exploitation de la centrale actuelle KKM lorsque la nouvelle installation EKKM sera mise en service. D'un point de vue actuel, l'exploitation en parallèle des deux installations sera probablement nécessaire, afin de pouvoir continuer à garantir la sécurité d'approvisionnement pour les FMB et les partenaires associés à la réalisation de l'EKKM durant la première phase suivant sa mise en service.

3.2.1.1 Centrale hydroélectrique de Mühleberg

La centrale hydroélectrique des FMB se trouve dans les environs du site, des influences réciproques peuvent donc survenir.

La concession pour la centrale hydroélectrique échoit en 2017. Dans le cadre d'un renouvellement de la concession, l'on tiendra compte des mesures de construction ; les turbines et générateurs, en particulier, arriveront en fin de vie et devront être renouvelés. Une éventuelle coordination nécessaire des travaux de construction à la centrale hydroélectrique avec les travaux préparatoires pour l'EKKM sera assurée par de la société Energie BKW FMB S.A.

À côté des répercussions possibles d'une rupture complète du barrage, décrites au chap. 3.4.3.3, il y a les influences éventuelles suivantes :

- Libération de produits chimiques, en particulier lubrifiants, combustibles et carburants
- Blocage des voies d'accès lors de gros transports.

La centrale hydroélectrique n'abrite que de petites quantités de produits chimiques nécessaires à son exploitation et à son entretien. Le stockage de produits chimiques est soumis à de sévères conditions ; il est strictement veillé à ce qu'aucune huile, combustible et carburant ne s'échappe dans l'environnement. La probabilité que des produits chimiques finissent dans l'eau et perturbent l'utilisation de l'eau comme agent de refroidissement de l'EKKM est donc négligeable.

Un blocage des voies d'accès de la centrale hydroélectrique est par contre prévisible, avant tout lors de transports de gros composants pour la construction de l'EKKM. À la centrale hydroélectrique, les gros composants, tels que les générateurs, sont entretenus ou remplacés après de longues périodes d'exploitation (dizaines d'années). La coordination des phases de construction et de révision des deux centrales électriques se fera par les exploitants. L'on veillera également à ce que l'accès pour les services de secours soit toujours garanti.

3.2.2 Installations militaires

Le plan sectoriel militaire (PSM) contient la liste des places d'armes et de tir, des aérodromes militaires et des points de franchissement¹. Il en ressort qu'à ce jour, aucune installation militaire importante pour la sécurité ne se trouve dans les environs immédiats du site ; seul un point de franchissement (n° 1301.425 Mühleberg / centrale nucléaire, voir aussi [33] et [41]) se trouve aux abords immédiats de l'EKKM projetée. Pour tout détail concernant des sites militaires, s'adresser aux autorités fédérales compétentes : selon la Loi fédérale concernant la protection des ouvrages militaires [30], il est interdit, en Suisse ou hors de Suisse, de publier ou de mettre dans le commerce sans autorisation, des descriptions et des rapports sur les ouvrages militaires.

Selon l'IOS/STAB CHEF DE l'ARMÉE (Protection des informations et des objets, SG DDPS), aucun grand dépôt de munition ou de carburant (seuil quantitatif selon OPAM : TNT 2 000 kg, essence 200 000 kg, diesel 500 000 kg) ne se trouve dans un rayon de 8 km autour du site EKKM.

Les données susmentionnées seront actualisées dans le cadre de la demande de permis de construire, et l'on examinera les risques éventuels dus au point de franchissement précité.

¹ <http://www2.vbs.admin.ch/internet/gs/raum/spm/deutsch/planungbund/spm/index.html>

3.2.3 Répercussions d'accidents sur des installations de gaz naturel à haute pression

3.2.3.1 Conduites de gaz naturel à haute pression

Deux conduites de 70 bars du Réseau suisse de transport de gaz naturel [41] passent dans un rayon plus éloigné du site de l'EKKM. La conduite de gaz naturel la plus proche de Altavilla-Mülchi via Berne-Forsthaus et Laupen (largeur nominale 16") passe approximativement à 4.5 km au sud du site ; la conduite Altavilla- Mülchi via Walperswil (largeur nominale 24") passe à l'ouest et au nord du site et se rapproche jusqu'à 6.5 km. Les deux conduites de gaz naturel se situent derrière des chaînes de collines.

3.2.3.1.1 Scénarios d'accidents majeurs déterminants

Selon le rapport directeur « Sécurité des installations de gaz naturel à haute pression » [87], l'accident majeur le plus dangereux pour les personnes pouvant se produire sur des conduites de gaz naturel à haute pression est une rupture totale de tuyauterie (full bore rupture : FBR), où l'importance de la fuite atteint le double de la section du tuyau. Le gaz naturel s'écoule alors par les deux moitiés de tuyau et fuit au début à grande vitesse. À l'emplacement de la fuite, la haute pression et la vitesse du gaz projettent au loin la terre environnante. De ce fait, avant tout pour les plus grands diamètres de tuyaux (> 10") l'on peut pratiquement toujours compter avec une inflammation spontanée. Le danger potentiel primaire est ainsi l'effet de la chaleur.

L'inflammation du gaz produit une torche ou, lors d'inflammation spontanée, une boule de feu (événement maximal). La boule de feu tient quelques secondes et retombe alors en une torche. Ces incendies provoquent un rayonnement de chaleur dont l'intensité dépend du taux de combustion et de la distance de l'objet ou de la personne.

Lors de la rupture totale de la conduite de gaz naturel à haute pression sans inflammation, le gaz se refroidit par expansion à la pression normale, mais se réchauffe rapidement à la température ambiante par le mélange avec l'air ambiant. La densité du mélange gaz naturel / air est de ce fait approchant de la même densité que l'air ambiant, de sorte qu'aucun gaz lourd ne se forme.

3.2.3.1.2 Conséquences pour la population et l'environnement

Le site de l'EKKM est à une distance de 4.5 km de la plus proche conduite de gaz naturel à haute pression de 16"/70 bars. En raison du tracé usuel de la conduite dans les environs non protégés du site, les risques dus au rayonnement de chaleur sont importants.

Mortalités

Pour les répercussions d'un scénario d'incendie sur l'homme, la dose de rayonnement de chaleur reçue est déterminante. Pour la définition du nombre de personnes concernées, les radiations mortelles R_1 , R_{50} et R_{99} sont calculées selon le rapport-cadre « Sécurité des installations de gaz naturel à haute pression » [87].

Les calculs établis selon ce rapport-cadre indiquent pour une conduite de 16"/70 bars une distance de mise en danger maximale pour les personnes à l'air libre (R_1 boule de feu) d'env. 140 m.

3.2.3.2 Stations de détente et de mesure (stations SDM)

Selon les réflexions sous [87], les deux scénarios d'accidents majeurs dus à la rupture totale de la conduite avec incendie et explosion peuvent survenir dans une station SDM. Les distances d'impact pour le scénario « explosion » (onde de choc) sont beaucoup plus petites que celles des scénarios « incendie ». De ce fait, seuls les scénarios d'incendie sont généralement importants. Sur ce point, avec la prise en compte de la conduite de gaz naturel à haute pression, les dangers d'une station SDM sont saisis indirectement. Les stations SDM ne doivent donc pas être particulièrement prises en compte.

3.2.3.3 Evaluation du site EKKM

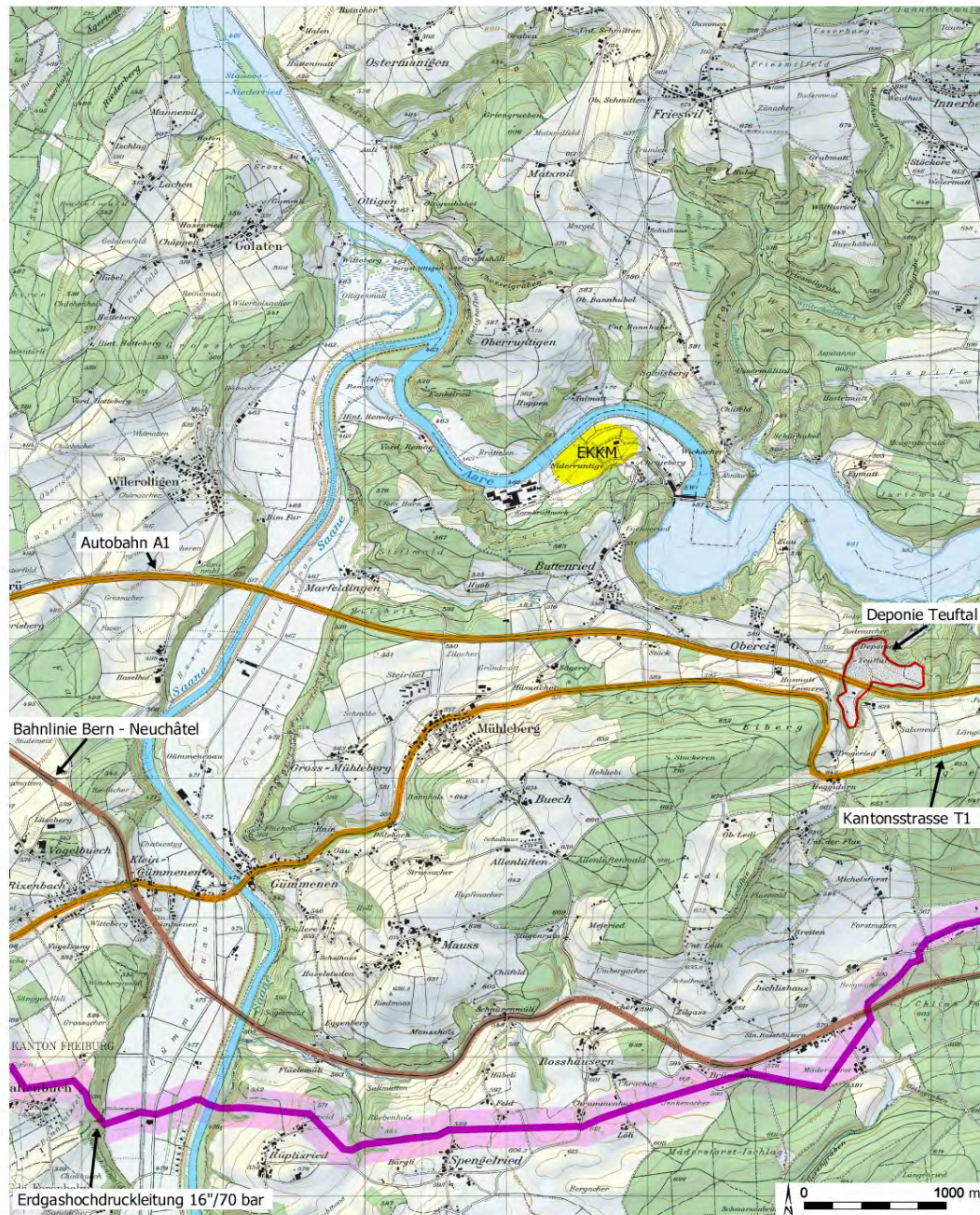
Avec une distance de 4.5 km de la plus proche conduite de gaz naturel à haute pression de 16"/70 bars, le site EKKM se trouve loin à l'extérieur du plus grand rayon de mortalité R_1 (boule de feu) pour personnes à l'air libre, lequel selon [87] est d'env. 140 m (voir Fig. 3.2-1).

En Suisse, les plus grands rayons de danger (conduite 48"/70 bars) après 1997 [87] atteignent env. 390 m (R_1 boule de feu, personnes à l'air libre). De ce fait, la prise en compte de conduites situées plus loin est superflue.

Tout risque dû à un accident majeur sur une conduite de gaz naturel à haute pression ou sur une station SDM peut donc être exclu.

Fig. 3.2-1 : EKKM : Vue d'ensemble des risques industriels

EKKM: Übersichtsplan industrielle Gefährdungen



Letalitätsradius R_1 (1%)
Feuerball Personen im Freien
infolge Hitzestrahlung
(gem. Rahmenbericht 97)

suisse plan Ingenieure AG

08707-2

16.06.2009

3.2.4 Liaisons routières

3.2.4.1 Routes

L'autoroute A1 Berne-Lausanne passe au sud du site, à une distance d'env. 1.5 km. La route cantonale T1 Berne-Lausanne se trouve également au sud du site à une distance d'env. 2 km.

L'accès au site se fait à l'est de l'autoroute A1, par la semi-jonction de Mühleberg, par la route cantonale T1 et par la route Oberei-Buttenried. Cette route est actuellement construite en qualité de route d'approvisionnement de type I pour des transports exceptionnels d'une hauteur libre jusqu'à 5.2 m et un poids total allant jusqu'à 480 tonnes. Les transports exceptionnels desservent aussi bien la centrale nucléaire de Mühleberg (KKM) que la centrale hydroélectrique. Depuis l'ouest, le site est accessible par la route cantonale T1 et par la route Mühleberg-Buttenried. Une route secondaire passe sur le barrage de la centrale hydroélectrique Mühleberg de Buttenried à Frieswil resp. Illiswil. Depuis 2001, l'A1 conduit depuis Morat vers Yverdon-les-Bains et Lausanne. De ce fait, le trafic sur l'autoroute a fortement augmenté, comme le montre le Tableau 3.2-1. En 2002, la moyenne du trafic journalier sur la A1 sur le viaduc de la Singine était de 28 377 véhicules, depuis et jusqu'en 2007, elle n'a encore que légèrement augmenté.

Tableau 3.2-1 : Trafic routier des deux plus importantes liaisons routières aux environs du site

Trafic journalier moyen des véhicules à moteur (Total du trafic dans les deux sens en 24 h)				
Poste de comptage	Année			
	1990	1995	2000	2005/07
Viaduc de la Singine (A1 Berne-Lausanne)	12 882	14 021	¹⁾ 21 400	^{1) 2)} 29 022
Heggidorn (T1 Berne-Lausanne)	4 318	5 476	6 818	³⁾ 6606

Source : Office fédéral de la statistique (OFS)

1) Jusqu'en 2000 l'A1 allait seulement jusqu'à Morat, depuis 2001 l'A1 a été entièrement construite de Berne jusqu'à Yverdon-les-Bains

2) Chiffre pour 2007

3) Chiffre pour 2005

Il faut s'attendre à ce que le trafic continue à augmenter légèrement, en raison de la croissance démographique continue et de la mobilité stable, voire accrue. Le canton de Fribourg a une plus forte dynamique de population que le canton de Berne, de sorte qu'une augmentation du trafic pendulaire sur l'A1 paraît plausible. L'adéquation du site n'est toutefois pas concernée par ce développement attendu.

Le site de Mühleberg est situé de manière centrale dans le Mittelland suisse et bien desservi par la route.

3.2.4.2 Trafic ferroviaire

La ligne ferroviaire Berne-Neuchâtel est la ligne ferroviaire la plus proche à 4 km au sud du site. Les gares les plus proches sont Rosshäusern et Gümmenen, il n'y a pas de propre raccordement ferroviaire. Déjà à une distance minimale de 6 km, l'on trouve la ligne ferroviaire Aarberg-Chiètres. Le trafic des trains sur cette ligne ferroviaire est resté pratiquement stable depuis 1998 (voir Tableau 3.2-2).

Tableau 3.2-2 : Trafic ferroviaire (jour ouvrable) sur la ligne Berne-Chiètres

Nombre de trains voyageurs par jour			
Ligne ferroviaire	Année		
	1998/1999	2000/2001	2005
Berne-Chiètres, aller-retour	70	68	76

Source : Indicateur des CFF

3.2.4.3 Trafic aérien

Une évaluation des risques et/ou de l'adéquation du site en relation avec le trafic aérien est indiquée au chapitre 3.6.2.25.

3.2.5 Répercussions d'accidents majeurs lors de transports de gaz propane liquide par la route et le rail

3.2.5.1 Caractéristiques du propane

Le propane (C_3H_8), qui prend la forme de gaz à la pression atmosphérique, est toutefois liquéfiable à température ambiante sous l'effet d'une faible surpression.

En raison de son poids moléculaire plus élevé par rapport à l'air (Propane = 44, Air = 29 g/mol), le gaz propane liquide compte parmi les gaz lourds. Après une émission, il a tendance à rester près du sol. Les limites d'explosibilité pour le propane se situent vers 2.1 et 9.5 vol.%, c'est-à-dire que les mélanges gaz-air sont seulement inflammables dans le cadre de ces limites [85].

3.2.5.2 Scénario d'accidents majeurs

Les répercussions d'accidents majeurs sur des citernes de gaz liquide sont décrites sous [85]. À des fins de simplification, les transports de propane sur rail et par route peuvent être considérés comme des citernes mobiles non enterrées. Sur le rail, elles contiennent 46 t de gaz propane liquide et 20 t pour le transport routier.

Selon l'origine, la fuite, les quantités et la direction d'émissions, les sources d'allumage existantes et les conditions atmosphériques, différents scénarios d'incendie et d'explosion peuvent se présenter lors d'accidents.

Avec des citernes fixes, les dégâts les plus importants sont dus, en règle générale, audit phénomène d'ébullition-explosion appelé « BLEVE » (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Selon la topologie des lieux, il faut s'attendre à la formation d'un nuage de gaz à explosion retardée [85].

3.2.5.3 Conséquences

3.2.5.3.1 Propagation

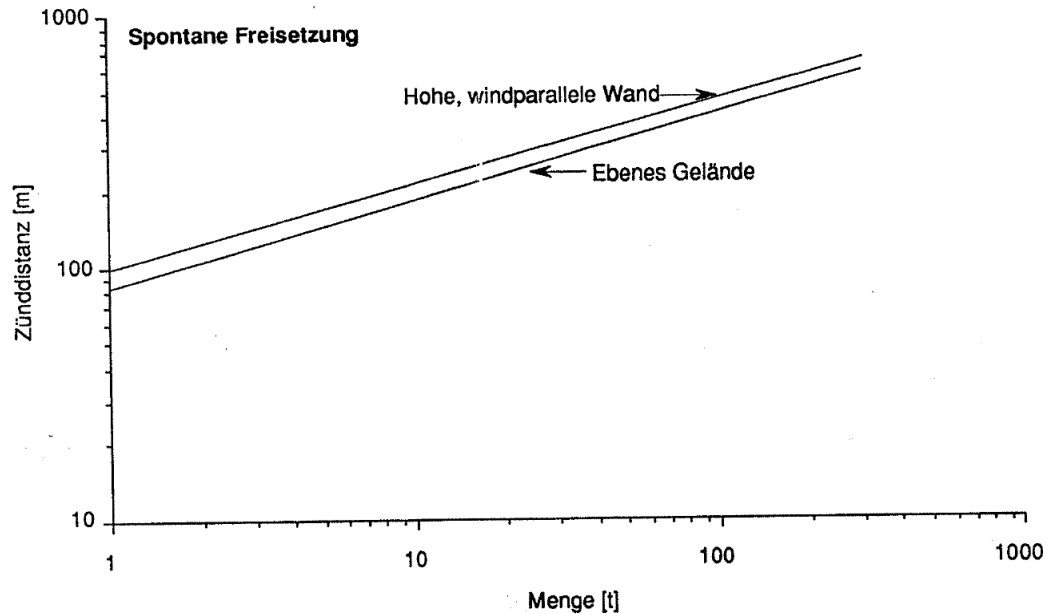
Si, en l'espace d'un court instant, du gaz liquide inflammable est libéré en grande quantité (en tonnes), il s'ensuit un nuage de gaz, lequel présente à l'intérieur une concentration de matière inflammable au-dessus de la limite d'explosibilité supérieure. La pression maximale qui en résulte à l'air libre est de 0.05 bar.

Lors d'une émission spontanée de 46 t de propane, il faut compter sur terrain plat selon la Fig. 3.2-2 avec une distance de la limite d'explosibilité inférieure (distance d'allumage) d'au moins 300 m. Pour 20 t de propane, la distance d'allumage est d'environ 250 m (selon la Fig. 3.2-2).

Pour le diagramme (Fig. 3.2-2), l'on a utilisé un programme développé par VDI et basé sur des mesures en tunnel aérodynamique [88]. Les tests en tunnel aérodynamique ont été effectués avec émission sans pression, c'est-à-dire que le diagramme n'est utilisable que pour ce genre d'émissions.

Sur un terrain plat, la propagation va dans la direction du vent et sur un terrain incliné (inclinaison de la pente > 10%) vers le bas de la vallée.

Fig. 3.2-2 : Distance de la limite d'explosion inférieure en relation avec une émission spontanée de grande quantité [85]



3.2.5.3.2 Incendie

Feu des nuages gazeux et boule de feu

Si le nuage est allumé et soulevé par la poussée verticale thermique, il se forme une boule de feu. Si la propagation est déjà avancée avant l'allumage, il en résulte une combustion très étendue.

Les dégâts les plus importants sont dus, en règle générale, audit phénomène d'ébullition-explosion appelé « BLEVE » (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). En raison d'un puissant effet thermique ou mécanique, le réservoir se rompt. Le gaz liquide est brusquement libéré et allumé [85]. Le rayon de la boule de feu peut être calculé selon la formule Marshall (1987) ($R[m] = 27.5 \cdot M^{0.333}$, avec M = Masse du gaz liquide libéré en [t]) :

Tableau 3.2-3 : Rayons de la boule de feu pour 46 t et 20 t de gaz propane liquide libéré

Scénario d'accidents majeurs lors du transport de gaz propane liquide sur :	Quantité de gaz propane liquide libérée [t]	Rayon de la boule de feu [m]	Triple rayon de la boule de feu [m]
Rail	46	98	294
Route	20	75	225

Feu de nappe et à jet libre

La formation d'une nappe de propane par sortie à haute vitesse peut pratiquement être exclue. Une éventuelle nappe due à la sortie de liquide vers le bas ne comporte pas de grand risque. Il n'est donc pas nécessaire de tenir compte d'un éventuel feu de nappe.

En cas de jet libre allumé, des flammes de plusieurs dizaines de mètres sont imaginables. Ces jets de flammes menacent en premier lieu le voisinage direct [85].

3.2.5.3 Explosions des nuages gazeux

Les caractéristiques du gaz propane ont pour conséquence, qu'une dilution dans l'air se passe seulement lentement, de sorte que même à une plus grande distance du lieu d'émission, un mélange inflammable peut encore exister pour un temps limité. De ce fait, il faut compter avec des sources d'allumage existantes. La petite quantité de fuite possible dans la canalisation joue ici un rôle secondaire.

En l'absence d'obstacles, l'effet de pression reste très limité. L'effet de pression d'explosions de gaz non protégées n'excède généralement pas 50 mbars. L'on peut s'attendre à des pressions d'explosions plus élevées qu'en cas de structures telles que des rangées de maisons qui permettent une protection à plus grande échelle [85].

3.2.5.4 Conséquences pour la population et l'environnement

Répercussions d'un BLEVE

L'évaluation d'événements (tel l'accident de San Carlos, Espagne) démontre, que les personnes en plein air sont mises en danger par le rayonnement de la chaleur dans le triple du rayon de la boule de feu [85]. Lors d'une émission spontanée et de l'allumage de 46 t de propane liquide, le rayon de la boule de feu est triplé et correspond à une distance de mise en danger de personnes d'à peu près 300 m (voir Tableau 3.2-3). Avec une émission spontanée et l'allumage de 20 t de propane liquide, cela donne une distance de mise en danger de personnes en plein air de 225 m (voir Tableau 3.2-3).

3.2.5.5 Évaluation pour le site EKKM

Les liaisons routières les plus proches aux alentours du site sont :

- Autoroute A1 Berne-Lausanne, env. 1.5 km au sud de la centrale
- Route cantonale T1 Berne-Lausanne, à peu près 2 km au sud de la centrale

La ligne ferroviaire la plus proche est la liaison Berne-Neuchâtel, à une distance d'environ 4 km de la KKM. Selon le « Guide de planification Coordination aménagement du territoire et prévention des accidents majeurs le long d'installations ferroviaires importantes » (ARE, 2008)¹ il ne s'agit pas ici d'une installation ferroviaire importante.

L'Aar, qui coule juste à côté du site, est uniquement fréquentée par des bateaux de plaisance.

La distance jusqu'aux routes et lignes ferroviaires est grande, en particulier par le fait que celles-ci passent également encore derrière une colline boisée, de sorte qu'une mise en danger pour le site par des accidents de transport est très improbable.

La demande de permis de construire prendra encore une fois cet aspect en considération.

3.2.6 Transport d'essence

3.2.6.1 Scénario d'accidents majeurs

Le danger potentiel d'une fuite d'essence dépend de la taille de la surface imprégnée, étant donné que seule la partie qui s'évapore est inflammable. En règle générale, l'on admet qu'à peu près 5% d'une fuite spontanée de quantité d'essence brûlent en même temps, en fonction des propriétés de la surface du sol. Pour une explosion, il faut une forte concentration (p.ex. conduite de canalisation). Les répercussions d'accidents lors de transports d'essence se limitent à la taille des surfaces imprégnées et, le cas échéant, des objets concernés par l'incendie. Le rapport directeur sur la Sécurité de citernes fixes de carburants et combustibles liquides [86] contient des descriptions détaillées des scénarios et répercussions possibles.

3.2.6.2 Explosion dans une canalisation

Une explosion dans une canalisation peut, en cas d'utilisations intenses ou en présence d'importantes infrastructures dans les environs, conduire à d'importants dommages.

En raison de son point d'inflammation bas et de sa forte volatilité, l'essence développe principalement avec l'air un mélange de gaz explosif dans la canalisation ou d'autres espaces vides fermés, tels que des galeries de conduite. Lors de l'inflammation du mélange essence-air-gaz, p. ex. par une étincelle électrique, il peut se produire dans les environs immédiats du lieu de l'explosion de fortes pressions d'explosions. Selon la situation de la canalisation concernée, de gros dommages sont possibles en cas de forte densité d'habitations [86].

¹ <http://www.are.admin.ch/dokumentation/publikationen/00017/00291/index.html?lang=de>

3.2.6.3 Évaluation pour le site EKKM

Aucun transport d'essence n'est prévu dans les environs du site de construction. De ce fait, aucune mise en danger du site EKKM n'est à prévoir en raison de transport d'essence.

3.2.7 Transport de chlore

Selon l'OFEV, il n'y a pas de routes fermement prescrites par lesquelles les transports doivent être effectués. La prise en compte de voies de transport optimales relève de la responsabilité personnelle de l'industrie, laquelle s'est déclarée prête par la « Déclaration commune », à minimiser les risques lors du transport par le rail. Les CFF soutiennent l'industrie dans l'organisation de ces voies de transport. Les CFF envoient semestriellement les rapports de monitoring pour contrôle de l'OFT.

Les prescriptions normatives (réglementations nationales et internationales) sont adaptées pour un meilleur aménagement des wagons-citernes. Au 3^e trimestre 2007, environ la moitié des transports de chlore ont été effectués avec des wagons-citernes optimisés. Dès le 2^e trimestre 2008, selon l'OFEV, cette mesure doit être mise en application.

3.2.7.1 Scénario d'accidents majeurs

L'impact mécanique le plus lourd sur un wagon-citerne plein libérerait 55 t de chlore liquide sous pression. Pour une telle avarie, seul un choc frontal ou une chute d'avion peuvent pratiquement entrer en ligne de compte. Pour une importante évaporation spontanée, il faut la plus grande et la plus chaude (p. ex. estivale) surface d'évaporation. Une pulvérisation dans les cailloux et talus plantés réduit la quantité en conséquence. Le nuage chloré peut s'étendre sur plusieurs km², la forme et la direction dépendant du vent et de la topographie.

La probabilité d'une évaporation spontanée d'une importante quantité de chlore est très faible. Par ailleurs, elle est dangereuse pour des personnes en plein air et/ou dans des locaux aérés, mais pas pour les constructions et installations.

Les effets des vapeurs de chlore sont de fortes attaques des voies respiratoires, des muqueuses et des yeux.

3.2.7.2 Évaluation pour le site EKKM

En raison de la distance entre le site et les voies ferrées, l'on peut admettre un certain temps d'alarme et de réaction.

Le scénario n'est pas déterminant pour une évaluation du site. Toutefois, pour la phase de construction et d'exploitation, la pertinence de mise en danger par du gaz chloré doit encore une fois être examinée.

3.3 Météorologie

Les influences du temps sont importantes pour la conception de l'EKKM. Au point de vue de la sécurité, l'intérêt réside du côté des rares, mais très forts événements auxquels la centrale nucléaire doit malgré tout résister. Une difficulté dans l'analyse des enregistrements réside dans le fait, que même sur une durée de 20 années, les successions de données sur le site de Mühleberg sont trop courtes pour évaluer les événements météorologiques extrêmes. À l'aide de statistiques de valeurs extrêmes, les événements extrêmes sont estimés jusqu'à une succession de périodes de 10 000 ans.

3.3.1 Données météorologiques

Pour obtenir la meilleure illustration possible de la météorologie locale, l'on analyse les données de mesure du site de Mühleberg et des stations environnantes. Les stations de mesure sont parties intégrantes du SwissMetNet, le réseau de MétéoSuisse. Les données du SwissMetNet passent par les contrôles de qualité de MétéoSuisse.

Dans les environs immédiats de l'EKKM, les données sont relevées à deux endroits, sur le mât météo dans les environs de la centrale nucléaire existante KKM et sur le mât à faisceau Stockeren sur la hauteur au sud de la centrale nucléaire. Ces séries de données remontent jusqu'en 1987.

Le mât météo Mühleberg, de 110 m de haut, se trouve à environ 800 m ENE de la KKM au fond de la vallée. Les températures de l'air sont mesurées à 10, 60 et 110 m au-dessus du sol, pour le calcul des gradients de température verticaux. Le vent est enregistré à 10 et 110 m au-dessus du sol. Les valeurs (valeurs moyennes du vent et valeurs momentanées de température, voir Tableau 3.3-1) des installations de mesure de la KKM sont transmises toutes les 10 minutes au grand centre de calcul de Météo Suisse à Zurich et en même temps au centre de calcul de la KKM.

Le mât à faisceau Stockeren de 70 m de haut se situe à peu près à 2 km SSE de la KKM sur la colline de Stockeren. Il est équipé d'un anémomètre à 70 m au-dessus du sol. Cet anémomètre se situe juste à 200 m du plus haut niveau du mât météo, de sorte que les cisaillements verticaux de direction du vent peuvent être examinés entre 3 points.

En provenance de la station de Berne-Liebelfeld, l'on dispose d'une succession de données de paramètres météorologiques sur une durée de 150 ans. Cet enregistrement est pris en considération pour le changement du climat sur de longues années dans la région de Mühleberg. La station de Berne a été transférée en 2006 à Berne-Zollikofen. De ce fait, les données sont utilisées seulement jusqu'au moment du transfert.

La station de mesure de Wynau a été choisie en plus pour la présente recherche, cela en vue des mesures de l'humidité relative à Mühleberg qui est semblable à celle de Berne et parce qu'elle se situe également directement au bord de l'Aar. Aucune mesure de l'humidité relative n'est effectuée à Mühleberg.

De plus, des mesures sur la densité des éclairs dans l'ensemble du territoire suisse de Météorage¹ sont disponibles. Celles-ci avaient été rassemblées pour les analyses par Météo Suisse.

Fig. 3.3-1 et Fig. 3.3-2 présentent la situation des installations de mesures météorologiques. Le Tableau 3.3-1 fournit une récapitulation des stations de mesures et des paramètres qui ont été considérés pour les mesures. Le temps de résolution pour la succession de données sur le site de Mühleberg et Stockeren est de 10 minutes. C'est sur cette base qu'ont été calculés les valeurs horaires moyennes pour les paramètres du vent et de la température, ainsi que le total des heures de précipitations. Les valeurs horaires ont été formées à partir des valeurs de 10 minutes * :10 jusqu'à * :00, de sorte que l'on obtienne la moyenne et/ou le total d'heure pleine à heure pleine. Dans le cas de précipitations, le total journalier a été composé à partir des valeurs horaires de 1 :00 jusqu'à 00 :00 CEI, ce qui correspond au total de minuit à minuit. De ces dernières, il a été calculé à nouveau la somme journalière de cinq jours sur 5 valeurs journalières à la suite. Pour les analyses des successions de données de Berne et Wynau, il n'y avait à disposition que les valeurs horaires dans le système de temps de Météo Suisse (* :50-* :40), lesquelles ont été utilisées pour les analyses.

Fig. 3.3-1 : Plan de situation des installations de mesures météorologiques autour de Mühleberg. Le rectangle rouge désigne la centrale nucléaire de Mühleberg, le rond rouge les deux mâts météo (en haut) et le mât à faisceau Stockeren (en bas).



¹ <http://www.meteorage.com/>

Fig. 3.3-2 : Plan de situation des installations de mesures météorologiques à Wynau. Le cercle rouge localise les installations de mesures.



Tableau 3.3-1 : Installations météo. Les données de mesure proviennent des deux stations de mesure dans un rayon de 2 km de la KKM ainsi que des stations de Wynau et Berne. Les données sur la foudre proviennent de Météorage¹.

Installations météo	Mesure	Hauteur de montage des installations de mesures	Période de mesure	Intervalle de temps
Mât météo Mühleberg : Cote : 483 m alt. Coordonnées : 587.85/202.45	Direction du vent, vitesse du vent, pointe des rafales	110 m au-dessus du sol 10 m au-dessus du sol	1987-2007	10 min
	Température de l'air	110 m au-dessus du sol 60 m au-dessus du sol 10 m au-dessus du sol	1987-2007	10 min
	Précipitations	1.5 m au-dessus du sol	1987-2007	10 min
Mât à faisceau Stockeren Cote : 700 m alt. Coordonnées : 588.22/200.10	Direction du vent, vitesse du vent, pointe des rafales	70 m au-dessus du sol	1990-2007	10 min
	Température de l'air	70 m au-dessus du sol	1990-2007	10 min
Wynau BE Cote : 422 m alt. Coordonnées : 626.40/233.85	Température de l'air	2 m au-dessus du sol	1981-2007	1 h
	Humidité relative	2 m au-dessus du sol	1981-2007	1 h
	Direction du vent, vitesse du vent, pointe des rafales	10 m au-dessus du sol	1981-2007	1 h
	Précipitations	1.5 m au-dessus du sol	1981-2007	1 h
Berne-Liebefeld Cote : 453 m alt. Coordonnées : 608, 10/194, 60	Température de l'air	2 m au-dessus du sol	1864-2006 1981-2006	1 jour 1 h
	Humidité relative	2 m au-dessus du sol	1981-2006	1 h
	Direction du	10 m au-dessus	1981-2006	1 h

¹ <http://www.meteorage.com/>

	vent, vitesse du vent, pointe des rafales	du sol		
	Précipitations	1.5 m au-dessus du sol	1864-2006 1981-2006	1 jour 1 h
	Neige		1931-2006	1 jour
Toute la Suisse	Foudre au sol		2000-2007	1 année

Source : Météo Suisse

3.3.2 Systématique

Les paramètres sont aussi bien analysés statistiquement sur leurs valeurs extrêmes mesurées que sur leurs valeurs moyennes et variabilités.

Étant donné que les successions de données sont trop courtes pour faire des déclarations correctes sur les événements rares, l'amplitude des événements extrêmes du temps et leurs périodes répétitives sont déterminées au moyen de statistiques de valeurs extrêmes. Pour ce faire, l'on a appliqué la méthode Blockmax. Pour cela, l'on forme des blocs de temps de l'ensemble des successions de données, à partir desquels alors les extrêmes entrent chaque fois dans la statistique. Comme grandeur de bloc pour les longues successions de données de 150 années de Berne, il a été choisi 1 année. Pour les courtes successions de données à partir de 1981, l'on a calculé avec des maximums mensuels, sinon la statistique devient très petite et l'incertitude très grande.

Une faiblesse de la méthode Blockmax réside dans le fait qu'à l'intérieur d'un bloc, seule la plus haute valeur est mise en évidence, même si plusieurs événements extrêmes se sont déroulés dans le cadre du bloc.

La fonction de distribution du maximum du bloc est soumise à une « generalized extreme value distribution » (loi des valeurs extrêmes, GEV). Elle est définie par les 3 paramètres k (shape), σ (scale) et μ (location). Ces paramètres ainsi que les 95% de l'intervalle de confiance ont été estimés à l'aide du logiciel mathématique MATLAB¹. La fonction de densité de probabilité (probability density function, pdf) $f(x)$ a la forme

$$f(x|k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \cdot e^{-\left(1 + k \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}}$$

Cette fonction est normée de telle façon que la surface résulte sous la courbe 1.

La fonction de distribution cumulée (cdf : cumulative distribution function) $F(X)$ résulte de l'intégration de la la fonction de densité de probabilité de $-\infty$ jusqu'à X pour tous les X . Elle est utilisée pour le calcul des périodes répétitives.

¹ The Mathworks, 2008 : Statistics Toolbox 6, User's Guide

$$F(X) = \int_{-\infty}^X f(x|k, \mu, \sigma) \cdot dx$$

Les périodes répétitives ont été définies à l'aide de la fonction de distribution cumulée $T_{return}(\theta)$; θ désigne ici la valeur répétitive.

$$T_{return}(\theta) = d \cdot \frac{1}{1 - F(\theta)}^1$$

Est donc valable pour la valeur répétitive $\theta(T)$:

$$\theta(T_{return}) = F^{-1}\left(1 - \frac{d}{T_{return}}\right)$$

F représente ici la fonction de distribution cumulée et F^{-1} la fonction de distribution cumulée inverse. Le paramètre d est l'espace de temps entre deux points de mesure. Pour une grandeur de bloc dans la méthode Blockmax de 1 année, $d = 1$ année et pour une grandeur de bloc de 1 mois $d = 1/12$ d'année.

Plus la succession de données est courte, plus grande est l'incertitude et/ ou l'intervalle de confiance pour le calcul des périodes répétitives d'événements rares.

3.3.3 Météorologie locale sur le site de Mühleberg

Les périodes d'observation pour l'étude de la météorologie locale sur le site de Mühleberg sont indiquées dans le Tableau 3.3-1. Dans la période d'observation de 1987-2007, l'on ne constate en général pas de modifications significatives dans les données, les processus météorologiques ne changent que très lentement, et les constantes du temps pour les processus de modification sont beaucoup plus grandes que la période d'observation. Cette déclaration est basée sur les rapports « Windbank oberes Aaretal » [49], « Datenverfügbarkeit und -qualität der ANETZ-Stationen² der Kernanlagen ».

3.3.4 Régime des vents

Rafales de vent

La pointe de rafale correspond à la pointe du vent sur 1 s, comme elle est mesurée dans ANETZ. Les plus fortes rafales surviennent en relation avec les tempêtes durant les mois d'hiver. Par vent d'ouest, les vitesses du vent sont plus élevées que par vent d'est. Le Tableau 3.3-2 indique l'historique des plus fortes rafales de vent durant la période de mesure, le Tableau 3.3-3 les plus fortes rafales enregistrées mensuellement.

¹ M. Mudelsee, 2002, *Statistische Methoden in der Meteorologie – Extremwertverteilungen*, Short Course Notes, et M. Mudelsee, 2007, *Fehlergrenzen von Extremwerten des Wetters* <http://www.manfredmudelsee.com/>

² Réseau automatique d'observation météorologique en Suisse (valeurs moyennes toutes les 10 et 60 min)

Tableau 3.3-2 : Plus fortes rafales de vent enregistrées durant la période de mesure

Lieu	Période	Maximum (année)
Mât météo 10 m au-dessus du sol	1987-2007	28.4 m/s (1999)
Mât météo 110 m au-dessus du sol	1987-2007	41.5 m/s (1999)
Stockeren 70 m au-dessus du sol	1987-2007	50.8 m/s (1999)
Berne 10 m au-dessus du sol	1981 - 2007	37.1 m/s (1999)
Wynau 10 m au-dessus du sol	1981 - 2007	34.3 m/s (1990)

Tableau 3.3-3 : Maximum absolu des rafales de vent (m/s) pour chaque mois durant l'ensemble de la période de mesure

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mât météo 10 m au-dessus du sol	23.4	23.9	22.0	20.9	19.3	20.6	20.7	21.3	18.3	23.1	22.0	28.4
Mât météo 110 m au-dessus du sol	29.2	30.2	28.1	25.2	20.7	29.7	24.1	26.2	32.4	32.0	26.8	41.5
Stockeren 70 m au-dessus du sol	36.8	33.5	32.0	33.0	25.7	31.5	28.9	29.9	26.1	34.1	32.3	50.8
Berne 10 m au-dessus du sol	33.6	30.2	28.5	22.0	22.0	24.5	20.7	27.7	21.1	29.3	25.4	37.1
Wynau 10 m ü. B.	32.2	34.3	27.2	30.2	21.5	27.2	26.3	23.6	23.3	27.6	26.1	30.1

Sur les 74 heures par année avec des pointes de rafale de plus de 20 m/s (72 km/h) sur le Stockeren, 98% sont liées à des vents de SO. Seulement 2% sont liés à des vents du NE.

Les statistiques des valeurs extrêmes de Fig. 3.3-3, Tableau 3.3-4 et Tableau 3.3-5 indiquent qu'il faut compter à Mühleberg au niveau 10 m avec des vents jusqu'à 30 m/s, à 110 m jusqu'à 46 m/s, sur le Stockeren jusqu'à 35 m/s et à Berne et Wynau avec plus de 40 m/s.

Fig. 3.3-3 : GEV - Distribution et histogramme (normé) des pointes de rafales pour Berne 1981-2006, Wynau 1981-2007, Stockeren 1987-2007 et Mühleberg (10 m et 110 m au-dessus du sol) 1987-2007 [m/s]

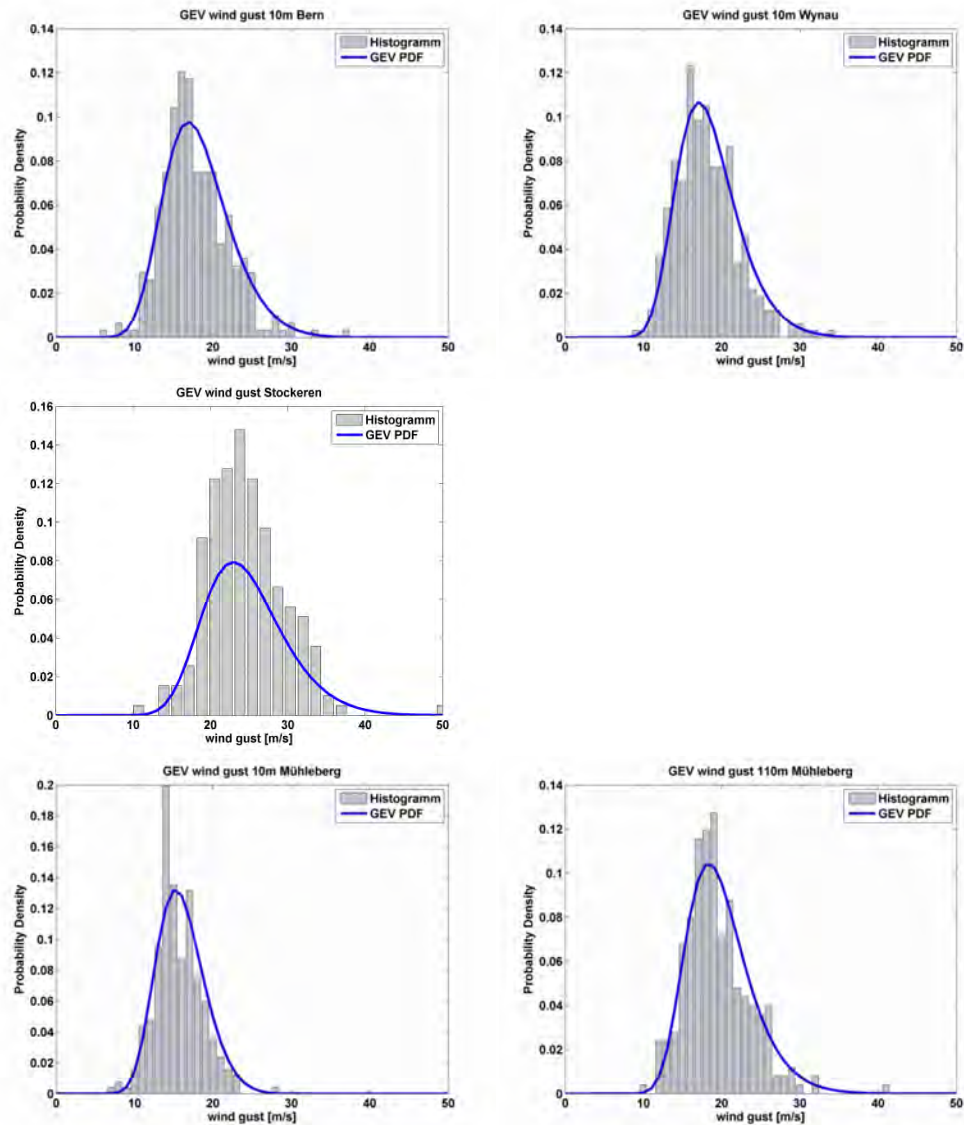


Tableau 3.3-4 : Paramètres de la distribution des GEV de Fig. 3.3-3

Paramètres	Berne	Wynau	Mühleberg 10 m	Mühleberg 110 m	Stockeren
k	-0.1121	-0.0838	-0.1599	-0.0697	-0.1101
σ	3.7863	3.4550	2.8132	3.5258	4.6682
μ	16.3957	16.7760	14.7406	18.0771	22.4048

Tableau 3.3-5 : Pointes maximales de rafales attendues pour les diverses périodes répétitives [m/s]. (KI = Intervalle de confiance)

Berne	50-annuelle	100-annuelle	200-annuelle	1 000-annuelle	10 000-annuelle
Pointes de rafales [m/s]	33.7	34.9	36.1	38.4	41.1
KI 95% [m/s]	[29.6 ; 38.9]	[30.4 ; 40.8]	[31.1 ; 42.7]	[32.5 ; 46.7]	[33.9 ; 51.9]

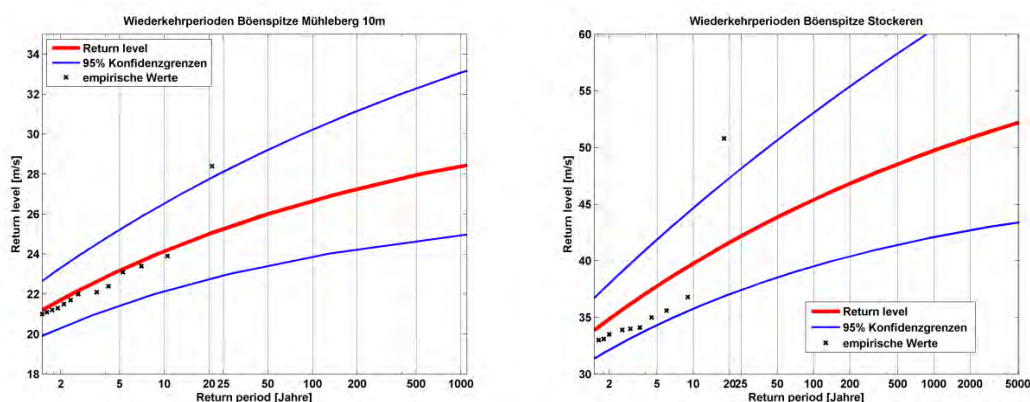
Wynau	50-annuelle	100-annuelle	200-annuelle	1 000-annuelle	10 000-annuelle
Pointes de rafales [m/s]	33.9	35.2	36.5	39.2	42.5
KI 95% [m/s]	[29.3 ; 40.2]	[30.1 ; 42.6]	[30.8 ; 45.0]	[32.1 ; 50.3]	[33.6 ; 57.8]

Mühleberg 10 m	50-annuelle	100-annuelle	200-annuelle	1 000-annuelle	10 000-annuelle
Pointes de rafales [m/s]	26.0	26.7	27.3	28.4	29.6
KI 95% [m/s]	[23.4 ; 29.2]	[23.9 ; 30.2]	[24.3 ; 31.2]	[24.9 ; 33.1]	[25.6 ; 35.3]

Mühleberg 110 m	50-annuelle	100-annuelle	200-annuelle	1 000-annuelle	10 000-annuelle
Pointes de rafales [m/s]	36.3	37.8	39.3	42.4	46.3
KI 95% [m/s]	[31.4 ; 42.8]	[32.3 ; 45.4]	[33.2 ; 47.9]	[34.8 ; 53.8]	[36.7 ; 62.2]

Stockeren	50-annuelle	100-annuelle	200-annuelle	1 000-annuelle	10 000-annuelle
Pointes de rafales [m/s]	43.8	45.4	46.8	49.7	53.1
KI 95% [m/s]	[38.5 ; 50.7]	[39.5 ; 53.1]	[40.4 ; 53.1]	[42.1 ; 60.4]	[43.9 ; 66.8]

Fig. 3.3-4 : Périodes répétitives des pointes de rafales pour Mühleberg 10 m. au-dessus du sol et Stockeren. L'événement record de 1999 avec 28.4 m/s au mât météo 10 m au-dessus du sol à Mühleberg avait une période répétitive de 830 ans. Le même événement au Stockeren avait une période répétitive annuelle de 2 000 ans.



Vitesses du vent

Les plus grandes vitesses surviennent chaque fois durant les mois d'hiver comme l'indiquent les statistiques sur les maximums mensuels et les moyennes des maximums mensuels du Tableau 3.3-6 au Tableau 3.3-9.

Tableau 3.3-6 : Valeurs horaires moyennes de la vitesse du vent (m/s) pour chaque mois durant l'ensemble de la période de mesure

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mât météo 10 m au- dessus du sol	9.6	9.6	9.2	9.2	8.6	7.9	6.6	6.8	6.9	7.8	9.7	10.9
Mât météo 110 m au- dessus du sol	14.9	14.0	13.6	13.9	13.0	12.6	10.2	10.4	10.4	12.5	14.2	18.1
Stockeren 70 m au- dessus du sol	23.6	20.4	18.8	18.5	16.8	15.4	14.6	15.4	14.1	19.2	18.4	27.8
Berne 10 m. ü. B.	13.1	14.5	12.3	9.4	9.3	9.7	8.7	9.3	8.6	11.0	12.0	15.5
Wynau 10 m. au- dessus du sol	11.8	13.2	11.5	13.0	11.1	8.5	8.4	9.1	9.0	10.1	10.6	12.6

Tableau 3.3-7 : Mühleberg 1987-2007 Valeurs moyennes (Mean) et variation standard (Std) des maximums mensuels calculés sur les valeurs horaires du mât météo 10 (m/s)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mean	6.4	6.7	6.8	6.0	5.6	5.3	5.5	5.0	5.3	5.8	5.7	6.1
Std.	1.1	1.2	1.3	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0

Tableau 3.3-8 : Mühleberg 1987-2007 Valeurs moyennes (Mean) et variation standard (Std) des maximums mensuels calculés sur les valeurs horaires du mât météo 110 m au-dessus du sol (m/s)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mean	10.1	10.5	10.3	9.3	8.6	8.6	8.5	7.9	8.5	9.5	9.3	9.9
Std.	1.8	1.9	1.9	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.7	1.9

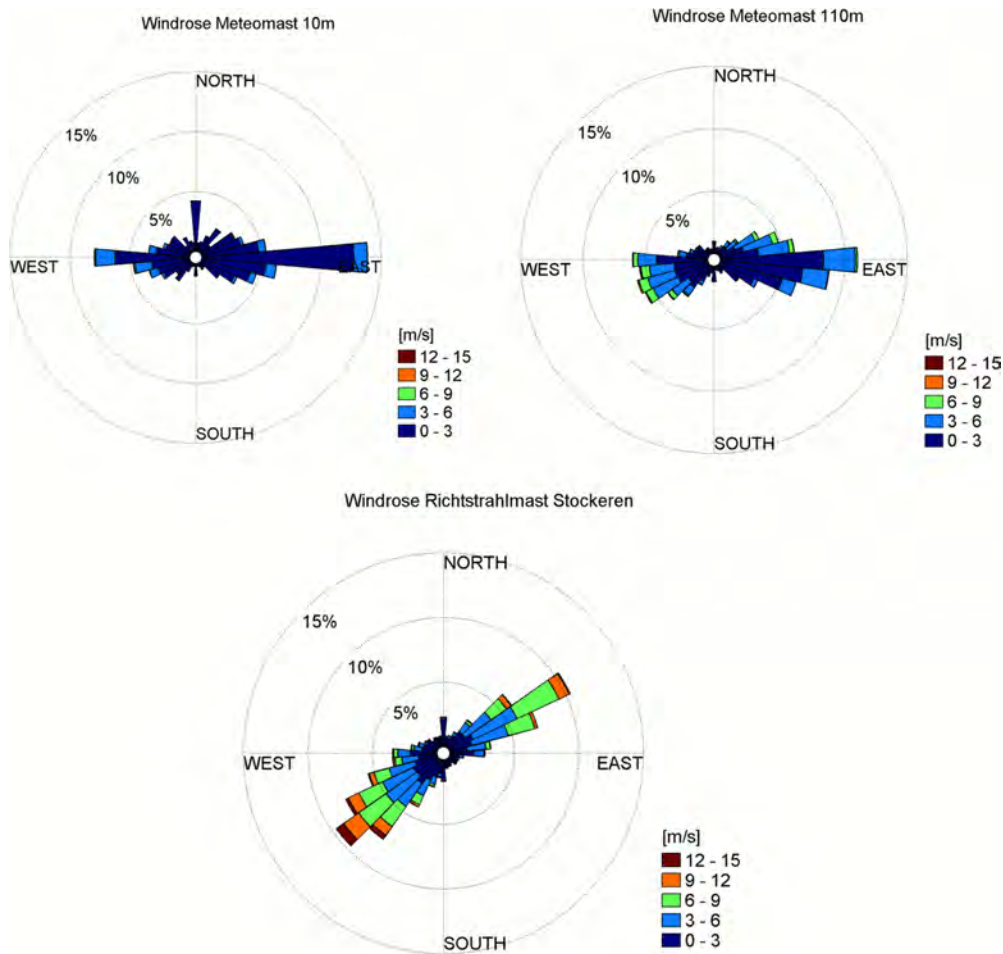
Tableau 3.3-9 : Mühleberg 1987-2007 Valeurs moyennes (Mean) et variation standard (Std) des maximums mensuels calculés sur les valeurs horaires du mât Stockeren 70 m au-dessus du sol (m/s)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mean	16.3	16.1	14.8	13.7	12.7	12.0	11.2	12.0	12.2	14.9	14.5	16.4
Std.	3.3	3.3	3.1	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.6	2.9	2.9	3.3

Directions du vent

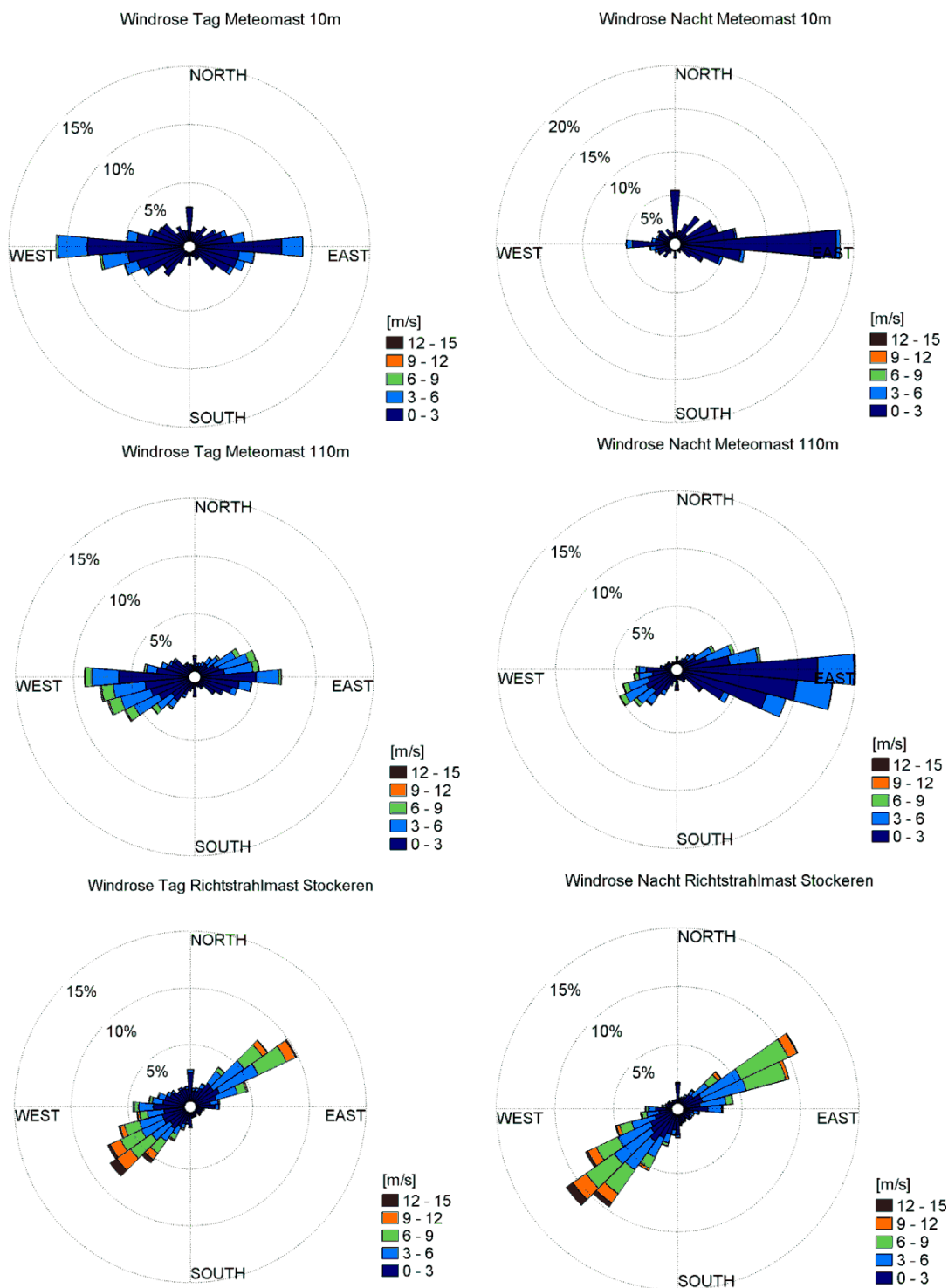
La répartition de direction du vent au mât météo 10 m au-dessus du sol est généralement marquée par des vents d'ouest et d'est (Fig. 3.3-5). Cela peut se justifier par la topographie. La vallée de l'Aar, le lac de Wohlen, la centrale nucléaire et le mât météo ont une orientation ouest-est. À 110 m au-dessus du sol l'on constate une légère influence des vents de sud-ouest. La caractéristique ouest-est reste cependant maintenue. Sur le mât à faisceau Stockeren sur la colline, l'on constate une répartition de direction de vent avec la caractéristique de sud-ouest – Nord-est. Grâce à la topographie, le champ de vent peut tourner de 45° par rapport au mât de Stockeren jusqu'au fond de la vallée près de la centrale nucléaire.

Fig. 3.3-5 : Rose des vents des valeurs moyennes de 10 minutes des mâts météo 10 m et 110 m au-dessus du sol et du mât à faisceau Stockeren



Sur le mât météo, la nuit (19-7 h) les vents d'est dominant, alors que durant la journée (7-19 h) les vents d'ouest dominant légèrement (Fig. 3.3-6).

Fig. 3.3-6 : Rose des vents des valeurs moyennes de 10 minutes des mâts météo 10 (en haut) et 110 m au-dessus du sol (au centre) et mât à faisceau Stockeren (en bas) durant la journée (-7-19 h) (à gauche) et durant la nuit (19-7 h) (à droite)



Calme

Au fond de la vallée, à hauteur du sol près du mât météo, les vents sont affaiblis, de sorte que le calme arrive trois fois plus souvent qu'à 110 m au-dessus du sol ou 5 fois plus souvent qu'au mât Stockeren (voir Tableau 3.3-10). Le calme est défini par une vitesse de vent < 0.5 m/s.

Tableau 3.3-10 : Nombre de mesures de 10 min. par année au mât météo et mât Stockeren avec vent calme

Lieu	Calme
Mât météo 10 m au-dessus du sol	12'284 (23.3%)
Mât météo 110 m au-dessus du sol	4160 (7.9%)
Stockeren 70 m au-dessus du sol	2599 (4.9%)

Tornades

En principe, des tornades peuvent se former en Suisse. Les observations de tornades sont documentées sur Internet sous TorDACH¹ et les archives suisses de tempêtes².

Dans l'analyse des tornades, ces dernières sont divisées en six classes et l'on utilise pour cela l'échelle Fujita. Les dimensions du couloir des dégâts sont reprises d'une étude française [28] :

Tableau 3.3-11 : Classification des tornades

Échelle Fujita	Pointes de rafales supérieures à ¼-mph	Vitesse des rafales 3-Secondes (mph)	Couloir des dégâts (Longueur, largeur)
F0	40 - 72	45 - 78	3.8 km, 70 m
F1	73 - 112	79 - 117	3.8 km, 70 m
F2	113 - 157	118 - 161	5.1 km, 150 m
F3	158 - 207	162 - 209	10.2 km, 320 m
F4	208 - 260	210 - 261	19.2 km, 260 m
F5	261 - 318	262 - 317	19.2 km, 260 m

¹ <http://www.tordach.org/>

² <http://www.sturmarchiv.ch>

Fig. 3.3-7 Carte de la Suisse avec la localisation des observations de tornades. Même si les observations documentées depuis 1890 (Tableau 3.3-12) se rencontrent avant tout dans l'Arc jurassien, du lac Léman au lac de Constance, il n'est pas exclu qu'une tornade puisse aussi se former dans les Alpes.

L'on peut différencier deux situations. D'une part en été par forte convection, lorsque plusieurs cellules orageuses se rassemblent en une super cellule, d'autre part lors de fortes tempêtes d'ouest, lesquelles surviennent avant tout en hiver.

En Suisse, selon Dotzek [92] et selon les prescriptions de l'Autorité de surveillance nucléaire [93], il faut compter avec une fréquence de 2-3 tornades par année. Cela donnerait pour la période de 1890-2008 un nombre de 240-350 tornades. Ces chiffres sont toutefois loin du chiffre des observations documentées (Tableau 3.3-12), mais aujourd'hui, l'on accorde plus d'attention à ce thème et que l'on observe et documente beaucoup plus de tornades. Si l'on considère seulement les 10 dernières années de la période 1999-2008 avec 13 observations et que l'on ajoute encore 15 probabilités, l'on obtient alors une valeur de 2.8 tornades par année, ce qui correspond effectivement à la valeur de Dotzek (2003).

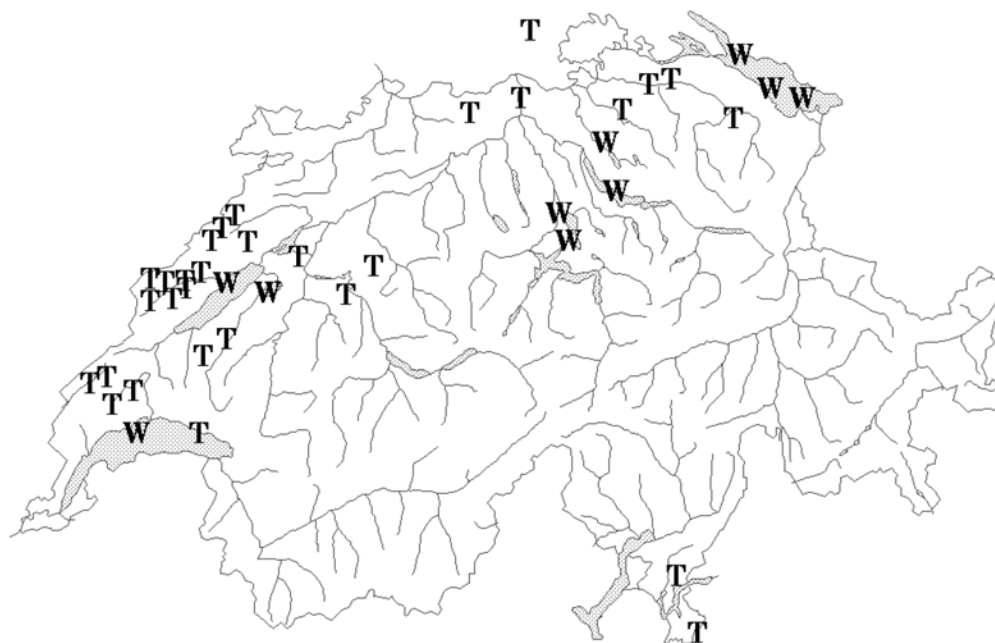
Tableau 3.3-12 : Observations de tornades en Suisse dès 1890-2008. Les probabilités d'événements de tornades ne sont pas répertoriées ici. La fréquence des événements durant ces 10 dernières années se rapporte au fait qu'aujourd'hui, l'on accorde plus d'attention à ce thème et que l'on observe et documente beaucoup plus.

Chiffre	Date	Lieu	Force
1	19.08.1890	Vallée de Joux	F5
2	30.06.1898	Winterthour	
3	19.07.1912	Schönenbaumgarten (TG)	
4	12.06.1926	La-Chaux-de-Fonds	F2
5	04.06.1932	L'isle (VD)	
6	23.08.1934	La-Chaux-de-Fonds	
7	23.07.1939	Bâle	
8	27.08.1956	Marchairuz	F2
9	26.08.1971	Vallée de Joux	F4
10	1972	Sugiez	
11	27.09.1982	Villa Luganese	F2
12	06.07.1986	Gippingen / Koblenz (AG)	F2
13	06.07.1986	Döttingen (AG)	F1
14	10.07.1995	Les Vieux-Prés (NE)	
15	22.07.1995	Oberhofen (AG)	F1
16	06.07.1997	Urtenen-Schönbühl (BE)	
17	05.06.2000	Wetzikon (ZH)	F0
18	07.06.2000	Wetzikon (ZH)	
19	13.06.2000	Triboltingen (TG)	F1
20	20.06.2000	St. Imier (BE)	
21	04.07.2000	Koblenz (AG)	F1
22	07.07.2000	Zäziwil (BE)	F1
23	26.06.2003	Fussach (AUT) Bodensee	F2
24	17.08.2003	Hüttwilen (TG)	F1
25	10.08.2004	Massonens (FR)	F2
26	17.08.2004	Villargiroud (FR)	F1
27	05.07.2005	Gossau (ZH)	F1

Chiffre	Date	Lieu	Force
28	21.08.2005	Pfyn (TG)	F1
29	28.06.2006	Full (AG)	

La mise en danger du site par des tornades est traitée plus précisément au chapitre 3.6.2.22.

Fig. 3.3-7 : Carte de la Suisse¹ : Les observations de tornades- (T) et trombes d'eau- (W) sont indiquées



3.3.5 Température de l'air et humidité relative

Températures de l'air

Les températures extrêmes absolues sont indiquées dans le Tableau 3.3-13. Alors que les maximums ont tous été atteints en été 2003, il y a pour les minimums une grande différence entre Berne et Mühleberg, ce qui s'explique par la différence dans la durée de la succession des données. Cela est valable également pour les valeurs moyennes journalières les plus hautes et les plus basses - (Tableau 3.3-14) et/ou les valeurs moyennes mensuelles Tableau 3.3-15). La température moyenne pour chaque mois atteint 0 °C en hiver jusqu'à 18 °C en été (Tableau 3.3-16).

¹ Rapport de travail de MétéoSuisse N° 226

Tableau 3.3-13 : Températures records à Berne et Mühleberg.

Lieu	Période	Maximum (année)	Minimum (année)
Berne	1864 - 2006	37.0 °C (2003)	-23.0 °C (1929)
Mühleberg 10 m au-dessus du sol	1987 - 2007	36.1 °C (2003)	-14.3 °C (2005)
Mühleberg 60 m au-dessus du sol	1987 - 2007	35.1 °C (2003)	-14.2 °C (2005)
Mühleberg 110 m au-dessus du sol	1987 - 2007	34.7 °C (2003)	-15.6 °C (1991)

Tableau 3.3-14 : Valeurs moyennes journalières de la température - plus hautes / plus basses [°C]

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	
Mât météo 10 m au-dessus du sol 1987-2007	-9.6	-10.0	-8.3	0.9	3.5	7.3	10.2	9.9	4.9	-0.5	-5.7	-10.2	Min
	12.5	11.1	15.7	17.5	21.6	24.7	24.8	26.1	20.9	19.0	12.1	13.2	Max
Mât météo 110 m au-dessus du sol 1987-2007	-10.0	-11.9	-8.5	-0.3	2.6	6.5	9.4	9.6	4.3	-0.8	-8.2	-11.2	Min
	11.7	10.9	15.2	18.8	22.9	26.0	26.2	27.1	23.5	19.1	12.6	12.6	Max
Berne 10 m. au-dessus du sol 1864-2006	-17.3	-20.1	-10.8	-3.3	1.3	3.0	8.4	7.4	2.2	-7.5	-10.4	-15.9	Min
	11.9	12.2	15.4	18.6	23.2	26.0	27.5	26.6	22.4	18.4	15.5	14.0	Max
Wynau 10 m. au-dessus du sol 1981-2007	-18.8	-12.4	-10.1	-1.5	3.8	7.0	10.1	10.3	4.8	-1.8	-7.1	-10.5	Min
	11.2	10.5	15.2	16.9	21.9	25.0	25.5	25.2	21.4	17.7	12.5	11.9	Max

Tableau 3.3-15 : Valeurs moyennes mensuelles de la température - plus hautes / plus basses [°C]

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	
Mât météo 10 m au- dessus du sol 1987-2007	-1.8	-1.9	1.7	6.9	9.5	13.7	15.9	15.0	11.1	6.9	2.1	-0.4	Min
	4.5	5.3	9.0	13.0	14.9	21.5	21.8	21.9	16.6	12.5	7.3	4.0	Max
Mât météo 110 m au- dessus du sol 1987-2007	-2.2	-1.6	1.3	6.5	9.3	13.7	15.7	14.7	10.8	6.6	-0.2	-1.4	Min
	4.2	6.0	8.9	13.7	15.0	21.7	22.0	22.5	16.7	12.7	7.1	3.6	Max
Berne 10 m. au- dessus du sol 1864-2006	-7.0	-8.7	-1.2	4.6	8.3	12.4	14.5	13.5	8.6	3.9	-0.1	-9.7	Min
	3.5	5.6	8.9	12.3	17.7	21.7	22.1	21.9	17.7	13.1	7.2	4.5	Max
Wynau 10 m. au- dessus du sol 1981-2007	-5.7	-4.8	1.6	6.1	9.6	14.1	16.0	15.1	10.8	6.4	1.5	-0.5	Min
	4.3	5.0	8.7	12.6	15.0	22.2	21.7	21.7	16.6	12.5	8.0	3.8	Max

Tableau 3.3-16 : Valeurs moyennes mensuelles de la température [°C]

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mât météo 10 m au- dessus du sol 1987-2007	0.7	1.8	5.5	8.7	13.2	16.3	18.3	18.0	14.0	9.9	4.3	1.4
Mât météo 110 m au- dessus du sol 1987-2007	0.5	1.9	5.4	8.6	13.2	16.2	18.4	18.2	14.0	9.7	3.8	1.1
Berne 10 m. au- dessus du sol 1981-2006	-0.2	0.9	5.1	8.2	12.9	16.3	18.6	18.1	14.0	9.6	3.9	1.1
Wynau 10 m. au- dessus du sol 1981-2007	0.1	0.7	4.8	8.3	13.0	16.4	18.5	17.8	13.9	9.6	4.0	1.3

Les mesures aux mâts météo indiquent par ailleurs que la courbe de température journalière devient plus égale en prenant de la hauteur, et qu'au niveau de 110 m en moyenne les plus basses températures en journée et les plus hautes températures nocturnes sont mesurées. (Tableau 3.3-17).

Tableau 3.3-17 : Moyenne des températures journalières et nocturnes aux mâts météo Mühleberg et sur le mât Stockeren (Données en °C)

Lieu de mesure	Moyenne 7-19 heures	Moyenne 19-7 heures
Mât météo 10 m	11.0	7.8
Mât météo 60 m	10.7	8.0
Mât météo 110 m	10.6	8.1
Stockeren 70 m	9.2	7.7

La répartition saisonnière des maximums mensuels est bimodale. C'est pourquoi, pour la statistique des valeurs extrêmes (Tableau 3.3-18) pour la définition des températures minimums, l'on a seulement considéré le semestre d'hiver, d'octobre à mars et pour les maximums seulement les mois d'été, d'avril jusqu'à septembre.

Les périodes répétitives du Tableau 3.3-19 pourraient se modifier au cours du 21^e siècle en raison du réchauffement climatique (voir chap. 3.3.11).

Tableau 3.3-18 : Paramètres des distributions GEV de la température

Paramètres	Berne 1981-2006 min	Berne 1981-2006 max	Mühleberg 10 m 1987-2007 min	Mühleberg 10 m 1987-2007 max	Mühleberg 110 m 1987-2007 min	Mühleberg 110 m 1987-2007 max
k	-0.2061	-0.3776	-0.3249	-0.3479	-0.3314	-0.3812
σ	4.6556	4.0694	4.3876	3.9173	4.4316	4.0535
μ	4.2174	25.7195	2.9871	25.5709	3.2361	24.7449

Tableau 3.3-19 : Moyenne horaire des températures [°C] les plus basses (min) / les plus hautes (max) attendues pour Berne et Mühleberg pour diverses périodes répétitives. Dans la parenthèse angulaire est indiqué l'intervalle de confiance de 95%.

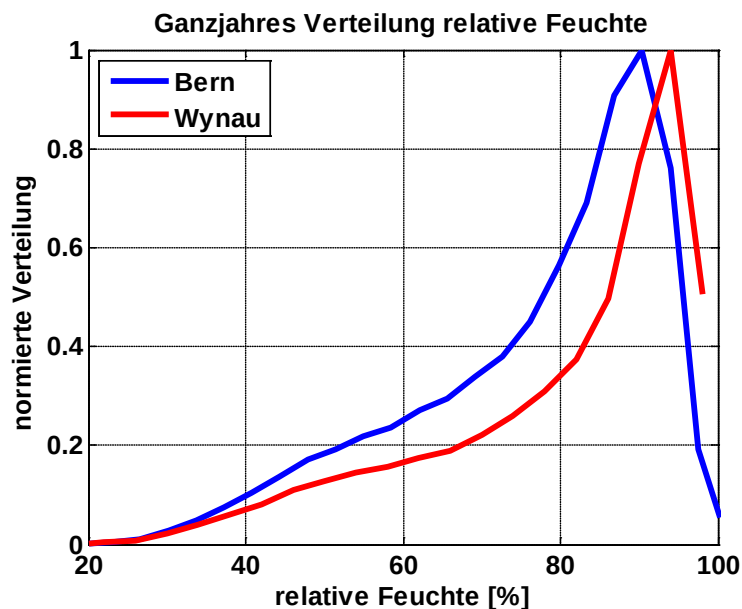
Périodes répétitives	Berne 1981-2006 min	Berne 1981-2006 max	Mühleberg 10 m 1987-2007 min	Mühleberg 10 m 1987-2007 max	Mühleberg 110 m 1987-2007 min	Mühleberg 110 m 1987-2007 max
50 ans	-19.8 [-15.0 ; -26.5]	35.2 [32.5 ; 38.7]	-14.4 [-10.3 ; -20.2]	35.3 [32.1 ; 39.5]	-14.6 [-10.5 ; -20.3]	34.2 [30.9 ; 38.6]
100 ans	-20.8 [-15.5 ; -28.3]	35.5 [32.6 ; 39.2]	-14.8 [-10.5 ; -21.1]	35.6 [32.3 ; 40.2]	-15.0 [-10.7 ; -21.2]	34.5 [31.0 ; 39.2]
200 ans	-21.6 [-15.9 ; -29.9]	35.8 [32.8 ; 39.6]	-15.1 [-10.6 ; -21.9]	35.9 [32.4 ; 40.7]	-15.3 [-10.9 ; -22.0]	34.7 [31.1 ; 39.7]
1 000 ans	-23.0 [-16.5 ; -33.1]	36.1 [32.9 ; 40.3]	-15.7 [-10.8 ; -23.3]	36.3 [32.6 ; 41.6]	-15.9 [-11.1 ; -23.3]	35.0 [31.3 ; 40.5]
10 000 ans	-24.5 [-17.1 ; -36.8]	36.3 [33.0 ; 40.8]	-16.1 [-11.0 ; -24.7]	36.6 [32.7 ; 42.4]	-16.2 [-11.2 ; -24.6]	35.2 [31.3 ; 41.1]

Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air varie localement selon les possibilités d'évaporation dans les environs. L'actuelle centrale nucléaire de Mühleberg se situe directement près de l'Aar, comme la station de Wynau. C'est pourquoi les données de Wynau ont été analysées en plus de la succession de données de Berne (cf. Fig. 3.3-8).

Près de la station de Wynau, l'on enregistre plus souvent des valeurs d'humidité > 90% qu'à la station de Berne. De l'autre côté, Berne arrive aussi à des valeurs > 100%.

Fig. 3.3-8 : Répartition normée de l'humidité relative (la valeur = 1 signifie que cette valeur revient le plus souvent). La courbe pour Wynau finit à 98%. La valeur correspond à la fréquence dans la classe 96-100% alors que la dernière valeur pour Berne indique la fréquence de la classe 99-103%.



3.3.6 Givrage

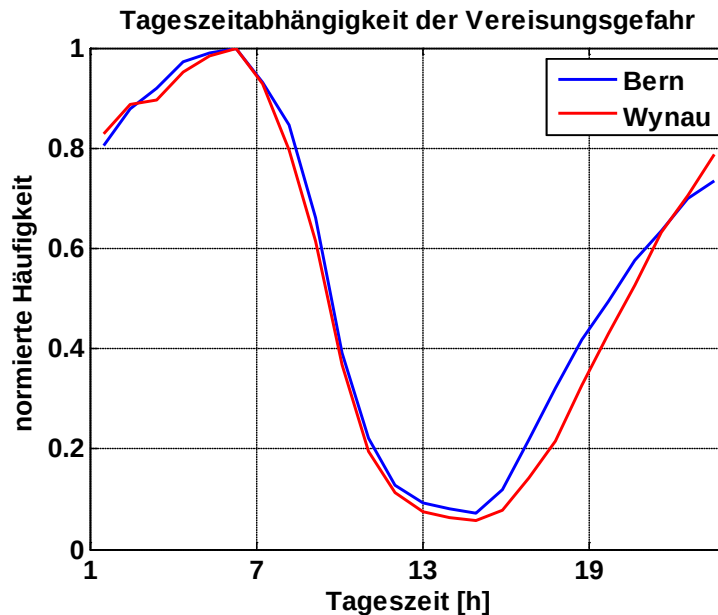
Pour une estimation du danger de givrage, deux conditions ont été prises en compte. D'une part, une température entre -5 et 0 °C et, d'autre part, une humidité relative > 90%. Ces conditions sont atteintes d'octobre à avril. Sur la base des analyses pour Berne et Wynau, il apparaît qu'à Wynau de plus fréquents givrages peuvent survenir par rapport à Berne (voir Tableau 3.3-20).

Tableau 3.3-20 : Nombre mensuel d'heures avec risque de givrage

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Berne	87	46	18	3	0	0	0	0	0	4	41	89
Wynau	103	96	54	12	0	0	0	0	0	6	48	93

Les deux conditions sont soumises également à une forte courbe pendant la journée (cf.Fig. 3.3-9). Le risque le plus grand réside ainsi dans les heures très matinales, alors qu'à midi il est pratiquement nul.

Fig. 3.3-9 : Répartition du risque de givrage en fonction des heures de la journée.



3.3.7 Précipitations

Les deux stations de mesure de Mühleberg et Berne se situent à environ 12 km l'une de l'autre. Le coefficient de corrélation dans la mesure des précipitations est de 0.87. Aux deux endroits, il faut compter avec une quantité de précipitations d'environ 1 000 mm par année. Sur une année, la quantité de précipitations double en été par rapport à l'hiver. Les différences entre Berne et Mühleberg aux plus fortes heures (Tableau 3.3-21 et Tableau 3.3-22) et/ou la quantité de précipitation journalière (Tableau 3.3-21 et Tableau 3.3-22) sont liées à la différence de durée de la succession des données. Les grands événements se trouvent en partie seulement dans les 140 ans de succession de données de Berne, dans la mesure où ils se situent dans la période avant le début des successions de mesures de Mühleberg. Le coefficient de corrélation, le même total annuel et les mêmes valeurs moyennes mensuelles (Tableau 3.3-25 et Tableau 3.3-26) indiquent que le régime de précipitation à Mühleberg et à Berne est semblable. Wynau se situe dans une région un peu plus riche en précipitations avec un total annuel de l'ordre de 15% supérieur à celui de Berne.

Tableau 3.3-21 : Quantité de précipitations la plus forte à l'heure, à Mühleberg, Berne et Wynau (mm)

Lieu	Période	Maximum (année)
Mühleberg	1988 - 2007	22.4 mm (2007)
Berne	1981 - 2006	40.4 mm (1981)
Wynau	1981 - 2007	35.4 mm (1999)

Tableau 3.3-22 : Quantité de précipitations la plus forte à l'heure, à Mühleberg, Berne et Wynau (mm)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mühleberg 1988-2007	6.5	6.5	7.4	9.7	13.1	22.4	21.7	20.3	16.8	12.5	7.6	11.4
Berne 1981-2006	6.8	8.8	10.1	20.9	21.7	34.0	40.4	25.9	23.2	16.9	15.9	8.2
Wynau 1981-2007	9.2	7.8	8.0	9.1	17.2	27.1	29.2	35.4	27.0	29.7	9.1	7.2

Tableau 3.3-23 : Quantité de précipitations la plus forte à la journée Mühleberg, Bern et Wynau (mm)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mühleberg 1988-2007	36.9	38.2	40.3	46.2	55.8	67.6	48.4	75.3	56.2	57.7	46.0	38.0
Berne 1864-2006	52.8	87.9	56.3	56.3	64.9	78.5	66.4	76.3	67.9	88.9	67.9	61.6
Wynau 1981-2007	51.7	72.5	55.5	44.4	46.1	49.0	53.1	78.7	92.3	52.4	51.2	40.8

Tableau 3.3-24 : Quantité de précipitations la plus forte sur cinq jours à Mühleberg, Berne et Wynau (mm)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Mühleberg 1988-2007	76.9	69.7	84.8	91.9	112.8	110.0	93.2	142.3	92.5	83.6	70.1	93.8
Berne 1864-2006	126.4	148.0	119.0	109.6	113.6	137.9	108.3	125.4	123.7	173.0	128.1	92.7
Wynau 1981-2007	99.7	152.6	96.1	94.7	95.6	85.6	82.9	112.6	163.7	92.3	136.2	113.2

Tableau 3.3-25 : Quantité de précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales à Mühleberg (mm)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Min	11.4	8.7	17.1	9.8	27.7	20.4	35.4	9.8	12.3	0.3	11.0	25.6
Moyenne	51.2	55.4	65.5	80.7	99.5	107.2	103.9	108.1	90.7	84.9	72.6	69.7
Max	144.7	114.8	251.2	181.9	219.2	238.0	201.4	261.5	194.5	141.1	185.3	131.1

Tableau 3.3-26 : Quantité de précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales à Berne (mm)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Min	4.7	1.3	4.5	0.0	17.0	20.2	1.2	10.5	0.7	1.8	2.5	0.4
Moyenne	54.8	53.3	64.9	77.9	98.4	112.7	108.7	111.0	90.0	81.6	72.9	64.2
Max	174.4	186.9	303.2	208.8	188.7	276.3	240.8	255.6	252.3	296.6	270.5	194.3

Les périodes répétitives d'événements extrêmes pour les précipitations à l'heure et à la journée ont été rassemblées au moyen d'une « generalized extreme value distribution » (GEV) (cf. Fig. 3.3-10 à Fig. 3.3-12). Les valeurs de précipitation à l'heure pour les périodes répétitives à partir de 1000 ans ont été laissées de côté, dans la mesure où ces valeurs extrêmes dépassent largement la quantité de précipitations quotidienne et les records du monde pour les précipitations à l'heure seraient battus, ce qui n'est pas à prévoir en Suisse. L'extrapolation de la statistique des valeurs extrêmes pour la quantité de précipitations à l'heure est ainsi inutile. Pour une analyse de fortes précipitations, les valeurs extrêmes de la somme journalière de précipitations ont été qualifiées de plus réalistes que celles de la somme des heures. Pour déterminer la répartition des valeurs extrêmes des valeurs journalières pour Berne, l'on a pu se référer à une succession de données temporelles cinq fois plus longues que pour les valeurs des heures. Un triple dépassement de l'événement cinquantenaire de Berne peut être attendu dans la succession de données sur 140 ans, ce qui est réellement le cas et qui est représenté à la Fig. 3.3-13. Les répartitions des valeurs extrêmes des sommes journalières de Berne, Wynau et Mühleberg fournissent des résultats similaires, ce qui plaide en faveur d'un régime de précipitations semblable. Si un événement survenant tous les 10 000 ans se produisait, il tomberait en l'espace d'une journée environ 13% de la somme annuelle de précipitations.

Fig. 3.3-10 : Distribution (GEV) et histogramme (normé) de la quantité de précipitations à l'heure pour Berne 1981-2006 et Mühleberg 1988-2007 [mm]

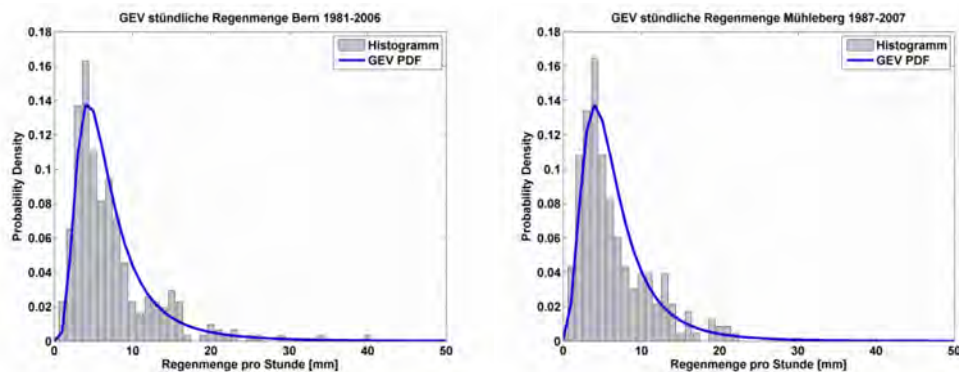


Tableau 3.3-27 : Paramètres des distributions (GEV) de la quantité de précipitations à l'heure de la Fig. 3.3-10

Paramètres	Berne 1981-2006	Mühleberg 1988-2007
k	0.2949	0.2323
σ	2.7485	2.7424
μ	5.0006	4.5782

Tableau 3.3-28 : Plus haute somme à l'heure attendue [mm] pour diverses périodes répétitives

Berne 1981 - 2006	50-annuel	100-annuel	200-annuel
Précipitations [mm]	57.1	71.1	88.2
KI 95% [m/s]	[36.4 ; 93.3]	[42.9 ; 123.3]	[50.3 ; 162.5]

Mühleberg 1988 - 2007	50-annuel	100-annuel	200-annuel
Précipitations [mm]	44.9	54.1	64.8
KI 95% [m/s]	[27.2 ; 78.8]	[30.8 ; 101.5]	[34.8 ; 130.3]

Fig. 3.3-11 : Distribution (GEV) et histogramme (normé) des quantités de précipitations journalières pour Berne 1864-2006, Wynau 1981-2007 et Mühleberg 1988-2007 [mm]

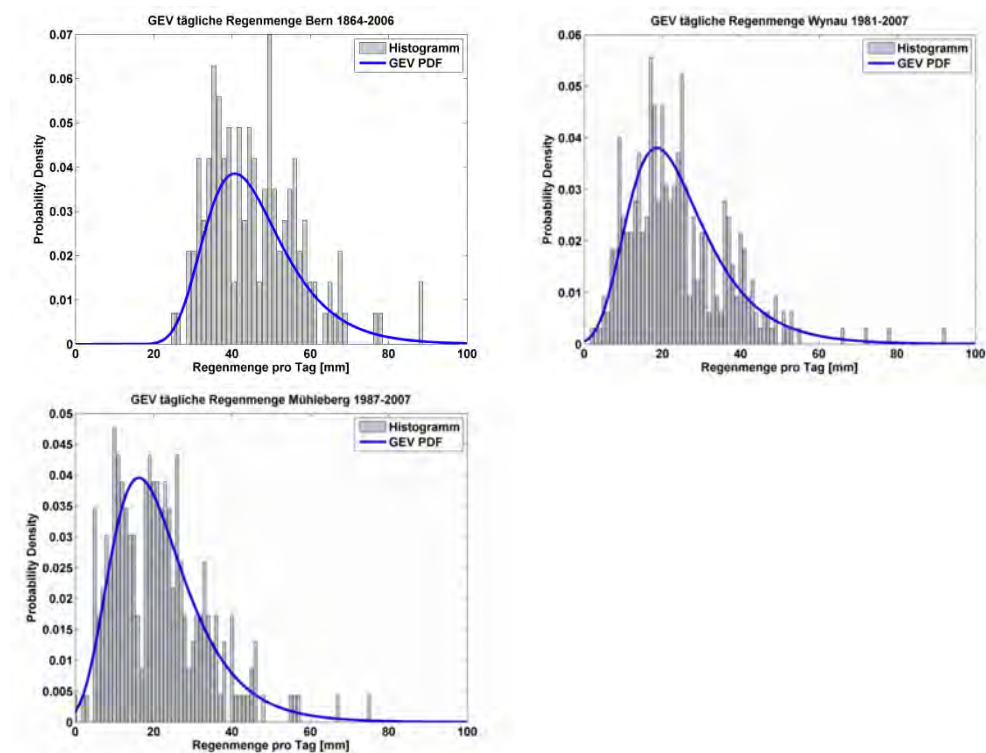


Tableau 3.3-29 : Paramètres de la distribution (GEV) des quantités de précipitations journalières de laFig. 3.3-11

Paramètres	Berne 1864-2006	Wynau 1981-2007	Mühleberg 1988-2007
k	-0.0106	0.0273	0.0182
σ	9.5420	9.6728	9.2910
μ	40.5567	18.7753	16.3743

Tableau 3.3-30 : Plus haute somme journalière attendue [mm] pour diverses périodes répétitives

Berne 1864 - 2006	50-annuel	100-annuel	200-annuel	1 000-annuel	10 000-annuel
Précipitations [mm]	77.0	83.4	89.7	104.1	124.3
KI 95% [m/s]	[63.8 ; 96.7]	[67.0 ; 109.3]	[69.9 ; 123.0]	[75.6 ; 159.5]	[81.8 ; 225.4]

Wynau 1981 - 2007	50-annuel	100-annuel	200-annuel	1 000-annuel	10 000-annuel
Précipitations [mm]	86.4	94.4	102.7	122.4	152.1
KI 95% [m/s]	[65.1 ; 118.4]	[69.3 ; 133.9]	[73.4 ; 150.6]	[82.2 ; 194.6]	[93.5 ; 272.9]

Mühleberg 1988 - 2007	50-annuel	100-annuel	200-annuel	1 000-annuel	10 000-annuel
Précipitations [mm]	79.4	86.7	94.1	111.6	137.5
KI 95% [m/s]	[56.2 ; 117.7]	[59.5 ; 133.9]	[62.6 ; 151.6]	[69.1 ; 198.7]	[77.0 ; 284.3]

Fig. 3.3-12 : Périodes répétitives (ligne rouge) de la somme de précipitation journalière pour Berne (à gauche) et Mühleberg (à droite). La valeur répétitive de 80 mm est attendue 1 fois tous les 50 ans.

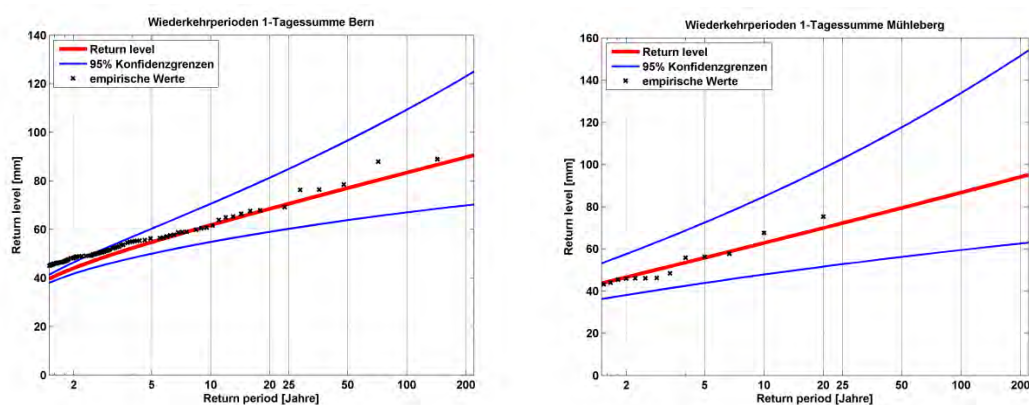
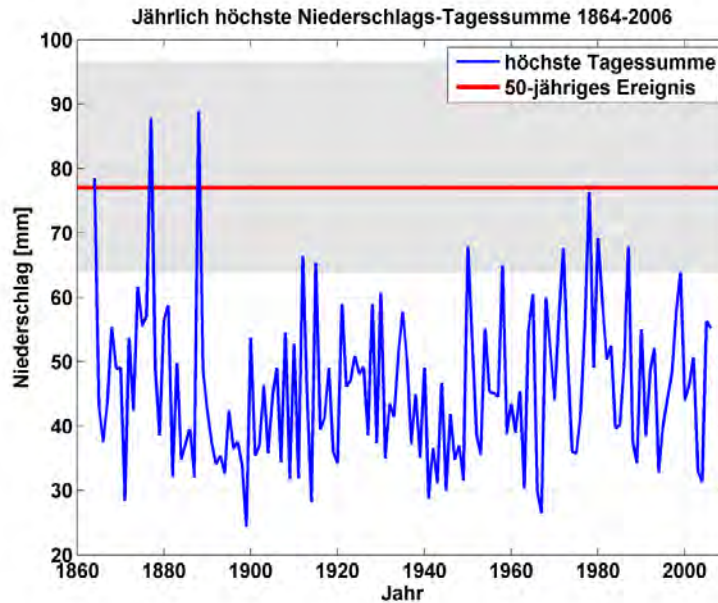


Fig. 3.3-13: La ligne bleue indique la plus forte quantité journalière de précipitations par année de la succession de données de Berne et la ligne rouge l'événement extrême des 50 années. Durant cette statistique de 140 années, il a été dépassé 3 fois. La barre grise correspond à l'intervalle de confiance de 95%.

Fig. 3.3-13 : Plus hautes valeurs annuelles de la quantité de précipitations journalière [mm] et événement tous les 50 ans (rouge) avec intervalle de confiance de 95% (barre grise)



3.3.8 Neige

Pour des données statistiques relatives à la hauteur de la neige, l'on peut se référer à la succession de données de Berne. L'événement de ces 100 dernières années pour la hauteur maximale de neige se situe vers 66 cm et a été dépassé la dernière fois en 1931 avec 95 cm, comme l'indique Fig. 3.3-14 et le Tableau 3.3-31 indique la hauteur globale de la neige ainsi que la pression pour des périodes répétitives jusqu'à 10 000 ans.

Fig. 3.3-14 : Plus grand amoncellement annuel de neige à Berne



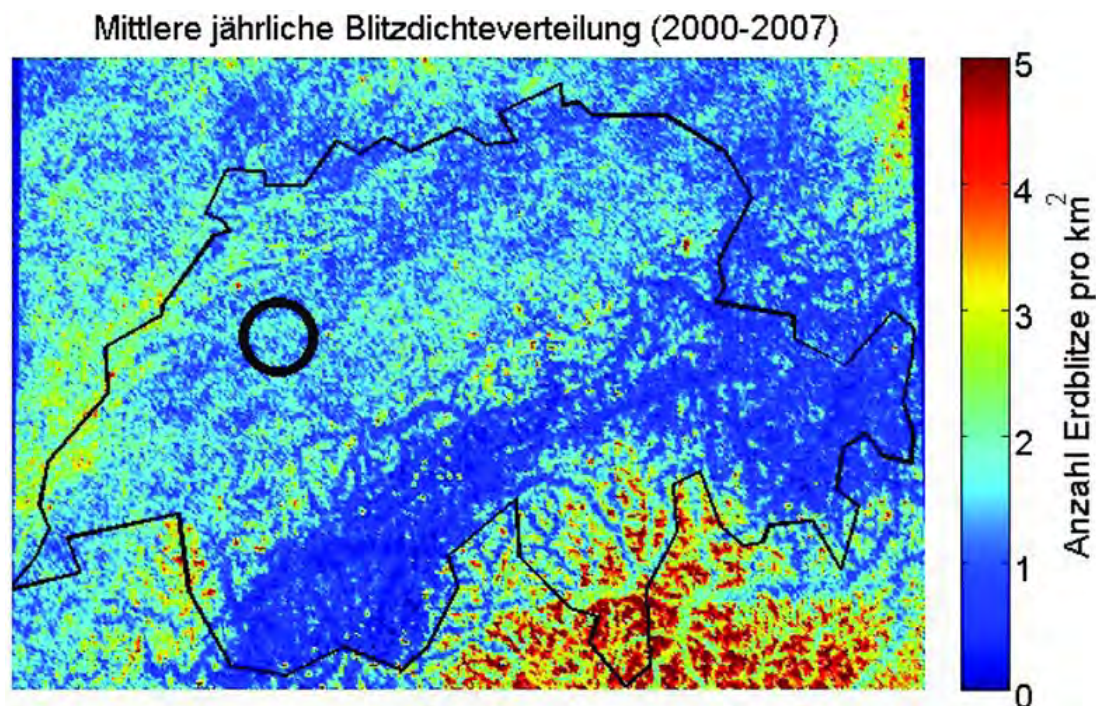
Tableau 3.3-31 : Plus grande hauteur globale de neige attendue [cm] et charge de la neige pour les différentes périodes répétitives (KI = Intervalle de confiance). Pour la charge spatiale moyenne de neige l'on a admis selon [91] 3kN/m^3 .

Berne 1931 - 2006	50-annuel	100-annuel	200-annuel	1 000-annuel	10 000-annuel
Hauteur de neige [cm]	56	66	76	102	149
KI 95% [m/s]	[38 ; 87]	[42 ; 109]	[46 ; 135]	[55 ; 217]	[66 ; 411]
Charge de la neige [kN/m^2]	1.7	2.0	2.3	3.1	4.5

3.3.9 Foudre

La répartition de la densité annuelle moyenne de la foudre en Suisse (Fig. 3.3-15) indique une forte activité (> 5 éclairs par km^2 par année) au Tessin et une augmentation de l'activité sur les hauteurs du Jura et le long de la face nord des Alpes. Le Mittelland est concerné annuellement par 1 à 2 éclairs par km^2 ; la région de Mühleberg enregistre en moyenne 1.5 éclair par km^2 par année. La saison des éclairs dure une demi-année, soit de la mi-avril à la mi-octobre. Durant les mois d'hiver, l'activité est pratiquement nulle.

Fig. 3.3-15 : Moyenne annuelle de la densité d'éclairs en Suisse, éclairs qui atteignent le sol. Le cercle noir situe le site de Mühleberg.



Le site de Mühleberg se situe au bord de l'Aar dans les environs du lac de Wohlen, sur une surface d'environ 0.1 km². Avec une densité d'éclairs annuelle de 1.5 éclairs/km² ce sont par année 0.15 éclairs qui atteindront le site. Cela correspond à une fois tous les 6.7 ans.

3.3.10 Grêle

Selon la carte du risque de grêle de la Société suisse d'assurance contre la grêle, le risque pour les environs de Mühleberg est classé comme légèrement plus élevé¹. Le Tableau 3.3-32 indique le nombre d'années de grêle dans les environs de Mühleberg dans la période de 1961-2004. 1 année de grêle signifie que de la grêle est tombée au moins une fois par an.

En moyenne, les événements de grêle surviennent dans la région tous les 1.3-2.7 ans.

¹ Source : Société suisse d'assurances contre la grêle. <http://www.hagel.ch/>, (État 15.9.2008)

Tableau 3.3-32 : Nombre d'années de grêle dans les environs de Mühleberg durant la période de 1961-2004

Lieu	Nombre d'années de grêle 1961–2004
Berne	25
Mühleberg	31
Frauenkappelen	18
Kallnach	22
Kerzers	28
Laupen	16
Wohlen bei Bern	30

Source : Société suisse d'assurances contre la grêle

3.3.11 Développement attendu, réchauffement du climat

3.3.11.1 Les 150 dernières années

La succession de données homogénéisées [90] de la Fig. 3.3-16 indique pour les deux stations le même déroulement pour les 150 années. La hausse de la température moyenne au 20^e siècle s'élève à peu près à 1.7 °C pour les deux stations. Le fait marquant est la croissance après 1980, avec une hausse de 1 °C en l'espace de 20 ans. En ce qui concerne les quantités de précipitations annuelles (Fig. 3.3-17), il n'a pas été possible jusqu'à présent d'estimer une tendance.

Fig. 3.3-16 : Température moyenne des 150 dernières années à Berne et Bâle. La moyenne mobile indique une croissance claire dans la deuxième moitié du XX^e siècle.

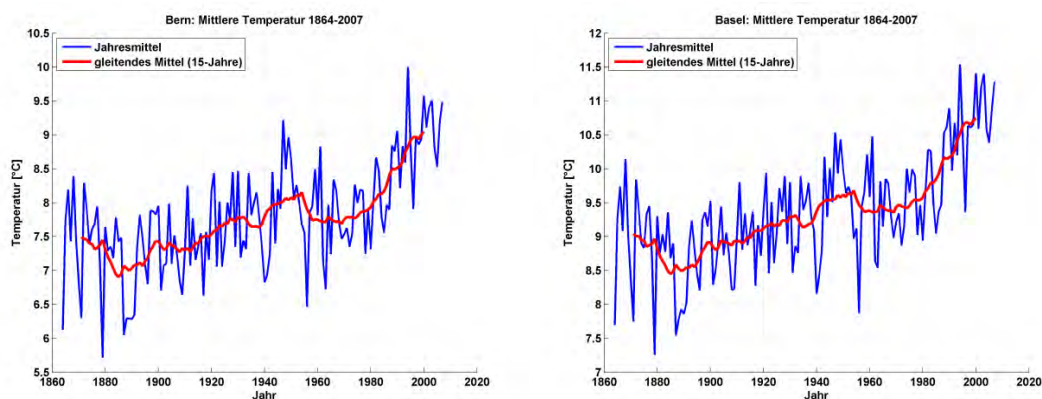
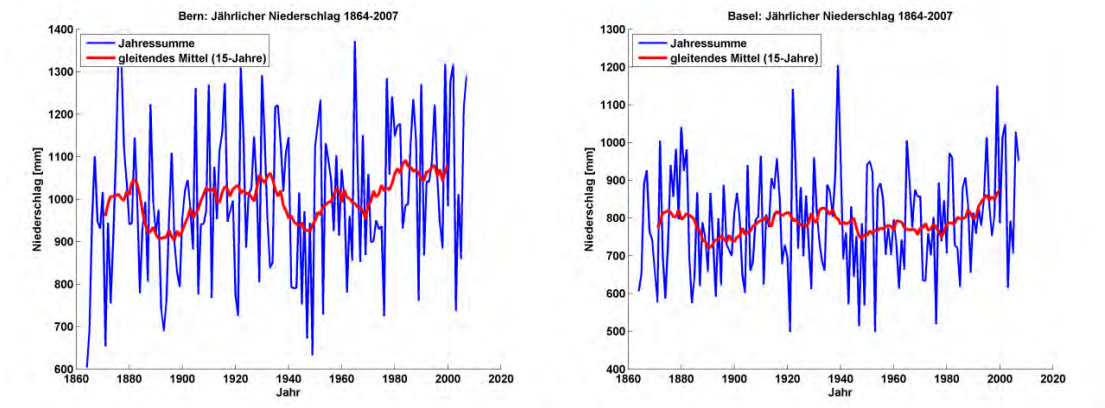


Fig. 3.3-17 : Quantité de précipitations annuelle des 150 dernières années à Berne et Bâle



3.3.11.2 Prévisions climatiques pour le XXI^e siècle

Les modèles climatiques globaux (voir p. ex. [15] ou [38]) laissent supposer, que de 1990 jusqu'en 2100, la température moyenne augmentera globalement d'environ 3.0 °C.

Pour la Suisse, l'on prévoit des étés plus secs et des hivers plus humides. Jusqu'en 2070, les cours des modèles indiquent en moyenne une hausse de la température d'environ 3.8 °C en été et une hausse d'environ 2.6 °C en hiver (voir aussi Tableau 3.3-33). Ce déplacement de la répartition des températures vers le haut entraîne aussi un déplacement des valeurs répétitives des événements tous les 50 ou 100 ans.

Tableau 3.3-33 : Répartition saisonnière de l'augmentation de la température pour les années 2030, 2050 et 2070 par rapport à 1990. La valeur médiane est indiquée et, entre parenthèses, l'intervalle de confiance de 95%. (selon OcCC [15])

Année	Hiver	Printemps	Été	Automne
2030	1.0 °C (0.4-1.8 °C)	0.9 °C(0.4-1.8 °C)	1.4 °C (0.6-2.6 °C)	1.1 °C (0.5-1.8 °C)
2050	1.8 °C (0.9-3.4 °C)	1.8 °C (0.8 bis 3.3 °C)	2.7 °C (1.4-4.7 °C)	2.1 °C (1.1-3.5 °C)
2070	2.6 °C (1.2-4.7 °C)	2.5 °C (1.1- 4.8 °C)	3.8 °C (1.9-7.0 °C)	3.0 °C (1.7-5.2 °C)

L'on s'attend à une hausse des précipitations de plus de 10% en hiver et à une baisse supérieure à 20% en été. Avec la hausse de la température, l'on s'attend aussi à une augmentation de la fréquence de fortes précipitations. Avec le réchauffement, la limite des chutes de neige va aussi augmenter et la fréquence des chutes de neige va diminuer dans le Mittelland. De plus, la neige tombée restera moins longtemps.

En ce qui concerne les forces du vent, la prévision n'est pas sûre, étant donné qu'avec le changement du climat, les couloirs des dépressions changent aussi. Depuis 1930, les fortes dépressions sont devenues plus fréquentes, mais leurs couloirs se sont déplacés vers le nord. Le nombre de jours de fort vent (pointes de rafale > 90 km/h) à Zurich a diminué durant ces 150 dernières années [50]. Le nombre de jours de fort vent (pointes de rafale > 90 km/h) à Zurich a diminué durant ces 150 dernières années [50]. L'évolution est toutefois difficile à interpréter : les modèles climatiques indiquent encore de grandes incertitudes. D'une part, l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère agit de manière renforcée sur l'intensité et la fréquence des dépressions cycloniques et, d'autre part, les contrastes de température entre l'Arctique et les régions tropicales deviennent plus restreints et tout comme le potentiel pour la formation de fortes dépressions.

Pour les tornades, aucune déclaration précise ne peut se faire sur le développement de leur activité en Suisse, dans la mesure où les caractéristiques de situation des orages changent d'année en année.

3.3.12 Classes de propagation pour le site de Mühleberg

La définition des classes de propagation a été effectuée selon le document KTA 1508 [89]. Les catégories de diffusion A-F ont été définies à l'aide du gradient de température et de la vitesse moyenne à une hauteur de 10 m selon le tableau 7-2 du document cité KTA 1508.

Dans les Tableaux 3.3-34 à Tableau 3.3-37 l'on peut voir que la catégorie D prédomine plus d'un tiers du temps. Cela est aussi le cas dans la répartition mensuelle. C'est seulement durant les heures de nuit du printemps jusqu'à l'automne que les catégories E et F prédominent.

Tableau 3.3-34 : Fréquence des catégories de diffusion A-F. De 2/1987 jusqu'à 12/2007, chaque heure a été comptée

Classe	Nombre d'heures 1987-2007	Part en pourcent
Classe A :	12632	6.90%
Classe B :	7678	4.20%
Classe C :	18655	10.20%
Classe D :	68882	37.60%
Classe E :	36741	20.00%
Classe F :	36640	20.00%
Valeurs mesurées manquantes	2107	1.10%

Tableau 3.3-35 : Nombre d'heures par mois selon la classe de diffusion entre 2/1987 et 12/2007

Classe	A	B	C	D	E	F	Valeurs manquantes
Janvier	890	393	1289	6805	3235	2205	63
Février	452	342	1292	6188	2818	3111	28
Mars	1552	558	1939	5634	2528	3388	25
Avril	1150	970	2131	5136	2423	3297	13
Mai	1759	1001	2038	4773	2650	3357	46
Juin	1667	902	1653	4742	2785	3283	88
Juillet	1177	929	1667	4629	3043	3734	445
Août	1060	757	1356	4397	3130	4409	515
Septembre	638	595	1375	5098	3490	3582	342
Octobre	786	487	1276	6457	3772	2728	118
Novembre	826	320	1173	7100	3506	1795	400
Décembre	675	424	1466	7923	3361	1751	24

Tableau 3.3-36 : Nombre d'heures moyen par mois selon la classe de diffusion durant la journée (6-18 UTC)

Classe	A	B	C	D	E	F
Janvier	27	14	42	181	73	34
Février	16	13	47	169	55	37
Mars	48	25	80	161	37	21
Avril	52	43	91	141	24	10
Mai	76	44	89	136	22	6
Juin	72	42	74	146	21	5
Juillet	54	43	76	156	29	7
Août	48	36	62	156	41	23
Septembre	29	28	62	162	51	23
Octobre	32	22	54	178	59	26
Novembre	25	13	43	190	60	21
Décembre	20	14	43	200	70	25

Tableau 3.3-37 : Nombre d'heures moyen par mois selon la classe de diffusion durant la nuit (18-6 UTC)

Classe	A	B	C	D	E	F
Janvier	18	6	22	160	89	76
Février	5	4	14	125	79	111
Mars	26	2	12	107	84	141
Avril	3	3	11	104	91	147
Mai	8	4	8	92	105	154
Juin	7	1	5	80	111	151
Juillet	2	2	3	64	116	170
Août	3	1	3	53	108	187
Septembre	1	0	3	81	116	148
Octobre	5	1	6	130	121	104
Novembre	14	2	13	148	107	65
Décembre	12	6	27	178	90	58

La quadruple paramétrie de la statistique de propagation se base sur les données des années 1989–2007 étant donné que, pour les précipitations, des données sont seulement disponibles depuis octobre 1988. Les valeurs indiquées dans les tableaux correspondent au nombre d'heures [h] pour la période allant de 1989-2007. (Tableau 3.3-38 jusqu'au Tableau 3.3-61).

Tableau 3.3-38 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion A

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
A	15-45	94	94	59	46	7	0	0	0	0	0	300	0.2
A	45-75	95	98	151	139	34	3	0	0	0	0	520	0.3
A	75-105	173	279	299	441	199	20	1	0	0	0	1412	0.8
A	105-135	187	405	283	177	18	0	0	0	0	0	1070	0.6
A	135-165	119	188	61	1	0	0	0	0	0	0	369	0.2
A	165-195	127	62	4	6	1	0	0	0	0	0	200	0.1
A	195-225	297	191	23	9	1	0	0	0	0	0	521	0.3
A	225-255	611	1053	241	116	19	4	0	0	0	0	2044	1.2
A	255-285	389	1114	615	463	152	26	0	0	0	0	2759	1.7
A	285-315	204	352	160	102	22	0	0	0	0	0	840	0.5
A	315-345	130	132	78	31	2	1	0	0	0	0	374	0.2
A	345-15	154	133	84	41	5	0	0	0	0	0	417	0.3
Somme		2580	4101	2058	1572	460	54	1	0	0	0		
%		1.5	2.5	1.2	0.9	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-39 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion B

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
B	15-45	51	57	49	53	3	0	0	0	0	0	213	0.1
B	45-75	84	73	95	163	31	4	2	0	0	0	452	0.3
B	75-105	113	182	203	366	74	14	0	0	0	0	952	0.6
B	105-135	126	240	223	122	5	0	0	0	0	0	716	0.4
B	135-165	71	81	17	2	0	0	0	0	0	0	171	0.1
B	165-195	58	44	2	0	0	0	0	0	0	0	104	0.1
B	195-225	119	69	13	2	1	0	0	0	0	0	204	0.1
B	225-255	266	369	141	119	22	3	0	0	0	0	920	0.6
B	255-285	230	599	414	495	91	22	4	0	0	0	1855	1.1
B	285-315	135	196	98	74	6	0	0	0	0	0	509	0.3
B	315-345	78	82	57	30	9	0	0	0	0	0	256	0.2
B	345-15	58	49	33	25	5	1	0	0	0	0	171	0.1
Somme		1389	2041	1345	1451	247	44	6	0	0	0		
%		0.8	1.2	0.8	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-40 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion C

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]										Total	%
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18		
C	15-45	91	83	96	150	17	1	0	0	0	0	438	0.3
C	45-75	125	146	178	541	295	33	2	0	0	0	1320	0.8
C	75-105	190	350	592	2056	1314	202	1	0	0	0	4705	2.8
C	105-135	214	407	456	446	44	1	0	0	0	0	1568	0.9
C	135-165	110	92	24	4	0	0	1	0	0	0	231	0.1
C	165-195	64	43	3	2	0	0	0	0	0	0	112	0.1
C	195-225	117	74	13	8	0	0	0	0	0	0	212	0.1
C	225-255	318	369	149	293	188	60	6	0	0	0	1383	0.8
C	255-285	321	623	551	1315	943	169	17	2	0	0	3941	2.4
C	285-315	177	222	158	133	33	0	0	0	0	0	723	0.4
C	315-345	117	117	63	70	20	0	0	0	0	0	387	0.2
C	345-15	107	75	55	90	18	3	0	0	0	0	348	0.2
Somme		1951	2601	2338	5108	2872	469	27	2	0	0		
%		1.2	1.6	1.4	3.1	1.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-41 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion D

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]										Total	%
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18		
D	15-45	508	343	246	265	34	3	0	0	0	0	1399	0.8
D	45-75	703	641	520	892	295	44	2	0	0	0	3097	1.9
D	75-105	1137	1927	2214	4283	2129	332	22	0	0	0	12044	7.2
D	105-135	1171	1646	1431	1406	261	17	0	0	0	0	5932	3.6
D	135-165	472	253	63	7	0	0	1	0	0	0	796	0.5
D	165-195	349	154	24	4	2	0	0	0	0	0	533	0.3
D	195-225	870	334	56	53	4	0	0	0	0	0	1317	0.8
D	225-255	1883	1242	449	893	490	197	65	2	0	0	5221	3.1
D	255-285	1214	1584	1374	3910	2634	956	190	30	0	0	11892	7.1
D	285-315	660	786	784	1128	218	14	0	0	0	0	3590	2.2
D	315-345	568	416	317	195	31	9	0	0	0	0	1536	0.9
D	345-15	700	384	254	185	18	1	0	0	0	0	1542	0.9
Somme		10235	9710	7732	13221	6116	1573	280	32	0	0		
%		6.1	5.8	4.6	7.9	3.7	0.9	0.2	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-42 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion E

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
E	15-45	486	511	314	108	6	0	0	0	0	0	1425	0.9
E	45-75	788	1083	696	361	33	2	0	0	0	0	2963	1.8
E	75-105	1902	3240	3171	2121	232	10	0	0	0	0	10676	6.4
E	105-135	932	1125	730	366	67	0	0	0	0	0	3220	1.9
E	135-165	179	137	49	18	0	0	0	0	0	0	383	0.2
E	165-195	140	108	37	13	0	0	0	0	0	0	298	0.2
E	195-225	463	222	68	36	0	0	0	0	0	0	789	0.5
E	225-255	893	634	229	107	26	5	6	0	0	0	1900	1.1
E	255-285	530	524	401	556	105	24	2	0	0	0	2142	1.3
E	285-315	391	426	455	362	17	1	0	0	0	0	1652	1.0
E	315-345	548	461	359	148	0	0	0	0	0	0	1516	0.9
E	345-15	850	733	471	119	3	1	0	0	0	0	2177	1.3
Somme		8102	9204	6980	4315	489	43	8	0	0	0		
%		4.9	5.5	4.2	2.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-43 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion F

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
F	15-45	368	537	512	249	1	0	0	0	0	0	1667	1.0
F	45-75	1323	2265	2535	933	14	0	0	0	0	0	7070	4.2
F	75-105	3762	5394	5150	3216	101	0	0	0	0	0	17623	10.6
F	105-135	240	372	405	297	11	0	0	0	0	0	1325	0.8
F	135-165	58	71	46	15	1	0	0	0	0	0	191	0.1
F	165-195	44	47	38	15	0	0	0	0	0	0	144	0.1
F	195-225	111	70	56	28	0	0	0	0	0	0	265	0.2
F	225-255	249	214	170	100	3	0	0	0	0	0	736	0.4
F	255-285	180	204	163	117	18	1	0	0	0	0	683	0.4
F	285-315	171	170	161	110	4	0	0	0	0	0	616	0.4
F	315-345	237	226	171	104	1	0	0	0	0	0	739	0.4
F	345-15	538	584	426	198	3	0	0	0	0	0	1749	1.1
Somme		7281	10154	9833	5382	157	1	0	0	0	0		
%		4.4	6.1	5.9	3.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-44 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion A

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
A	15-45	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	15	0.0
A	45-75	5	4	5	4	3	0	0	0	0	0	21	0.0
A	75-105	27	33	18	9	3	2	0	0	0	0	92	0.1
A	105-135	14	19	11	6	0	0	0	0	0	0	50	0.0
A	135-165	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	9	0.0
A	165-195	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0.0
A	195-225	4	1	2	2	0	0	0	0	0	0	9	0.0
A	225-255	10	18	10	17	5	3	0	0	0	0	63	0.0
A	255-285	12	22	41	69	44	8	0	0	0	0	196	0.1
A	285-315	9	8	16	35	3	1	0	0	0	0	72	0.0
A	315-345	4	7	12	2	0	0	0	0	0	0	25	0.0
A	345-15	2	11	4	0	1	0	0	0	0	0	18	0.0
Somme		99	133	124	144	59	14	0	0	0	0		
%		0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-45 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion B

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
B	15-45	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	5	0.0
B	45-75	1	2	1	0	0	0	2	0	0	0	6	0.0
B	75-105	3	12	16	13	0	0	0	0	0	0	44	0.0
B	105-135	3	7	9	2	0	0	0	0	0	0	21	0.0
B	135-165	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
B	165-195	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
B	195-225	1	5	1	1	0	0	0	0	0	0	8	0.0
B	225-255	6	11	17	25	8	1	0	0	0	0	68	0.0
B	255-285	5	20	28	47	14	7	1	0	0	0	122	0.1
B	285-315	6	15	7	10	2	2	0	0	0	0	42	0.0
B	315-345	2	2	3	2	1	0	0	0	0	0	10	0.0
B	345-15	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	6	0.0
Somme		33	78	83	103	26	10	3	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-46 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion C

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
C	15-45	2	2	3	0	0	0	0	0	0	0	7	0.0
C	45-75	7	3	3	6	0	0	0	0	0	0	19	0.0
C	75-105	8	25	20	46	20	1	0	0	0	0	120	0.1
C	105-135	10	24	18	15	2	0	0	0	0	0	69	0.0
C	135-165	5	1	1	0	0	0	1	0	0	0	8	0.0
C	165-195	6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	9	0.0
C	195-225	6	4	2	2	0	0	0	0	0	0	14	0.0
C	225-255	7	13	15	39	32	14	5	0	0	0	125	0.1
C	255-285	21	33	43	181	149	49	6	0	0	0	482	0.3
C	285-315	14	16	19	20	7	1	0	0	0	0	77	0.0
C	315-345	5	10	4	3	1	0	0	0	0	0	23	0.0
C	345-15	6	6	5	1	2	0	0	0	0	0	20	0.0
Somme		97	138	134	314	213	65	12	0	0	0		
%		0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-47 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : Précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion D

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
D	15-45	58	55	22	10	2	0	0	0	0	0	147	0.1
D	45-75	71	90	42	26	2	0	0	0	0	0	231	0.1
D	75-105	151	297	224	224	30	6	0	0	1	0	933	0.6
D	105-135	168	220	111	69	5	0	0	0	0	0	573	0.3
D	135-165	38	24	11	0	0	0	0	0	0	0	73	0.0
D	165-195	18	11	10	6	0	0	0	0	0	0	45	0.0
D	195-225	46	29	10	9	1	0	0	0	0	0	95	0.1
D	225-255	132	77	73	134	89	32	17	2	0	0	556	0.3
D	255-285	93	161	304	966	696	205	67	9	0	0	2501	1.5
D	285-315	59	143	282	491	151	24	0	0	0	0	1150	0.7
D	315-345	52	129	133	48	3	0	0	0	0	0	365	0.2
D	345-15	119	124	58	28	5	0	0	0	0	0	334	0.2
Somme		1005	1360	1280	2011	984	267	84	11	1	0		
%		0.6	0.8	0.8	1.2	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-48 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion E

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
E	15-45	39	65	27	12	1	0	0	0	0	0	144	0.1
E	45-75	72	90	40	11	0	0	0	0	0	0	213	0.1
E	75-105	248	308	163	50	4	0	0	0	0	0	773	0.5
E	105-135	151	187	84	17	1	0	0	0	0	0	440	0.3
E	135-165	25	18	11	3	0	0	0	0	0	0	57	0.0
E	165-195	11	10	6	3	0	0	0	0	0	0	30	0.0
E	195-225	11	19	6	2	0	0	0	0	0	0	38	0.0
E	225-255	40	34	31	17	1	1	1	0	0	0	125	0.1
E	255-285	51	54	61	85	19	2	0	0	0	0	272	0.2
E	285-315	17	36	67	73	3	0	0	0	0	0	196	0.1
E	315-345	37	44	50	27	0	0	0	0	0	0	158	0.1
E	345-15	87	78	55	12	0	0	0	0	0	0	232	0.1
Somme		789	943	601	312	29	3	1	0	0	0		
%		0.5	0.6	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-49 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion F

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
F	15-45	6	9	6	2	0	0	0	0	0	0	23	0.0
F	45-75	23	21	8	5	0	0	0	0	0	0	57	0.0
F	75-105	110	112	48	16	0	0	0	0	0	0	286	0.2
F	105-135	15	25	14	11	0	0	0	0	0	0	65	0.0
F	135-165	2	3	1	2	0	0	0	0	0	0	8	0.0
F	165-195	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
F	195-225	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0	8	0.0
F	225-255	3	5	6	4	0	0	0	0	0	0	18	0.0
F	255-285	1	7	8	8	2	0	0	0	0	0	26	0.0
F	285-315	0	3	5	5	0	0	0	0	0	0	13	0.0
F	315-345	0	5	2	6	0	0	0	0	0	0	13	0.0
F	345-15	4	8	9	6	0	0	0	0	0	0	27	0.0
Somme		166	201	110	66	2	0	0	0	0	0		
%		0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-50 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion A

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
A	15-45	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	8	0.0
A	45-75	3	4	4	9	4	0	1	0	0	0	25	0.0
A	75-105	7	17	15	4	1	0	0	0	0	0	44	0.0
A	105-135	8	11	15	2	0	0	0	0	0	0	36	0.0
A	135-165	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	7	0.0
A	165-195	1	3	2	0	0	0	0	0	0	0	6	0.0
A	195-225	2	1	2	3	0	0	0	0	0	0	8	0.0
A	225-255	7	7	14	17	4	3	0	0	0	0	52	0.0
A	255-285	4	5	24	81	35	7	0	0	0	0	156	0.1
A	285-315	3	11	16	20	1	0	0	0	0	0	51	0.0
A	315-345	4	4	7	1	1	0	0	0	0	0	17	0.0
A	345-15	9	7	1	1	1	0	0	0	0	0	19	0.0
Somme		50	80	101	140	47	10	1	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-51 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion B

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
B	15-45	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.0
B	45-75	2	0	3	3	0	1	1	0	0	0	10	0.0
B	75-105	2	1	7	2	0	0	0	1	0	0	13	0.0
B	105-135	1	6	5	0	0	0	0	0	0	0	12	0.0
B	135-165	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.0
B	165-195	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
B	195-225	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0.0
B	225-255	2	6	2	16	5	0	1	0	0	0	32	0.0
B	255-285	3	6	13	41	21	7	4	0	0	0	95	0.1
B	285-315	1	7	13	7	3	1	0	0	0	0	32	0.0
B	315-345	3	4	2	2	0	0	0	0	0	0	11	0.0
B	345-15	1	4	5	1	0	0	0	0	0	0	11	0.0
Somme		17	37	50	75	29	9	6	1	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-52 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion C

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
C	15-45	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	10	0.0
C	45-75	3	5	2	2	0	0	0	0	0	0	12	0.0
C	75-105	4	10	15	14	5	0	0	0	0	0	48	0.0
C	105-135	7	11	8	11	0	0	0	0	0	0	37	0.0
C	135-165	4	2	0	2	0	0	0	0	0	0	8	0.0
C	165-195	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	5	0.0
C	195-225	3	3	1	4	0	0	0	0	0	0	11	0.0
C	225-255	4	6	11	28	13	12	6	0	0	0	80	0.0
C	255-285	8	11	40	148	114	45	11	0	0	0	377	0.2
C	285-315	4	11	12	31	10	7	0	0	0	0	75	0.0
C	315-345	2	3	0	2	1	1	0	0	0	0	9	0.0
C	345-15	3	4	3	2	2	0	0	0	0	0	14	0.0
Somme		48	70	95	246	145	65	17	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-53 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion D

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
D	15-45	30	46	21	5	1	0	0	0	0	0	103	0.1
D	45-75	42	62	12	10	0	0	0	0	0	0	126	0.1
D	75-105	72	153	121	103	19	1	0	0	0	1	470	0.3
D	105-135	81	136	76	57	8	0	0	0	0	0	358	0.2
D	135-165	18	27	1	4	1	0	0	0	0	0	51	0.0
D	165-195	13	11	7	4	0	0	0	0	0	0	35	0.0
D	195-225	28	29	22	5	1	0	0	0	0	0	85	0.1
D	225-255	75	71	81	142	37	15	9	1	0	0	431	0.3
D	255-285	57	136	253	750	485	196	66	5	1	0	1949	1.2
D	285-315	24	108	242	368	110	14	0	0	0	0	866	0.5
D	315-345	28	80	86	37	3	0	0	0	0	0	234	0.1
D	345-15	48	94	56	15	3	0	0	0	0	0	216	0.1
Somme		516	953	978	1500	668	226	75	6	1	1		
%		0.3	0.6	0.6	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-54 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion E

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
E	15-45	9	28	18	3	0	0	0	0	0	0	58	0.0
E	45-75	22	53	21	6	0	0	0	0	0	0	102	0.1
E	75-105	104	125	59	31	2	0	0	0	0	0	321	0.2
E	105-135	77	76	28	11	1	0	0	0	0	0	193	0.1
E	135-165	11	12	3	1	0	0	0	0	0	0	27	0.0
E	165-195	8	8	0	1	0	0	0	0	0	0	17	0.0
E	195-225	18	12	6	4	0	0	0	0	0	0	40	0.0
E	225-255	30	31	20	11	0	0	0	0	0	0	92	0.1
E	255-285	21	30	40	51	4	0	0	0	0	0	146	0.1
E	285-315	4	18	31	27	8	0	0	0	0	0	88	0.1
E	315-345	10	23	23	12	0	0	0	0	0	0	68	0.0
E	345-15	23	38	19	5	0	0	0	0	0	0	85	0.1
Somme		337	454	268	163	15	0	0	0	0	0		
%		0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-55 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion F

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
F	15-45	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	7	0.0
F	45-75	4	13	7	0	0	0	0	0	0	0	24	0.0
F	75-105	24	37	17	5	0	0	0	0	0	0	83	0.0
F	105-135	5	4	7	1	0	0	0	0	0	0	17	0.0
F	135-165	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
F	165-195	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0.0
F	195-225	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
F	225-255	0	1	3	3	0	0	0	0	0	0	7	0.0
F	255-285	1	0	2	5	1	0	0	0	0	0	9	0.0
F	285-315	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	6	0.0
F	315-345	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
F	345-15	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.0
Somme		37	66	42	19	1	0	0	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-56 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion A

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
A	15-45	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
A	45-75	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.0
A	75-105	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
A	105-135	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
A	135-165	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
A	165-195	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
A	195-225	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.0
A	225-255	0	2	4	5	1	0	0	0	0	0	12	0.0
A	255-285	0	0	3	16	5	1	0	0	0	0	25	0.0
A	285-315	0	1	2	8	0	0	0	0	0	0	11	0.0
A	315-345	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
A	345-15	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.0
Somme		1	9	15	32	6	1	0	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-57 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion B

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
B	15-45	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.0
B	45-75	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
B	75-105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
B	105-135	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	6	0.0
B	135-165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
B	165-195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
B	195-225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
B	225-255	1	0	1	8	5	0	0	0	0	0	15	0.0
B	255-285	0	0	0	12	5	1	2	0	0	0	20	0.0
B	285-315	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0
B	315-345	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
B	345-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
Somme		2	3	7	21	10	1	2	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-58 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion C

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
C	15-45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
C	45-75	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
C	75-105	0	0	4	3	2	0	0	0	0	0	9	0.0
C	105-135	0	5	1	1	0	0	0	0	0	0	7	0.0
C	135-165	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0.0
C	165-195	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
C	195-225	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0.0
C	225-255	0	0	0	10	4	1	0	0	0	0	15	0.0
C	255-285	0	1	5	22	20	6	4	0	0	0	58	0.0
C	285-315	2	0	4	2	2	0	1	0	0	0	11	0.0
C	315-345	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.0
C	345-15	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	3	0.0
Somme		3	7	18	41	29	8	5	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-59 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion D

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
D	15-45	4	7	1	2	0	0	0	0	0	0	14	0.0
D	45-75	2	11	5	5	2	0	0	0	0	0	25	0.0
D	75-105	6	20	23	26	5	0	0	0	0	0	80	0.0
D	105-135	9	21	12	5	3	0	1	0	0	0	51	0.0
D	135-165	3	9	2	1	0	0	0	0	0	0	15	0.0
D	165-195	1	6	0	2	0	0	0	0	0	0	9	0.0
D	195-225	1	2	3	4	0	1	0	0	0	0	11	0.0
D	225-255	8	19	29	35	7	3	1	0	0	0	102	0.1
D	255-285	4	18	45	111	92	36	19	6	0	0	331	0.2
D	285-315	0	8	30	28	12	3	0	0	0	0	81	0.0
D	315-345	2	13	13	2	2	0	0	0	0	0	32	0.0
D	345-15	5	12	6	3	0	0	0	0	0	0	26	0.0
Somme		45	146	169	224	123	43	21	6	0	0		
%		0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-60 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion E

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
E	15-45	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	7	0.0
E	45-75	3	4	1	3	0	0	0	0	0	0	11	0.0
E	75-105	2	8	7	9	2	0	0	0	0	0	28	0.0
E	105-135	3	14	8	2	0	0	0	0	0	0	27	0.0
E	135-165	1	4	0	2	0	0	0	0	0	0	7	0.0
E	165-195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
E	195-225	0	5	2	1	0	0	0	0	0	0	8	0.0
E	225-255	3	2	6	7	0	0	0	0	0	0	18	0.0
E	255-285	2	2	6	10	1	0	0	0	0	0	21	0.0
E	285-315	0	3	11	3	0	0	0	0	0	0	17	0.0
E	315-345	1	3	6	2	0	0	0	0	0	0	12	0.0
E	345-15	3	4	0	1	0	0	0	0	0	0	8	0.0
Somme		22	51	48	40	3	0	0	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Tableau 3.3-61 : Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion F

ABK	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]											
		0-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-9	9-12	12-15	15-18	>18	Total	%
F	15-45	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
F	45-75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.0
F	75-105	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	4	0.0
F	105-135	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	5	0.0
F	135-165	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
F	165-195	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
F	195-225	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
F	225-255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
F	255-285	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	4	0.0
F	285-315	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0.0
F	315-345	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.0
F	345-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
Somme		1	4	5	9	2	0	0	0	0	0		
%		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

3.3.13 Evaluation

Les conditions météorologiques sur le site de construction correspondent au climat atlantique européen, c'est-à-dire un climat pluvieux tempéré sans variations de températures extraordinaires. Le profil du vent est marqué par la situation principalement ouest-est de la vallée du site ; les valeurs extrêmes se situent dans le cadre des conditions usuelles pour la conception d'installations nucléaires.

De manière générale, le climat est adapté pour la construction et l'exploitation d'une installation nucléaire. Les dangers météorologiques partiels possibles dus, par exemple, aux vents extrêmes et les conséquences éventuelles qui en résultent pour la conception de l'EKKM sont traités au chapitre 3.6.

L'exploitation des deux centrales hydroélectriques de Mühleberg et Niederried est contrôlée. La régulation se fait par un poste de commande central qui coordonne l'ensemble des centrales hydroélectriques sur l'Aar entre Berne et le lac de Bienne, afin que soit assurée une quantité d'eau suffisante pour le refroidissement de la KKM existante. Avec cette régulation, le niveau d'eau du barrage de Mühleberg peut pratiquement être maintenu constant. Ainsi, en cas de rapide montée du niveau d'eau, la capacité de retenue est faible, de sorte que l'influence du lac de Wohlen sur le déversoir lors de crues est négligeable. La centrale hydroélectrique et/ou le barrage près de Niederried ont également une faible capacité de retenue.

En raison des nombreuses installations hydrauliques sur l'Aar et la Sarine, ce ne sont pas des quantités importantes d'éboulis et d'alluvions qui sont charriées qui pourraient entraver le courant de l'Aar dans le secteur du site de construction.

L'Aar coule dans des gorges de la vallée creusée dans la molasse. La molasse se compose essentiellement de grès à consistance dure, ce qui exclut un déplacement du cours du fleuve par des événements tels qu'inondations ou glissements de terrain. Lors d'événements de crues dans le passé, la position et le fond du fleuve sont restés stables. Les mesures du profil de l'Aar régulièrement effectuées entre la centrale hydroélectrique et le confluent de la Sarine indiquent peu de changements.

3.4.1.2 Événements hydrologiques

Pour le site de construction de l'EKKM, différents événements hydrologiques sont importants. Les plus importants événements consistent dans des événements dus aux crues et inondations à la suite de ruptures du barrage.

Les crues sont provoquées par des situations hydrométéorologiques particulières. Celles-ci provoquent rarement des événements de débit extrêmes. Elles sont caractérisées par leurs quantités de débit et leur annualité.

Plusieurs barrages sont situés dans le bassin de réception du site de construction. Les ruptures de barrage provoquent également des événements de débit extrêmes, ils se différencient toutefois des crues hydrométéorologiques par une plus courte durée et par une dimension de dommages potentiels plus élevée. Compte tenu de la dimension du barrage et des propriétés du terrain, l'on peut avoir de plus fortes quantités de débit et d'intensité que des crues extrêmes, c'est pourquoi cette catégorie d'événements est la plus importante.

Étant donné que le site de construction de l'EKKM est proche du confluent de la Sarine (env. 2 km), aussi bien le bassin de réception de l'Aar que celui de la Sarine sont pris en considération pour les deux catégories d'événements.

3.4.2 Crues

Pour le site de construction de l'EKKM, il y a des recherches sur différents événements dus aux crues. Les cotes de crues respectives sont calculées sur les débits communiqués. Les événements dus aux crues sont, d'une part, définis dans une étude des crues extrêmes du Canton de Berne [6] et, d'autre part, sur la base de la statistique des crues.

3.4.2.1 Ecoulements, crues extrêmes

Les scénarios des crues sont basés sur des modèles hydrologiques avec lesquels, en fonction des données d'extrêmes conditions météorologiques, l'on détermine l'écoulement. Il s'agit donc d'un processus déterminant. Les événements de conditions météorologiques sont définis en fonction des données de situations atmosphériques qui ont par le passé provoqué d'importants événements dus aux crues, accompagnés ou combinés avec des impacts, de sorte qu'il résulte un possible événement maximal. Étant donné que sur la base de l'étude, seules les valeurs moyennes du débit journalier sont connues, ces dernières sont corrigées pour obtenir la valeur journalière maximale [11]. Pour la Sarine, le facteur de correction est de 1.45, pour l'Aar avec les plus grandes surfaces de rétention 1.05. Les débits des trois événements maximaux qui en résultent pour le site de construction sont présentés dans le Tableau 3.4-1.

Tableau 3.4-1 : Débits des scénarios de crues extrêmes considérés

Scénario	Scénario des crues extrêmes	Description	Q_{Aare} (m³/s)	Q_{Sarine} (m³/s)
A	1972_87_J	Type 3 Superposition de deux événements sur 10 jours	580	1309
B	1999_J_2	Type 3 30 jours, 3 ondes de précipitations avec alimentation supplémentaire	816	1051
C	1955_7	Type 2 Fonte des neiges à basse altitude avec 7 jours de précipitations	326	1444

Pour ces scénarios aucune période de retour [6] n'est indiquée.

3.4.2.2 Débits, statistique des crues

Avec les données des successions d'observations disponibles des deux stations de niveau de l'Aar, Berne-Schönau et Sarine, Laupen, ainsi qu'avec le processus standard de la Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) les événements de crues peuvent être dégagés [7] avec des périodes de retour (HQ_{1000}) sur 1000 ans. Par le fait que sur le site de construction de l'EKKM à côté de l'Aar, le niveau dépend aussi de la Sarine, le processus standard doit être remplacé par une combinaison de probabilités pour certains débits dans l'Aar et la Sarine.

En 2006, dans une étude pour la KKM [8], les combinaisons de débit de l'Aar et de la Sarine avec une période de retour de 1000 ans ont été établies de cette manière. Elles sont indiquées dans le Tableau 3.4-2 et peuvent être reprises pour l'EKKM dans la mesure où les débits entre les deux sites ne changent pas.

Tableau 3.4-2 : Combinaisons de débit de l'Aar et la Sarine pour les HQ_{1 000} [8]

Scénario	Q _{Aare} (m³/s)	Q _{Saane} (m³/s)
1	310	1230
2	695	1150
3	780	180

Sur la base des cotes de crues atteintes dans l'étude KKM, le scénario 2 se révèle comme déterminant.

3.4.2.3 Estimation HQ_{10.000}

L'événement avec périodes de retour sur 10.000 ans (HQ_{10.000}) est un événement extrêmement rare qu'il est difficile de définir méthodiquement. Trois différents aspects ont été pris en compte pour estimer le HQ_{10.000}.

Une première estimation consistait à multiplier les débits de crues extrêmes déterminants définis par le facteur 1.2 (règle générale). Pour cela, des trois scénarios de crues extrêmes, l'on a opté pour le scénario avec le plus grand débit du fleuve (scénario B), étant donné que celui-ci amène les plus grandes crues à l'EKKM (voir Tableau 3.4-3). Il résulte ainsi des débits de 1261 m³/s pour la Sarine et de 980 m³/s pour l'Aar.

En comparaison avec d'autres processus pour la définition de HQ_{10 000} l'on s'aperçoit que cette estimation pour l'Aar est bonne. Pour l'Aar il résulte, par exemple, à l'aide du processus d'une règle relevant de la sécurité du Comité technique nucléaire, KTA 2207 [9], un HQ_{10.000} de 997 m³/s.

Même avec les règles utilisées habituellement pour la définition de HQ_{10 000} tirées des directives de l'OFEG sur la sécurité des ouvrages d'accumulation [10] ($HQ_{10.000} = HQ_{1 000} * 1.5$), il résulte une valeur de 975 m³/s au barrage de Mühleberg.

Lors de la comparaison des débits établis, l'on constate que la plupart des scénarios de crues extrêmes se situent entre les scénarios HQ₁₀₀₀ et HQ_{10.000}.

Afin de démontrer que les événements de crues qui se situent aussi au-delà de HQ_{10.000} n'ont pas de répercussions significatives pour le site de construction de l'EKKM, il a été élaboré en plus un événement encore plus grand et en conséquence plus rare, qui ne se produira probablement pas dans la réalité. En se basant sur une recherche relative aux surfaces, quantités, durées, relations de fortes précipitations en Suisse (voir [106]) il a été admis, à titre de test pour le modèle dans l'étude de crues extrêmes comme PMP (Probable Maximum Precipitation) pour le bassin versant de l'Aar, un événement de 2 jours de précipitations avec un bloc de précipitations sur l'ensemble de la surface de 250 mm. Cet événement a été déterminé en supposant tant une hausse maximale qu'une teneur en vapeur d'eau maximale. Selon le modèle hydrologique, il résulte pour l'Aar une valeur maximale de 1166 m³/s et pour la Sarine de 2110 m³/s. Le pic de crue de la Sarine coule avec une avance de 18 h sur l'Aar, de sorte que le maximum de l'Aar en aval du confluent de la Sarine se situe à 2953 m³/s. Ce scénario constitue le débit maximal PMF (Probable Maximum Flood) pour le site de construction.

3.4.2.4 Niveau

Pour définir un niveau d'eau sur le site de construction à partir des débits des scénarios, l'on doit travailler avec des maquettes hydrauliques. Pour les scénarios de l'étude de crues extrêmes et les scénarios de HQ_{1000} , l'on a utilisé pour cela la maquette à une dimension WAPROF développée à l'EPFZ. Celle-ci calcule les niveaux hydrostatiques sur la base des cotes de retenue au barrage de Niederried. Les facteurs de rugosité s'orientent sur les études antérieures (voir chap. 5.1 de [8]), dans lesquelles les niveaux hydrostatiques de l'Aar ont été mesurés avec différents débits. Avec eux, le niveau à la KKM dépendant de la couche d'assise (2004/2006) a clairement pu être représenté à 3-7 cm.

Dans le Tableau 3.4-3, les niveaux des scénarios de crues extrêmes à la KKM (Gewiss.-km 155.17) et à l'EKKM (Gewiss.-km 155.47) [11] sont indiqués.

Tableau 3.4-3 : Niveau des scénarios de crues extrêmes

Scénario	Niveau KKM (m alt.)	Niveau EKKM (m alt.)
A	465.70	465.73
B	465.86	465.92
C	465.29	465.30

Avec 1 à 12 cm, les différences entre les deux sites sont faibles. De ce fait, pour les scénarios HQ_{1000} les résultats des calculs hydrauliques [8] de 2006 pour la KKM peuvent être repris pour l'EKKM. Le scénario déterminant (no. 2) de HQ_{1000} à la KKM avec les hypothèses de [8] atteint un niveau de 465.84 m.

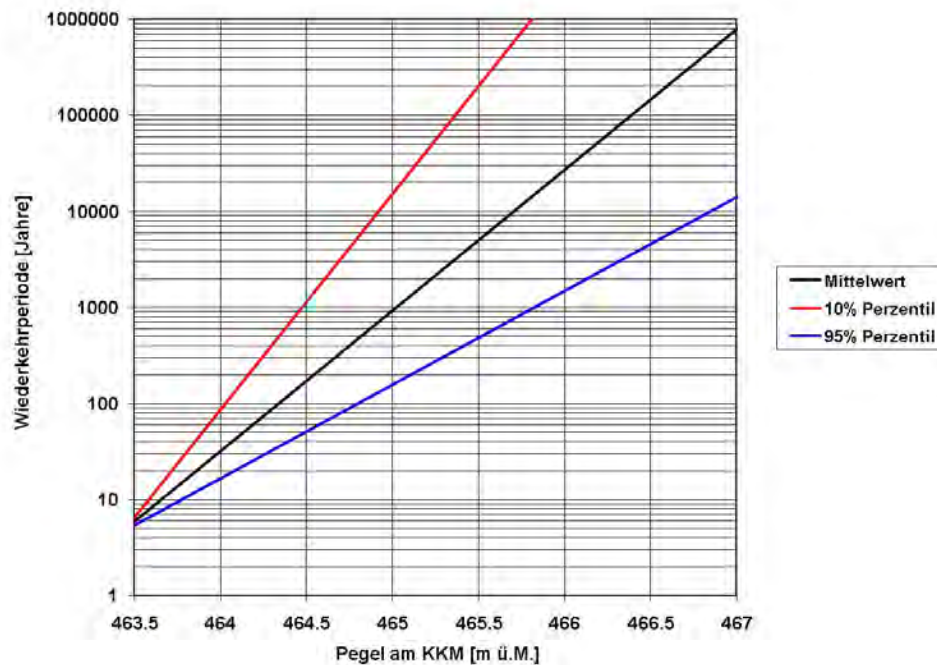
Il peut être démontré que les résultats de [8] pour le HQ_{1000} correspondent plutôt au 95% percentile de la répartition d'insécurité du niveau d'eau, étant donné que des hypothèses trop conservatives ont été faites, entre autres, sur la fréquence des défaillances des vannes de barrage à Niederried et sur les mouvements sédimentaires. Dans le Tableau 3.4-4, les chiffres correspondent donc à l'étude d'origine de 95% percentile, par ailleurs le niveau moyen nouvellement calculé ainsi que le 10% percentile pour les diverses périodes de retour des crues sont indiqués.

Tableau 3.4-4 : Niveau d'eau à la KKM (EKKM) durant différentes années

Périodes de retour	Niveau d'eau (m. alt)		
	10%-Percentile	Valeur moyenne	95%-Percentile
1 000	464.42	465.04	465.84
300	464.20	464.65	465.25
100	464.14	464.42	464.79
30	463.75	463.98	464.27

Sur la base de ces chiffres, l'on peut développer une courbe sur les risques de crues (Fig. 3.4-2), qui se présente comme suit :

Fig. 3.4-2 : Courbe du risque de crues pour la KKM (EKKM)



Sur le site KKM (EKKM) pour un événement de débit avec la fréquence d'une fois en 1000 ans, cela donne ainsi une valeur moyenne de 465.0 m. alt. pour le niveau d'eau, respectivement une valeur 95% percentile conservative de 465.8 m. alt.

Pour le $HQ_{10.000}$, l'on peut obtenir une valeur moyenne de 465.7 m. alt. respectivement une valeur 95% percentile de 466.9 m sur le site KKM (EKKM) par extrapolation de la courbe de risque. Cela est encore toujours basé sur des maquettes à une dimension qui, lors de hauts débits, atteindront vraisemblablement leurs limites. Malgré tout, la valeur moyenne de 465.7 m alt. peut être considérée comme autre point de référence (par rapport aux valeurs dans le chap. 3.4.2.3) pour un événement sur 10 000 ans. Dans la maquette à une dimension, la limitation de la conduite du fleuve avec l'insertion hypothétique de parois verticales amène à une surestimation potentielle des niveaux d'eau, entre autres par le fait que les secteurs situés en dehors du lit du fleuve ne sont pas pris en compte.

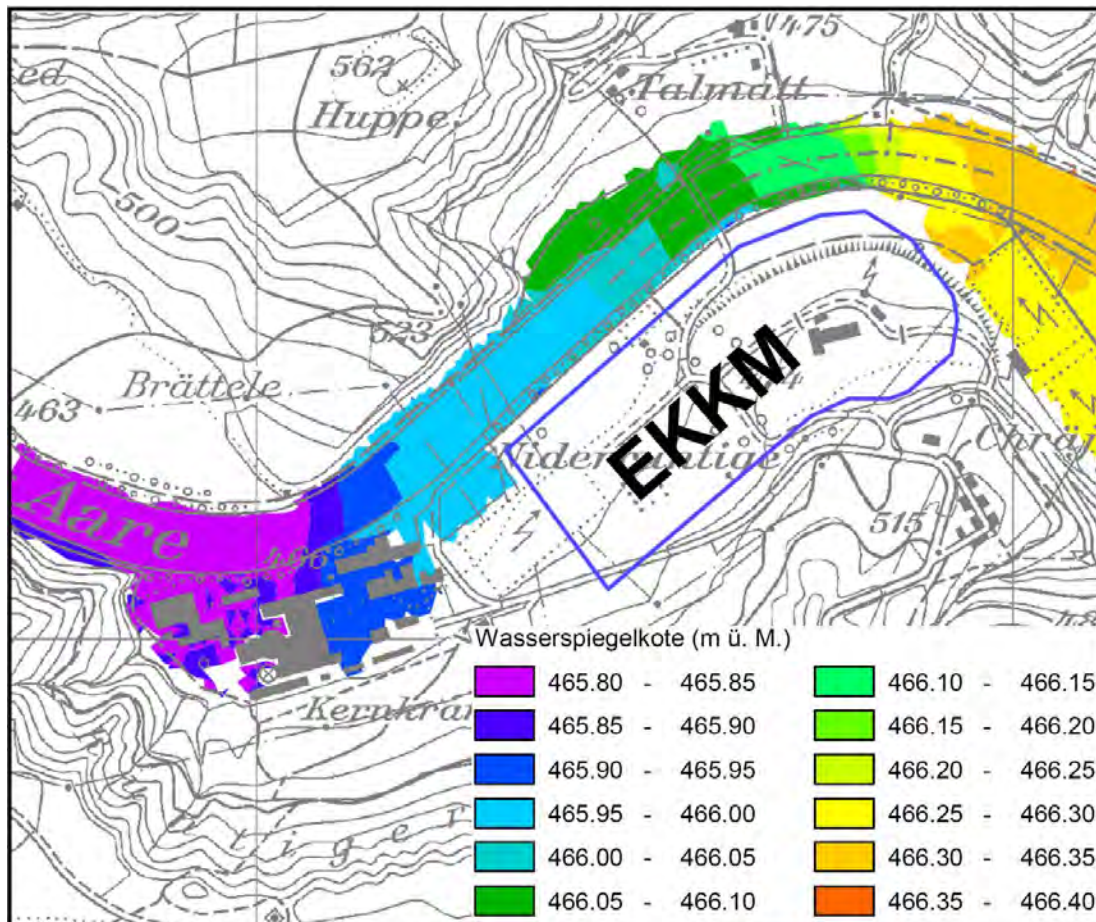
Pour le $HQ_{10.000}$ il a donc été procédé à un calcul hydraulique à deux dimensions plus proche de la réalité, avec le programme de calcul BASEMENT¹, dans lequel les vallées de l'Aar et de la Sarine sont représentées en un modèle de terrain². Les résultats du calcul démontrent que des parties éloignées de la vallée de l'Aar sont inondées. Les digues près d'Oltigen et près de Niederried sont submergées. Les cotes maximales de l'Aar dans le secteur du site de construction de l'EKKM (voir Fig. 3.4-3) se situent à 465.95 à 466.3 m alt. au Gewiss.-km 155.4-156.2. Les secteurs inondables se trouvent seulement en amont dans le secteur du poste de commutation de Mühleberg Est et en aval sur le terrain de la KKM. Lors de débordements sur le secteur rive

¹ <http://www.basement.ethz.ch/>

² Pour une courte description du processus, voir chapitre 3.4.3.3.

gauche, à l'exception du secteur de la rive proche, aucune vitesse d'écoulement n'atteint plus de 1 m/s, les intensités maximales se situent en-dessous de 1 m²/s.

Fig. 3.4-3 : Cotes de crue de l' Aar pour le HQ_{10.000}



Le niveau d'eau sur le site de la KKM pour le HQ_{10.000} d'env. 465.9 m alt. correspond aux valeurs d'extrapolation susmentionnées (Fig. 3.4-2). Les niveaux hydrostatiques augmentent peu par rapport au calcul à une dimension du plus fréquent HQ₀₀₀, étant donné que des coupes de vallée supplémentaires passent à travers et que la digue de Niederried est submergée, de sorte que la cote de retenue du lac de Niederried ne peut pas augmenter plus.

Avec la maquette à deux dimensions, l'on a également calculé le débit maximal PMF (Probable Maximum Flood). Les cotes de crues sur le site se situent vers 466.3 jusqu'à 466.7 m alt. et augmentent ainsi, malgré une hausse de plus de 30 pour cent du débit majeur du lit de l'Aar, seulement de 40 cm de plus. Même les plus extrêmes événements dus aux crues ne provoquent plus d'augmentation significative de la cote des crues. Avec de plus forts débits aussi, il ne faudrait pas s'attendre à une aggravation nette du risque. Celui-ci survient seulement lors de ruptures de barrages.

3.4.2.5 Précipitations extrêmes sur le site de construction de l'EKKM

Les quantités de précipitations attendues sur le site de construction sont décrites de manière détaillée au chap. 3.3.7.

Pour ces quantités de précipitations attendues, les accumulations d'eau sur l'aire et/ou sur les toits des bâtiments peuvent, sans autre, être évitées par la future conception des installations de l'EKKM. Des toits avec de fortes charges admissibles, la pose de canaux d'écoulement et de drainage redondants et contre l'obstruction correspondent au niveau actuel de la conception d'installations.

Pour ces raisons, les précipitations extrêmes sur le site de construction de Niederruntigen ne sont pas considérées plus avant.

3.4.2.6 Comparaisons avec des événements de crues actuels

La fiabilité des calculs peut être contrôlée par une comparaison des données des événements de crues passés et des niveaux d'eau enregistrés. Vers l'Aar, ces dernières années, l'on peut observer une recrudescence de grands événements dus aux crues. De ce fait, intuitivement, l'on peut conclure à une augmentation des événements de crues. Justement lors d'événements extrêmes, il est difficile statistiquement de garantir une pareille conclusion. Motivé par la recherche sur le changement du climat, cela donne ainsi de nombreuses recherches sur de longues successions de données pour en déduire des tendances possibles. Il ressort d'une analyse du comportement des tendances de débit des crues dans le Baden-Wurtemberg et la Bavière, que pour la plupart des niveaux des eaux, cela ne donne pas ou seulement de très faibles différences significatives de tendances [16]. Dans le rapport OcCC 2003 [17] il avait également été constaté qu'il est difficile de trouver une tendance dans le comportement du débit des crues. Dans les longues successions de temps, des accumulations d'événements extrêmes sont toutefois aussi survenues dans le passé, auxquelles suivait une période à nouveau tranquille sans ou avec peu d'événements extrêmes.

Depuis le printemps 2007, la KKM dispose d'un poste de mesure du niveau d'eau, de sorte que l'événement des crues d'août 2007 a pu être enregistré. Lors de cet événement, le niveau d'eau maximal à la KKM était de 464.1 m alt. À ce moment là, l'Aar coulait à Berne à un maximum de 514 m³/s et la Sarine à Laupen à un maximum de 830 m³/s. Ces valeurs de débit se situent clairement en-dessous des scénarios de débit présentés ici et de là ont conduit aussi à un niveau d'eau qui se situe nettement plus bas que les cotes de crues résumées dans le Tableau 3.4-5. L'événement dû aux crues de 2007 pour le niveau d'eau de Hagneck, lequel mesure essentiellement la somme des quantités de débit de l'Aar et de la Sarine, a été classé provisoirement par l'OFEV comme période de retour de 20 à 50 ans¹. Un événement comparable au Tableau 3.4-4 avec un niveau d'eau de 463.98 m alt. a une période de retour de 30 ans et se situe ainsi dans un secteur comparable.

¹ <http://news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/10763.pdf>

Le modèle hydraulique des calculs à deux dimensions a été étalonné compte tenu de cet événement de crues. Pour cela, avec les coefficients de rugosité sur la base des niveaux d'eau mesurés aux postes de mesures de la centrale hydroélectrique de Niederried, de la centrale hydroélectrique de Mühleberg et de la station de pompage KKM, il a été possible de bien calibrer (moins de 5 cm), lorsque les afflux de la Sarine (niveau Laupen, OFEV) et de l'Aar (niveau Schönaue, OFEV) se trouvent dans le secteur des rapports niveau - débit mesurés avec le moulinet hydrométrique. Lors de plus forts débits, ces rapports de niveau-débit doivent être extrapolés, raison pour laquelle le débit publié par l'OFEV soulève de plus grandes insécurités. C'est pourquoi le niveau mesuré vers la station de pompage de la KKM lors de valeurs de pointe ne peut pas bien être reproduit, la différence comporte jusqu'à 30 cm. Après la diminution des crues, l'on obtient à nouveau une bonne concordance. Un meilleur calibrage par une modification du coefficient de rugosité ne peut de ce fait pas être atteint, étant donné que les régimes hydrographiques d'écoulement lors des crues sont trop imprécis. L'on peut toutefois, par une estimation Maximum-Likelihood, corriger ainsi les débits de plusieurs niveaux de l'Aar, de manière à ce que l'événement des crues de 2007 sur un long tronçon de l'Aar puisse être reconstitué sans valeurs de débit contradictoires. Pour cela, les différentes imprécisions des niveaux respectifs sont prises en considération. Avec ces données reconstituées, le niveau à la KKM pour l'événement de crues de 2007 peut être reconstitué sur de longues périodes de l'événement avec une précision de 10 cm.

3.4.2.7 Influence d'un événement de crues sur les eaux souterraines

Les eaux souterraines lors d'événements de crues de l'Aar sont de faible importance pour le site de construction. Comme il a été constaté au cours des analyses relatives au sol de fondation (voir chap. 3.5.1.4.1), seul un secteur étroit à Niederruntigen est influencé par l'Aar : cette influence passe au plus loin dans le secteur du poste de commutation Ouest actuel. Lors de crues, le niveau des eaux souterraines dans ce secteur augmenterait (env. 464 m, voir figure au chap. 3.5.1.4.1 et après le pic de la vague se retirerait avec retard par rapport à l'Aar. De par les analyses, les conditions des eaux souterraines sont connues, les futurs bâtiments de l'EKKM vont toutefois probablement influencer ces conditions, cela sera encore analysé dans le cadre de la demande de permis de construire, de sorte que les nouvelles installations puissent être conçues contre la pression des eaux souterraines.

3.4.2.8 Résumé des analyses des crues

Comme l'on peut le constater dans le résumé des scénarios de crues au Tableau 3.4-5, les études effectuées pour la KKM et les analyses faites pour l'EKKM concordent bien.

Tableau 3.4-5 : Résumé des scénarios de crues

Scénarios	Q_{Aare} (m³/s)	Q_{Saane} (m³/s)	Niveau KKM (m alt.)	Niveau EKKM (m alt.)
de crues extrêmes A	580	1309	465.70	465.73
de crues extrêmes B	816	1051	465.86	465.92
de crues extrêmes C	326	1444	465.29	465.30
HQ _{1 000}	695	1150	465.04	(= KKM)
HQ _{10 000}	980	1261	465.95	466.30
Débit PMF turbulent	1166	2110	466.25	466.7

Les analyses montrent que le niveau des crues près de Niederruntigen, même lors de crues les plus extrêmes, n'atteint pas plus de 467 m alt. Dans le secteur de très forts débits, l'on peut constater un nivellement net de la courbe du niveau de débit. Dans cette optique et grâce à l'étendue de la vallée, le site de construction est naturellement bon dans l'absorption de fortes crues hydrométéorologiques. Seuls des ruptures de barrages peuvent conduire à un débit encore plus fort, comme cela est traité au chapitre suivant.

3.4.3 Événements d'inondation dans le bassin versant

À côté des crues en partie hydrométéorologiques, il y a aussi pour le site de construction des niveaux de crues maximales qui résultent de la défaillance de retenues de barrages. Plusieurs constructions entrent en ligne de compte dans le bassin versant de l'Aar et la Sarine.

Le Tableau 3.4-6 indique les lacs de barrages importants du bassin versant de l'Aar et le Tableau 3.4-7 les lacs de barrages importants du bassin versant de la Sarine. Pour cela, seuls les lacs de barrages, dont le volume de retenue se situe au-dessus de 0.1 Mio. m³, ont été relevés (pour un aperçu, voir aussi Fig. 3.4-4)

Tableau 3.4-6 : Lacs de barrages dans le bassin versant de l'Aar

Lac de barrage	Mise en service	Type de mur	Volume en Mio. m ³	Bassin versant en km ²
Mühleberg	1920	Barrage-poids	19	3202
Grimsel (Spitallamm et Seeuferegg)	1932	Barrage-voûte et/ ou Barrage voûte-poids	101	74.4
Oberaar	1953	Barrage-poids	61	19.4
Räterichsboden	1950	Barrage-poids	27	130.2
Gelmer	1929	Barrage-poids	14	16
Mattenalp	1950	Barrage-poids / digue en terre	2.1	36.2
Trübtensee	1950	Barrage-poids	1.1	1.8
Spiezmoos	1899	Barrage en remblai	0.4	1.2
Simmenporte	1908	Barrage-poids	0.25	585

Tableau 3.4-7 : Lacs de barrages dans le bassin versant de la Sarine

Lac de barrage	Mise en service	Type de mur	Volume en Mio. m ³	Bassin versant en km ²
Schiffenen	1963	Barrage-voûte	58.6	1400
Maigrauge	1872	Barrage-poids	0.4	1250
Rossens / Lac de Gruyère	1947	Bogenmauer	173.5	954
Montsalvens	1920	Barrage-voûte	12.6	173
Lessoc	1976	Barrage à contreforts	1.5	506
Hongrin	1969	Barrage-voûte	53.2	45.6
Rossinière	1972	Barrage-poids	2.9	398
Sanetsch	1965	Barrage-poids	2.5	10.7
Arnensee	1942	Barrage en remblai	10.5	7.1

De ces barrages, certains ne sont pas assez importants pour continuer à être pris en compte dans la mesure où leur défaillance ne provoque dans tous les cas pas de débits supérieurs à HQ_{10.000}. Ce sont en particulier des barrages avec de petits volumes de retenue et des barrages à plus grande distance du site de construction et dont le volume peut être retenu sur le chemin jusqu'au site, de sorte que la hauteur des flots est nettement diminuée et que l'onde de submersion n'aura pour autres effets que ceux de fortes crues.

Les barrages importants pour l'EKKM sont soumis à la surveillance de la Confédération. Cela signifie aussi que les installations sont régulièrement surveillées. De plus, en considération de la règle n-1, ces barrages doivent déverser sans dommages une crue de référence (correspondant à un HQ₁₀₀₀), ainsi que résister à une crue de sécurité (correspondant à HQ_{10.000}) avec seulement de petits dégâts, sans perte de la fonction de retenue.

Dans les calculs des événements de ruptures de barrages, les volumes de retenue des lacs de barrages par un HQ_{10.000} ne change pas de manière significative. Pour la retenue la plus importante, la centrale hydroélectrique de Mühleberg, le niveau maximal de la retenue réglementaire de 480.94 m alt. peut être maintenu, même si toutes les machines sont à disposition. Lors de la défaillance d'une machine, le niveau augmente de 4 cm, lors de la défaillance de toutes les machines de 79 cm. Le risque de défaillances de machines à la centrale hydroélectrique de Mühleberg lors de crues est seulement légèrement supérieur en comparaison à d'autres usines hydroélectriques au fil de l'eau, étant donné qu'un important volume du lac est pré-stocké et que peu de débris flottants arrivent dans le proche bassin versant.

3.4.3.1 Barrages dans le bassin versant de l'Aar

Les retenues de la centrale hydroélectrique Oberhasli (KWO) peuvent être exclues de l'étude, étant donné que dans le haut de la vallée de l'Aar et avec les deux grands lacs de Brienz et de Thoue, l'on dispose de volumes de retenue suffisants, de sorte que même lors d'une rupture de tous les barrages, le niveau d'eau sur le site de construction de l'EKKM reste en dessous de HQ_{10.000}. Les analyses sur les événements de crues (voir chap. 3.4.2) à ce sujet sont couvertes.

Parmi les autres barrages dans le bassin versant de l'Aar, à l'exception du barrage de la centrale hydroélectrique de Mühleberg, aucune retenue n'atteint une dimension qui nécessite une analyse approfondie.

La centrale hydroélectrique de Mühleberg a été construite dans les années 1917 à 1920 et est exécutée comme barrage-poids. Le barrage retient le lac de Wohlen. Le lac de Wohlen se comble de dépôts alluvionnaires relativement vite. En 1921, son volume était de 25 Mio. m³, actuellement son volume comporte encore env. 19 millions de m³. La quantité d'eau potentielle libérée lors d'une rupture du barrage de Mühleberg se réduit aussi à l'avenir par l'alluvionnement. En raison de la proximité du site de construction, la perte de retenue doit être analysée de plus près.

3.4.3.2 Barrages dans le bassin versant de la Sarine

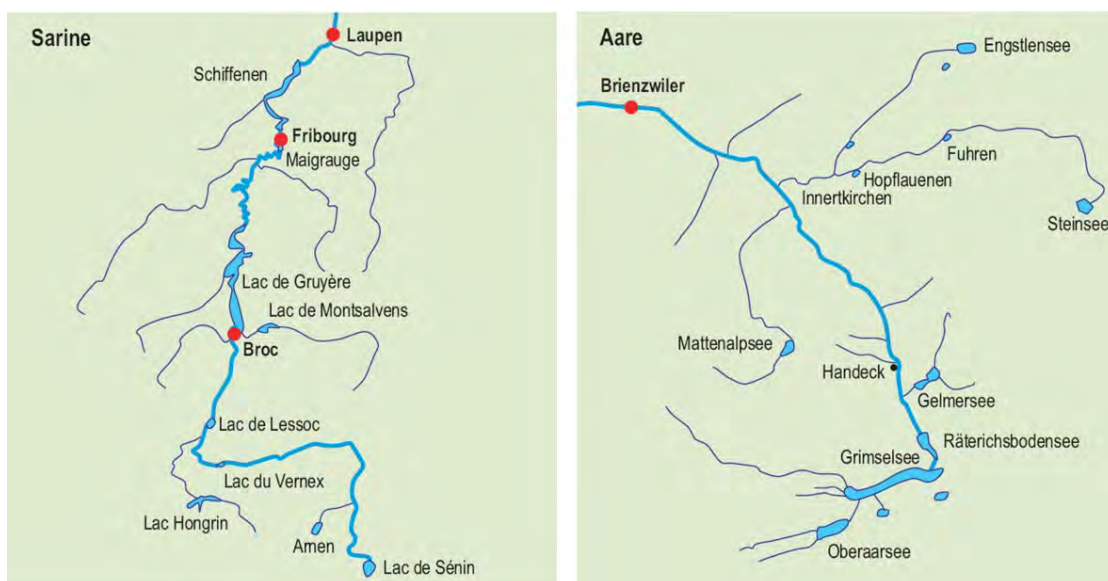
Dans le bassin versant de la Sarine, il n'y a pas de lacs naturels entre les barrages et le confluent de la Sarine et l'Aar. Il y a des lacs artificiels qui peuvent présenter un très grand volume de retenue. De manière analogue à l'Aar, l'on peut exclure un grand nombre de petits bassins de retenue qui sont de peu d'importance pour le site de construction, par le fait que le Lac de Gruyère et le Lac de Schiffenen peuvent absorber leurs volumes, sans que soient ressenties des répercussions particulières.

Trois barrages du bassin versant, Hongrin, Rossens et Schiffenen, en comparaison avec les autres lacs de barrages, retiennent un volume nettement plus élevé. Pour chacun de ces lacs, la possibilité d'un vidage en cas d'une rupture du barrage existe. Les répercussions d'une rupture de barrage à Rossens ou Schiffenen sont certainement plus importantes que celles d'une rupture au Hongrin.

Hongrin est le plus petit des trois barrages et est très éloigné du site de construction. L'onde de submersion de Schiffenen survient le plus rapidement après celle de Mühleberg, pendant que le volume du Lac de Gruyère, lequel est retenu par le barrage de Rossens, dépassera nettement le volume de tous les autres lacs de barrages, de sorte qu'il faut s'attendre à des crues relativement persistantes.

Une analyse de l'onde de submersion à la suite d'événements de ruptures de barrages au barrage du Hongrin, de Rossens et Schiffenen est de ce fait nécessaire.

Fig. 3.4-4 : Importantes retenues (du [13]) bassin versant de la Sarine (gauche) et du bassin versant du haut de l'Aar (droite)



Source : BAFU

3.4.3.3 Ruptures de barrages examinées

En fonction des réflexions susmentionnées, les répercussions d'inondations sur le site de Niederruntigen à la suite de la rupture des barrages à Mühleberg ainsi qu'à Schiffenen, Rossens et Hongrin sont examinées, les événements multiples sont aussi analysés.

Les valeurs maximales des cotes des crues lors d'une rupture de barrage sont établies sur la base de calculs numériques à deux dimensions. Cela se fait au moyen du Finite-Volumen Programm BASEMENT du Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) de l'EPFZ¹ sur la base des équations à deux dimensions de la profondeur moyenne des eaux. Pour cela, un modèle de terrain est élaboré, lequel est basé sur le modèle de terrain à haute résolution (DTM-AV) de l'Office fédéral de topographie swisstopo. Les tubes de courant de l'Aar et de la Sarine sont illustrés et intégrés dans le modèle, avec les mêmes coupes transversales terrestres mesurées qui sont aussi utilisées dans le calcul à une dimension. Les lacs pris en considération peuvent également être illustrés avec des profils terrestres mesurés. Tout d'abord, dans le modèle de

¹ <http://www.basement.ethz.ch/>

terrain, les tubes de courant et lacs sont remplis d'eau. Le calcul de l'onde de submersion est lancé par le fait que le barrage contenu avant dans le modèle de terrain est enlevé. Les résultats intermédiaires respectifs de la cote de l'eau, de la profondeur de l'eau, vecteurs de vitesse et tenseurs de contraintes peuvent être inscrits sur un fichier de résultat dans la résolution de temps désirée pour visualiser le déroulement de l'onde de submersion.

Un étalonnage de la maquette peut seulement se faire sur la base d'événements réellement survenus et mesurés, c'est pourquoi l'étalonnage mentionné au chap. 3.4.2 revêt avant tout un intérêt pour les résultats des crues hydrométéorologiques. Un étalonnage de la maquette conforme à une rupture de barrage n'est pas possible. Le programme utilisé a aussi été testé avec le nouveau calcul de la rupture de Malpasset et a bien illustré les valeurs reconstruites là-bas. Le passage d'un modèle à une dimension à un modèle à deux dimensions est dans tous les cas sensé, étant donné que des aménagements de surfaces essentiels peuvent être considérés et que l'on peut s'attendre ainsi à une forte influence sur les résultats. Malgré une augmentation proche de la réalité, un passage à une simulation à trois dimensions ne devrait pas apporter de modifications essentielles au résultat.

Pour atteindre un niveau théorique maximal, l'on a admis un scénario de rupture de barrage conservatif, à savoir qu'au départ du calcul, le barrage est entièrement enlevé, c'est-à-dire que le barrage se « volatilise » en fractions de seconde. De ce fait, il ne reste donc aucun débris qui pourrait légèrement retenir l'onde de submersion suivante suite à la rupture. Pour le barrage-poids de Mühleberg, la rupture totale est moins plausible que pour le barrage-voûte de la vallée de la Sarine. Un barrage-poids comporte un volume de béton plus important, une défaillance totale d'un tel barrage représente de ce fait une hypothèse conservative.

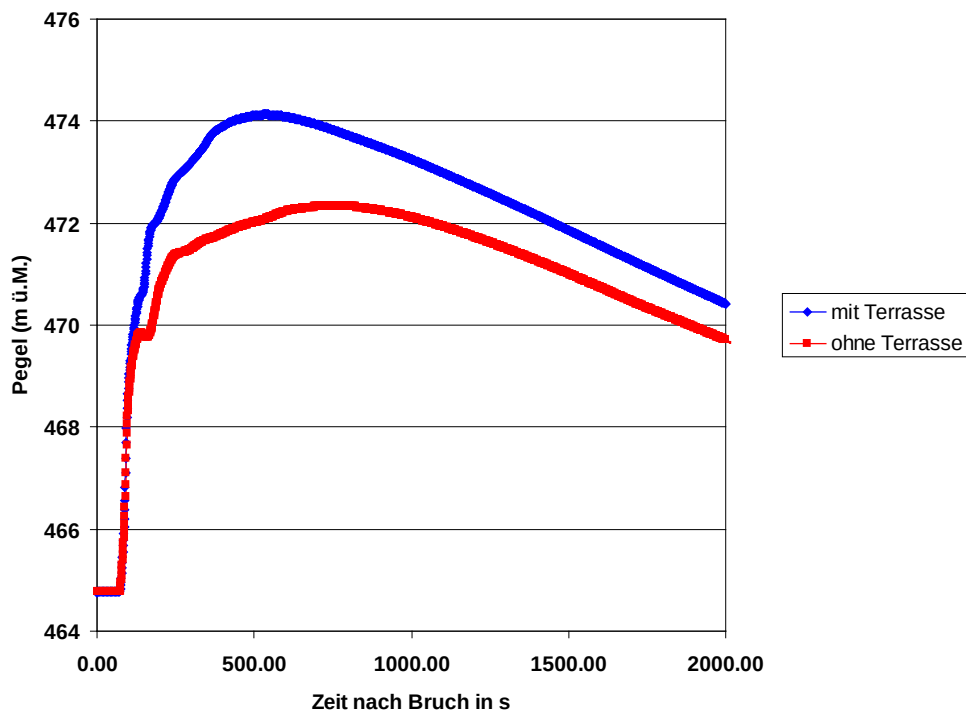
De plus, les calculs partent d'un lac entièrement rempli. Pour le lac de Wohlen, cette hypothèse est justifiée, le niveau de l'eau se situe en moyenne à 480.9 m alt. et varie très peu, le niveau maximal de la retenue se situe à 480.94 m alt. et selon la concession est le barrage autorisé le plus haut. Les grands lacs de barrage sur la Sarine sont soumis à l'exploitation de sorte que les lacs subissent de fortes variations du niveau d'eau. De ce fait, l'hypothèse d'un remplissage maximal pour les lacs de barrage sur la Sarine est conservative. Même lors d'événements hydrométéorologiques extrêmes, le volume ne va pas augmenter de manière importante. Lors de l'état opérationnel maximal, les murs ont un franc-bord de 2 m. C'est uniquement lors d'ondes de submersion à la suite de ruptures de barrage en amont que peut survenir une augmentation du niveau vers les murs de la Sarine jusqu'à ce que l'eau passe par-dessus les murs.

Dans les calculs, l'on a considéré qu'avec la construction de l'EKKM, le terrain sera changé par rapport à l'état actuel. En particulier pour la nouvelle installation, une surface plane (terrasse) a été créée, sa hauteur de terrain sera définie plus tard par la conception de l'installation, avec comme objectif de protéger les installations de crues importantes. Cette modification de terrain prévue plus tard a été intégrée dans tous les scénarios, dans la mesure où pour les dynamiques d'événements d'inondations, elle influence en particulier vers le haut la cote des crues lors de la rupture du barrage de Mühleberg.

3.4.3.4 Rupture du barrage de Mühleberg

Après la « volatilisation » du barrage, il se forme un important gradient hydraulique sur les lieux, d'abord les flots s'élargissent avant tout sur l'Aar, mais ensuite aussi sur le secteur de la station inférieure Est et atteint, après environ 100 s. l'adossement sur lequel se trouve l'actuel poste de commandement central (ZLS). Cela correspond approximativement à la limite orientale du site de construction. Un front d'eau ne se forme toutefois pas dans le calcul, avec le temps les masses d'eau montent. Au pertuis entre la terrasse et la rive incurvée se forme un maxima intermédiaire des masses d'eau et provoque une retenue qui, après environ 9 min atteint un maximum. À la terrasse, l'on atteint des cotes de niveaux d'eau de maximum 474.2 m alt. (voir Fig. 3.4-5).

Fig. 3.4-5 : Niveau à l'avant de la terrasse après rupture complète du Barrage de Mühleberg au Gewiss.-km 156.2



L'effet de la modification du terrain par la construction a été déterminé dans un calcul séparé. Sans terrasse, l'on atteint un niveau d'eau maximum d'env. 472.3 m alt. sur le terrain de l'EKKM (voir également Fig. 3.4-5), cela indique que l'onde de submersion est en partie retenue par une terrasse.

Les cotes des crues pour les points qui se situent en amont du pertuis de la terrasse sont tendanciellement plus élevées, alors que pour les points en aval elles sont plus basses. Avec la terrasse, l'eau monte sur le côté avant de l'actuelle petite terrasse existante du PCP en 9 min jusqu'à une valeur d'environ 474.2 m alt., cela représente environ 2 m plus haut que sans terrasse. À la limite occidentale du site de construction, l'on atteint avec la terrasse 470,6 m alt., ce sont env. 90 cm plus bas que sans la terrasse rétrécissante. Cette réduction peut aussi être constatée sur le site de la KKM. Dans le secteur de l'entrée de la station de pompage, avec la terrasse après

13 min l'on atteint un maximum de 470.4 m alt., par contre sans terrasse 470.9 m alt. Pour les événements d'inondations statiques de la Sarine, la terrasse revêt une signification négligeable, étant donné que comparativement elle reçoit un faible volume et que sa fonction de coupe transversale rétrécissante n'est pas importante.

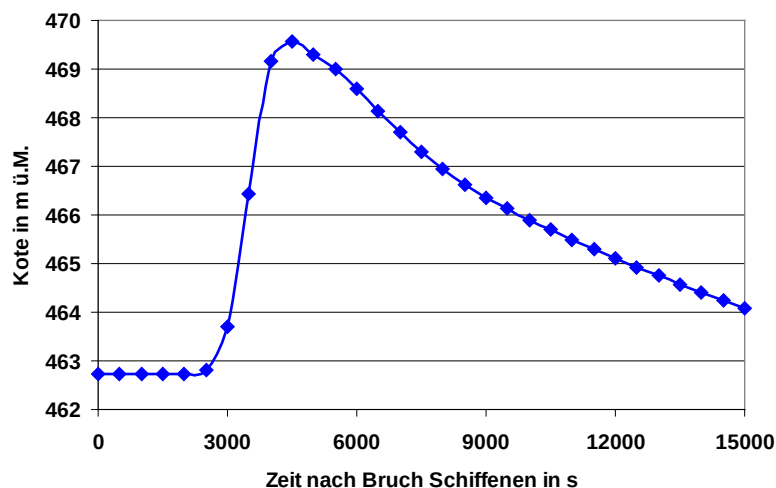
Pour le cas d'inondations avec terrasse, des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 10 m/s seront atteintes dans le lit de la rivière de l'Aar, dans le secteur des rives jusqu'à 7 m/s seront atteintes. Les répercussions géomorphologiques de l'inondation sont traitées au chapitre 3.4.4.2.

3.4.3.5 Rupture du barrage de Schiffenen

Pour cette analyse aussi, l'on a supposé une « volatilisation » totale du barrage. Le lac de barrage est rempli jusqu'à un niveau maximal de 532 m alt. Les répercussions de l'onde de submersion concernent avant tout la vallée du barrage de Schiffenen jusqu'à Laupen. Après env. 20 min, l'eau du lac de barrage atteint le viaduc ferroviaire de Gümmenen et est en partie retenue ici. Le maximum est atteint là-bas après env. 35 min, à cette occasion la digue de Gümmenen n'est pas submergée. Les forces d'érosion agissent avant tout dans la vallée de la rivière et à la limite orientale de la digue. Une montée du niveau de l'Aar dans la vallée de l'Aar près de Mühleberg peut seulement être constatée après env. 40 min, après env. 50 min. surviennent les premiers débordements à l'ouest du site de construction de l'EKKM, et après env. 56 minutes l'eau pénètre sur le terrain de la sous-station Est. Le maximum sur le site de Niederruntigen avec une cote de 469.7 m alt. est atteint après env. 72 minutes.

Après env. 3 heures, le terrain à l'Ouest de l'EKKM est à nouveau libre, après env. 3.5 heures, le reste de l'eau du terrain du poste de commutation Est est écoulé. L'état précédent des eaux courantes est atteint après env. 5 heures (Fig. 3.4-6).

Fig. 3.4-6 : Courbe de la cote de crues sur le site de l'EKKM au Gewiss.-km 156.2 lors d'une rupture totale du barrage de Schiffenen



Dans les calculs, un événement de crues à Schiffenen ne conduit pas à des conditions dynamiques de crues sur le site de construction. L'on n'atteint pas des débits qui pourraient conduire à des processus d'érosion significatifs. Dans lit de la rivière de l'Aar, l'on atteint jusqu'à 4 m/s, sur les surfaces proches des rives jusqu'à 3 m/s, autrement jusqu'à 2 m/s. Par contre, dans la vallée de la Sarine, il faut s'attendre à des modifications de terrain importantes (voir chap. 3.4.4.2). L'écoulement maximal de l'Aar atteint sur le modèle d'écoulement en aval de Niederried à la suite de la rupture de Schiffenen s'élève à 9700 m³/s et illustre l'importance d'une rupture de barrage par rapport à un événement extrême dû aux crues.

3.4.3.6 Rupture du barrage de Rossens

Avec la rupture totale du barrage de Rossens il s'ensuit l'onde de submersion particulière la plus grande en volume dans le secteur analysé. Dans une simulation, de façon analogue aux cas de Mühleberg et Schiffenen, avec le niveau d'eau de fonctionnement maximal autorisé de 677 m alt., le mur a été complètement enlevé et l'onde de submersion calculée jusqu'au site de construction de l'EKKM. Dans l'étroite vallée de la Sarine jusqu'à Fribourg, la vague de crue s'élargit rapidement et après presque une heure atteint le lac de Schiffenen, dont l'on a considéré le niveau du lac avec le niveau d'exploitation maximal autorisé de 532 m alt. Le barrage est atteint env. 15 min. plus tard. La largeur maximale de la vague au barrage de Schiffenen est atteinte après 2h50, le niveau d'eau du lac se situe alors à presque 8 m au-dessus de la crête du barrage. Après 2h.30 l'on peut constater les premières répercussions sur le site de la KKM et l'EKKM, à partir de ses niveaux d'eau de base l'Aar grossit entre 462 m alt. et 463 m alt. Le niveau de 465 m alt. et dépassé après 3 heures 15, l'Aar commence à déborder à l'Ouest du site de construction de l'EKKM. Un maximum, qui en fonction des crues très statiques dans le secteur de la KKM et l'EKKM, a le même niveau, est atteint après 4 heures avec 469 m alt. Le niveau est plus bas que celui des événements particuliers de Schiffenen et Mühleberg, par contre l'événement dure plus longtemps. Dans la vallée de l'Aar, proche du site de construction il ne se produit pas de processus érosifs ou alors seulement sans importance. La digue de Gümmenen ne joue pas de rôle important dans la retenue, étant donné que l'endroit étroit dominant dans ce scénario se situe au barrage de Schiffenen et en amont dans l'étroite vallée de la Sarine.

3.4.3.7 Rupture du barrage du Hongrin

Une simulation à deux dimensions de la rupture totale du barrage du lac Hongrin démontre que les répercussions pour le site de construction de l'EKKM sont négligeables. Le débit maximal à Fribourg atteint 782 m³/s et se situe ainsi au-dessous de HQ₁₀₀₀. Aucun autre calcul n'a donc été effectué pour le secteur en aval.

3.4.3.8 Événements multiples

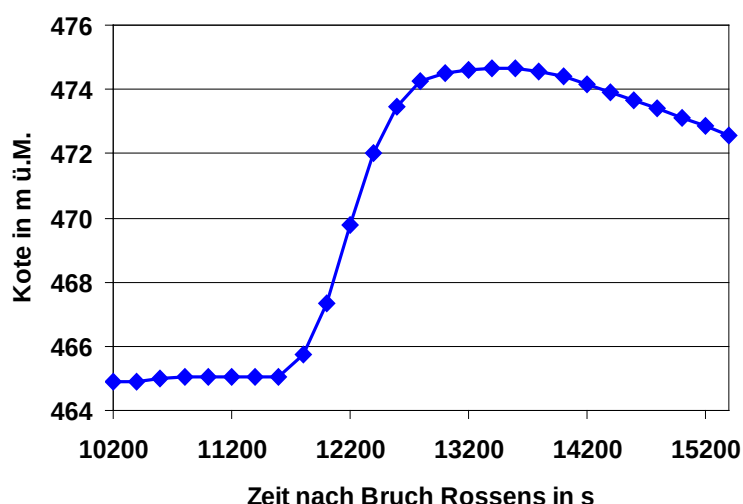
Des événements combinés conduisent potentiellement aux plus grands événements de crues théoriques imaginables. La probabilité pour l'apparition d'événements multiples se réduit clairement par rapport aux événements simples selon la probabilité partielle pour l'événement consécutif. Pour la classification des événements, les événements multiples sont malgré tout pris en compte.

Étant donné que les barrages dans le bassin versant de l'Aar au-dessus du lac de Thoune, ne provoquent pas d'onde de submersion critique pour le barrage de Mühleberg même lors d'événements multiples comme une défaillance séquentielle, les événements multiples doivent avant tout être considérés pour les barrages de la Sarine. Un lien avec le bassin versant de l'Aar n'est pas nécessaire. La plus forte cote de crues d'un événement simple sur le site de construction résulte cependant de la rupture totale du barrage de Mühleberg. Pour ce mur, il n'est toutefois pas plausible qu'il se brise à la suite de la rupture d'un barrage de la Sarine. Les crues de la Sarine sur le site de Mühleberg sont statiques et ne peuvent provoquer aucune défaillance. Même la rupture simultanée de Schiffenen et Mühleberg n'est pas problématique, dans la mesure où la première onde de submersion s'est déjà évanouie lorsque la deuxième onde de submersion arrive.

Parmi les barrages de la Sarine (Tableau 3.4-7) l'intérêt se porte sur les événements multiples des deux plus grands barrages Rossens et Schiffenen comme scénarios maxima potentiels. La considération du calcul simple des deux gros barrages de la Sarine démontre qu'une rupture simultanée ne provoquerait pas d'événement nettement plus fort qu'une rupture individuelle. Le maximum de l'onde de submersion de Schiffenen et le maximum de l'onde de submersion de Rossens sont distants de presque 3 heures l'un de l'autre. Une rupture simultanée des barrages provoque sûrement des niveaux d'eau plus profonds qu'un événement séquentiel des deux barrages.

Parmi les événements multiples dans le bassin versant de la Sarine, il faut donc considérer les répercussions d'événements séquentiels comme potentielle limitation de cas. Ceux-ci sont dans tous les cas plus élevés que les événements simultanés des barrages respectifs pris en considération. Comme scénario, l'on a admis une rupture totale de Rossens lequel provoque une rupture totale de Schiffenen. La rupture doit survenir lors de l'arrivée du maximum de l'onde de submersion de Rossens à l'endroit du barrage de Schiffenen. À cette occasion, autant le lac de Gruyère que celui de Schiffenen sont remplis au maximum. Environ 3 heures après la rupture du barrage de Rossens, le maximum à Schiffenen est atteint. La surface de la vallée de la Sarine en aval est déjà couverte d'eau, et sur le site de construction de l'EKKM, les premiers changements de niveau sont visibles. En l'espace de 56 min. après la rupture du barrage de Schiffenen, le niveau d'eau à l'EKKM atteint très vite un maximum de 474.6 m alt. (voir Fig. 3.4-7).

Fig. 3.4-7 : Courbe de la cote des crues sur le site de l'EKKM au Gewiss.-km 156.2 lors d'une rupture séquentielle de Rossens / Schiffenen



La cote tombe à nouveau relativement vite. Le maximum à l'EKKM survient ainsi presque 4 heures après la rupture à Rossens. L'événement, lequel se situe proche du plus fort événement de crues hypothétiquement envisageable, amène à des cotes légèrement plus élevées que la rupture du barrage de Mühleberg, mais se trouve être sur le site un événement de crues purement statique.

3.4.3.9 Résumé des analyses de ruptures de barrages

Dans le Tableau 3.4-8 suivant, sont résumés les résultats des analyses pour le site de Niederruntigen :

Tableau 3.4-8 : Cotes de crues maximales des ruptures de barrages analysées sur le site de Niederruntigen

Rupture de barrage analysée	Cote d'eau max. (m alt.) au Gewiss.-km 156.2
Mühleberg	474.2 (472.3 sans terrasse)
Rossens	469.0
Schiffenen	469.7
Rossens et Schiffenen séquentiel	474.6

Sur la base des résultats des calculs pour l'EKKM, il ressort que le niveau d'eau lors de quelques ruptures de barrages peut monter jusqu'à un maximum de 474.2 m alt. Cela correspond au niveau d'eau communiqué pour la rupture totale du barrage de Mühleberg. Ces résultats reposent sur des analyses conservatives. Bien que l'utilisation de maquettes à deux dimensions contribue à une présentation plus réaliste des événements, des hypothèses conservatives sont atteintes comme p. ex. la volatilisation des barrages, desquelles résulte dans l'ensemble une surestimation du niveau d'eau potentiel.

Des événements multiples peuvent être construits, qui entre autre peuvent conduire à de fortes cotes de crues sur le site. De tels événements ont toutefois une probabilité d'apparition nettement plus faible et ne doivent ainsi pas contribuer de façon importante à la Core Damage Frequency (CDF – fréquence des dommages au cœur). Une évaluation concrète de ces probabilités de survenance et les contributions correspondantes à la CDF sera effectuée plus tard dans le cadre de l'ASP relative à la demande de permis de construire et ou d'exploiter.

Ce n'est qu'en cas de rupture du barrage du lac de Wohlen que peuvent survenir des vitesses d'écoulement sur le site de construction qui pourraient avoir des effets d'érosion (voir chap. 3.4.4.2).

3.4.4 Autres aspects hydrologiques

3.4.4.1 Etiages

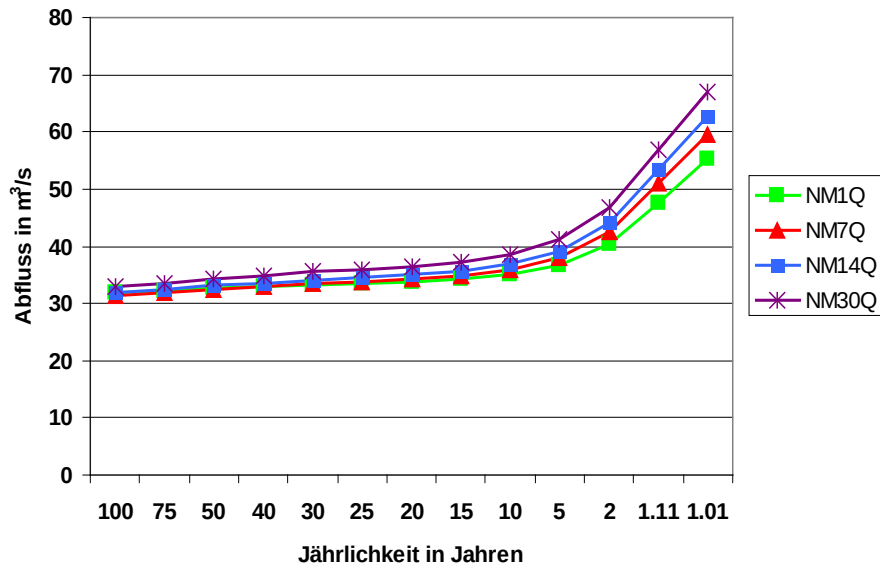
3.4.4.1.1 Station de mesure de l'Aar Berne-Schönau

Pour l'appréciation des débits de l'Aar sur le site de construction, l'on utilise les valeurs des mesures officielles de la station de mesure de Berne-Schönau située le plus près. Les plus bas niveaux des débits journaliers de l'Aar mesurés depuis la mise en service de la centrale d'Oberhasli KWO ont été atteints en 1930 avec 28.7 m³/s et 1944 avec 28,9 m³/s. Ces plus basses valeurs sont descendues en-dessous avant (1918 jusqu'à 1929) 8 fois avec des valeurs extrêmes de 20.8 m³/s (1921) et 21 m³/s (1925). Le comportement des étiages s'est toutefois nettement modifié avec la construction des lacs de barrage dans le secteur du Grimsel, de sorte que les valeurs avant 1930 ne sont plus déterminantes pour la définition des valeurs absolues des étiages et des annualités.

Les valeurs moyennes journalières les plus basses de ces 10 dernières années se situaient le 14.01.2006 à 30.8 m³/s et le 12.02.2006 à 30.9 m³/s. En hiver, durant la période de novembre à mi-mars, il faut généralement partir de faibles débits de 50 m³/s, les minimas annuels se situent, en règle générale, vers 40 m³/s, les valeurs extrêmes vers 30 m³/s. Dans les successions de données historiques de la Station Berne-Schönau (depuis 1930), l'on peut constater qu'aucune valeur annuelle plus faible n'est survenue durant le semestre d'été, pour les mois d'avril jusqu'à septembre. De ce fait, l'on ne doit pas s'attendre à des débits inférieurs à 30 m³/s sur le site de construction.

La banque de données établie par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) fournit des indications sur les valeurs extrêmes des débits pour de longues périodes. Dans ces statistiques, pour la station de l'Aar Berne-Schönau est indiqué un événement extrême centenaire avec un débit d'env. 31 m³/s (voir Fig. 3.4-8). Pour ce faire, NMxQ correspond à la moyenne arithmétique la plus faible de x valeurs moyennes journalières qui se suivent durant l'année d'observation.

Fig. 3.4-8 : Annualités des étiages au niveau de l'Aar Berne-Schönau



Source : Niedrigwasserstatistik NQstat des BAFU

3.4.4.1.2 Mesures à la centrale hydroélectrique de Mühleberg

En hiver 2006, l'on a mesuré durant le déroulement de la journée le plus faible débit de ces 10 dernières années à la centrale hydroélectrique de Mühleberg avec 27.41 m³/s. Dans ce cas, le niveau d'eau en aval de la centrale hydroélectrique n'est toutefois pas descendu au-dessous de 461.1 m alt. La raison consiste dans l'exploitation de la centrale hydraulique de Niederried située en aval. La cote du lac de Niederried accumulé par la centrale hydroélectrique est dans la mesure du possible maintenue à la valeur maximale de 461.14 m alt comme cela est prescrit dans la concession pour les mois d'octobre jusqu'à avril inclus. Des fluctuations peuvent survenir qui toutefois, depuis le 15.08.2006, n'ont jamais provoqué des niveaux d'eau inférieurs à 460.7 m alt à la KKM. En été, en raison de la concession, le niveau d'eau du lac de barrage de Niederried ne peut pas monter au-dessus de 460.34 m alt. Actuellement, pour des raisons écologiques, il est examiné si en été aussi, l'on ne pourrait pas utiliser les hauteurs de retenue d'hiver.

3.4.4.1.3 Evaluation de la situation des étiages

Sur la base des indications citées ci-dessus, l'on s'aperçoit que les débits inférieurs à env. 30 m³/s en fonction des faibles écoulements dus aux intempéries sont très rares. Il y a deux scénarios imaginables qui sont indépendants des intempéries qui peuvent provoquer de plus faibles écoulements :

- Perte de la retenue de Niederried et en même temps interruption de l'amenée d'eau de l'Aar au barrage de Mühleberg. Uniquement en fonction de la perte du barrage de Niederried il pourrait y avoir la possibilité en hiver et/ ou en période de faibles écoulements, que le niveau continue à descendre. Une tombée à sec totale de l'Aar jusqu'au fond de la rivière est toutefois empêché par des bancs de sable dans le secteur du confluent de la Sarine. Ceux-ci pourvoient ainsi à un niveau d'eau minimum dans le secteur de l'EKKM, lequel ne peut pas être en dessous. La probabilité d'une interruption totale de l'Aar en amont est par ailleurs faible, étant donné que la centrale hydroélectrique de Mühleberg est suffisamment équipée de systèmes redondants, pour garantir une amenée d'eau continue.
- Possibles travaux de révision aux barrages de retenue dans le secteur de la KWO plus un vidage du lac Oberaar et du lac du Grimsel avant l'hiver. Dans ce cas, des niveaux d'étiages extrêmes aux alentours de 20 m³/s sont envisageables. Mais ici aussi, le scénario est peu probable, étant donné que dans le secteur de la KWO tous les barrages de retenue et centrales ne sont pas révisés en même temps.

Pour l'exploitation de l'EKKM, une quantité d'eau de max. 4.3 m³/s (voir chap 2.4.6) est nécessaire. Par conséquent, même avec de possibles conditions d'étiages extrêmes, il y a toujours une quantité suffisante d'eau de refroidissement.

L'influence d'étiages de l'Aar sur les eaux souterraines est faible et limitée au secteur des eaux souterraines influencées par l'Aar. Les étiages de l'Aar surviennent normalement en hiver (voir plus haut). Durant ces périodes, le niveau des eaux souterraines alimentées par les eaux des versants atteint son maximum. Les étiages des eaux souterraines ne provoquent donc aucun manque d'eau à un point de prélèvement, pas plus qu'ils n'ont d'influence significative dans le secteur des fondations.

3.4.4.2 Influences géomorphologiques sur l'hydrologie

Parmi les événements géomorphologiques dans le bassin versant de l'EKKM, dans les répercussions potentielles qu'ils pourraient y avoir sur l'hydrologie, il s'agit de mouvements de masses, d'érosion ou de sédimentation dans les cours d'eau.

3.4.4.2.1 Mouvements de masse

Des mouvements de masses tels que glissements de terrain, laves de boue et de pierres, éboulements et avalanches surviennent dans le bassin versant, mais ne présentent pas de mise en danger du site de construction. Des événements en amont du site de construction et dans les environs proches sont trop petits pour avoir des répercussions visibles. En fonction du relief, de plus grands événements peuvent être seulement attendus dans les Alpes. Leurs répercussions sont amorties dans le bassin intermédiaire de sorte qu'elles n'ont pas de conséquences pour le site de construction.

Dans les calculs relatifs aux ruptures de barrages l'on peut constater, que sur la rive incurvée au Runtigenflue, qui se situe à l'Est du point de confluence de la Sarine et qui aurait plutôt le potentiel pour une retenue, il n'existe habituellement pas de contraintes de cisaillement élevées étant donné que l'Aar prend le chemin le plus direct par l'Oltigenmatt. Les mouvements de masses dans les environs du site de construction ne sont donc pas en mesure de bloquer l'Aar au point que le site de construction soit concerné. Les événements possibles aussi en amont du site de construction ne provoquent pas de sérieuses mises en danger supplémentaires. De possibles glissements de terrain dans le lac de Wohlen en fonction du volume maximum imaginable et de la profondeur modérée du lac de Wohlen ne provoqueront pas d'événements sur le site de construction qui dépassent le niveau des crues d'une rupture totale du barrage de Mühleberg.

La mise en danger par des laves de boue et de pierres et d'éboulements est traitée au chap 3.6.2.7.

3.4.4.2.2 Erosion / Déplacement de la rivière

Le fond de l'Aar, depuis le barrage de Mühleberg jusqu'au confluent de la Sarine ne s'est pratiquement pas modifié durant ces dernières années. Il n'y a à aucun transport d'éboulis. Dans la Sarine par contre, il y a des tendances à l'érosion sur le fond. Les éboulis sont transportés jusqu'au confluent avec l'Aar et déposés là-bas.

Cette érosion qui intervient avant tout lors de forts débits n'a pas de répercussions critiques pour la considération du niveau des crues.

Cela se passe autrement pour les processus d'érosion lors d'ondes de submersion qui surviennent à la suite de ruptures de barrages. Pour la vallée de l'Aar sur le site de construction, entre le barrage de Mühleberg et le confluent de la Sarine, il faut s'attendre ici à d'importants processus de charriages. Comme l'on peut le démontrer à l'aide de la modélisation bidimensionnelle des événements de crues, lors d'une rupture totale du barrage de Mühleberg, surviennent de hautes vitesses d'écoulement. Celles-ci provoquent une forte érosion, en particulier dans les secteurs où des roches meubles forment le fond. Dans les 30 premières minutes de l'événement de crues, il faut s'attendre à des processus d'érosion. En particulier dans les 10 premières minutes interviennent partiellement de fortes contraintes de cisaillement, qui sont en mesure d'emporter aussi bien de l'herbe que des pavages. À certains endroits, les contraintes de cisaillement peuvent dépasser brièvement 500 N/m^2 , les flots continus produisent en surface des contraintes de cisaillement de l'ordre de 300 N/m^2 . Il faut donc s'attendre qu'au courant de l'événement des parties de rives soient emportées et que le lit de la rivière s'élargisse. La terrasse est posée de telle manière qu'elle résiste à ces charges. Il n'y a donc aucun danger d'affouillement pour le bâtiment du réacteur. Il ne faut pas s'attendre à ce que la molasse soit érodée dans de grandes

proportions. Cela vaut également pour la molasse sise sur les flancs de la vallée qui forme partiellement la paroi. C'est pourquoi il ne faut pas s'attendre ici à ce que surviennent des éboulements en grandes proportions. Pour la rupture totale du barrage de Schiffenen, il faut compter sur le terrain de l'EKKM avec seulement de faibles charges dynamiques. Sur les flancs de la terrasse surviennent à divers endroits pendant quelques minutes des contraintes de cisaillement, qui se situent juste au-dessus de 40 N/m^2 et qui peuvent ainsi attaquer la couche de gazon. Dans la vallée de la Sarine surviennent par contre de hautes vitesses d'écoulement et de contraintes de cisaillement, qui peuvent provoquer de l'érosion sur de grandes surfaces. En particulier aux endroits resserrés, comme les digues de rivière et les rives incurvées surviennent partiellement des contraintes de cisaillement jusqu'à plus de 1000 N/m^2 . D'importantes limitations se trouvent à la digue de Gümmenen et dans le secteur d'Oltigematt, où une grande partie de l'eau s'écoule à côté du lit de la rivière. Ces modifications de terrain n'ont pas pu être prises en considération dans la simulation. Il faut partir du fait qu'un élargissement de la vallée par l'érosion au-dessus du confluent de la Sarine amène de plus forts débits et ainsi des cotes d'eau plus élevées sur le site de construction. L'érosion en dessous du confluent de la Sarine, en particulier dans le secteur de la digue de Niederried, amène également de plus forts débits, réduit toutefois la cote de crues sur le site de construction. Les déclarations relatives à la rupture de Schiffenen peuvent être appliquées à d'autres ruptures de barrages sur la Sarine, mais l'étendue de l'érosion dépend de l'ensemble de la quantité d'eau écoulée. Celle-ci agit différemment selon le scénario des durées d'érosion et des forces d'érosion.

Les processus de déformation de terrain qui se déroulent en cas d'inondation à la suite d'une rupture de barrage peuvent avoir des répercussions sur l'exploitation et la sécurité de l'EKKM. Cela vaut avant tout lors d'une rupture du barrage de Mühleberg. L'installation sera donc conçue de telle manière qu'un arrêt sûr du réacteur soit garanti également lors des processus érosifs qui se déroulent là-bas. Les processus de déformation de terrain lors de crues à la suite d'événements de ruptures de barrages dans la région de la Sarine peuvent le cas échéant provoquer une augmentation des cotes de crues indiquées jusqu'ici. Étant donné que les cotes de crues des ruptures simples des barrages de Schiffenen, Rossens et Hongrin se situent nettement en dessous de celles de la rupture simple de Mühleberg, il se trouve ici suffisamment de réserve de sécurité, tant que l'événement de la rupture simple du barrage de Mühleberg est maîtrisé dans la conception des installations.

3.4.4.2.3 Sédimentation

Dans l'étude des crues pour la KKM [8] l'influence de l'alluvionnement du lit de la rivière au confluent de la Sarine a été examinée. Une augmentation de près de 30 cm est attendue jusqu'en 2024, ce qui sur le site de la KKM représente une augmentation de HQ_{1000} de 13 cm. Une raison pour l'alluvionnement consiste dans l'exploitation du gravier effectuée jusque dans les années 1970 dans l'Aar en dessous du confluent de la Sarine et également de l'exploitation de gravier dans la Singine qui ont été suspendues, de sorte que de plus en plus de gravier est amené dans la Sarine. Afin d'obtenir une simple estimation conservatrice des effets de la sédimentation sur les crues pour l'ensemble de la durée d'exploitation, une sédimentation constante jusque dans l'année 2084 a été admise. Avec les valeurs estimées en [8] pour la sédimentation annuelle au confluent de la Sarine de 1500-2000 m³ un volume global déposé de 140.000 m³ a été établi, ce qui devrait provoquer des rehaussements du lit dans le secteur du confluent de la Sarine de et jusqu'à 1.2 m. Il est possible que la sédimentation s'avère plus faible, si à l'avenir un niveau du lit est atteint qui conduit à un charriage continu. De plus il se peut que des interventions anthropogènes conduisent par exemple à la prévention de crues, à une plus faible production de charriage ou à un plus faible rehaussement du fond. Avec le fond rehaussé pour l'année 2084, un $HQ_{10.000}$ a été calculé. Les cotes qui en résultent à l'EKKM se situent vers 466.15 m alt jusqu'à 466.45 m. alt. Cela correspond à une augmentation d'env. 20 cm par rapport à un $HQ_{10.000}$ avec le lit actuel et ainsi n'est pas critique.

L'influence de la sédimentation continue sur l'hydrologie du site de construction est ainsi faible, l'estimation de l'hydrologie n'est pas concernée par cette dernière.

Il n'en est pas de même lors d'événements de rupture de barrage. Ici, des déplacements de terrain de grande envergure sont envisageables. Le matériel érodé et transporté dans l'eau se dépose à des endroits avec des vitesses d'écoulement et/ou des contraintes de cisaillement en diminution. Pour le site de construction, en cas d'ondes de submersion de la Sarine, des dépôts sédimentaires proches du confluent de la Sarine sont envisageables, qui après une disparition de la crue peuvent provoquer une retenue de l'Aar. Il n'est pas envisageable que cette retenue dépasse la cote de crue ci-dessus. Même dans le cas de la rupture du barrage de Mühleberg, de petits dépôts sédimentaires sur le site sont probables. Avec la diminution d'intensité de l'onde de submersion en particulier, les contraintes de cisaillement diminuent. Les dépôts sédimentaires peuvent aussi bien se composer de sédiments érodés des lacs de barrage que de matériel charrié à l'extérieur. Les arbres s'ajoutent aussi. Leurs répercussions sont avant tout de nature dynamique, c'est-à-dire que des dommages interviennent par l'arrachage des troncs d'arbres. Une retenue supplémentaire par obstruction à Niederried est négligeable, étant donné que la centrale hydroélectrique est éloignée de 4 km et qu'une décharge supplémentaire se fait sur par les digues latérales. D'autres endroits, comme ponts ou barrages mobiles où une obstruction significative pourrait survenir avec pour conséquence une retenue supplémentaire, ne sont pas proches du site de construction. Avec une rupture à Mühleberg, il faut s'attendre avant tout que des sédiments du lac de Wohlén soient érodés. Ce sont essentiellement des sédiments fins qui sont seulement déposés plus loin en aval dans les secteurs d'eaux calmes. Le dépôt sédimentaire principal ne se trouve donc pas dans les environs du site de construction.

Selon le scénario de rupture de barrage et le site choisi pour la prise d'eau, une interruption de l'approvisionnement d'eau de refroidissement peut survenir. Par une conception adaptée, une protection suffisante est assurée contre les éventuelles interruptions de l'approvisionnement d'eau de refroidissement (voir chap. 3.6.2.41).

3.4.4.3 Réchauffement du climat

Les effets possibles du réchauffement du climat sont présentés au chapitre 3.3.11.

Du fait des plus hautes températures, la fonte des neiges interviendra plus tôt, de sorte que le débit maximum de l'été se déplacera au printemps. De plus longues périodes de sécheresse sont attendues en été, dans la mesure où l'évaporation augmente et les précipitations de l'été diminuent. Particulièrement en été et en automne, cela peut provoquer une diminution du débit, qui peut atteindre des valeurs qui momentanément apparaissent en hiver. Sur le site de construction, les événements d'étiages apparaissent jusqu'ici exclusivement durant le semestre d'hiver, alors que les événements de crues surviennent avant tout durant le semestre d'été.

En relation avec les crues, il faut s'attendre avant tout en hiver à des précipitations extrêmes plus fréquentes, de sorte que dans les petits à moyens bassins hydrographiques en particulier pourraient survenir des crues plus fréquentes. Sur le site de construction, l'Aar dispose d'un grand bassin versant hétérogène dans lequel ces effets sont équilibrés. Dans le bassin versant haut alpin de l'Aar, les événements de précipitations hivernaux continueront à tomber sous forme solide.

Avec ces prévisions, l'on n'attend pas d'accroissement, mais plutôt un décroissement de crues extrêmes, ou d'événements d'étiages, étant donné que du point de vue actuel, pour les événements présents, une tendance saisonnière contraire à l'exemple vécu jusqu'ici est prédite.

3.4.4.4 Gel des cours d'eau

Un gel complet des cours d'eau aux alentours du site de construction n'est pas à exclure, en particulier pour le lac de Niederried il est connu qu'en hiver, il gèle partiellement [78]. La formation de glace se passe essentiellement dans l'ancien bras du lac de Niederried et pas dans le secteur traversant.

En hiver, on peut souvent observer la formation de glace sur le lac de Wohlen. L'hiver est une période avec de faibles débits, l'eau du lac de Wohlen est de ce fait complètement prise en charge par les turbines de la centrale hydroélectrique de Mühleberg, de sorte qu'en cas normal, aucun mélange d'eau et de glace ne s'échappe par dessus le barrage. Les barrages à Mühleberg et Niederried sont équipés d'une installation de voile d'air chaud qui empêche la formation de glace au barrage, de sorte que les vannes du barrage restent toujours fonctionnelles. Par ailleurs, au barrage de Mühleberg un vannage de fond est à disposition, lequel permet, lorsque le lac de Wohlen est gelé, de laisser échapper des eaux profondes relativement chaudes de manière ciblée, pour éviter ou diminuer les gelées en aval.

Des gelées sur le cours de l'Aar peuvent arriver, bien qu'elles soient encore plus rares que les gelées des lacs de barrage, indépendamment des bords des cours d'eau. Les gelées sur l'Aar peuvent survenir de diverses manières. Il y a par exemple les glaces flottantes, lesquelles sont formées dans des secteurs en amont et qui sont charriées en aval. En situation normale, ces glaces sont retenues par le barrage de Mühleberg et restent dans le lac de Wohlen. C'est seulement

lorsque la capacité des turbines ne suffit plus que l'on les laisse s'échapper par-dessus le barrage. Pour éviter cela, il y a la possibilité ici d'utiliser le vannage de fond.

L'Aar pourrait, le cas échéant, aussi geler complètement en surface. A la différence des lacs, dans lesquels il y a moins de turbulences, pour une gelée complète des cours d'eau il est nécessaire que la température de l'eau soit proche de 0 °C ; normalement une telle température est seulement atteinte après une longue période de froid. Pour le site de construction, il n'y a aucun enregistrement concret connu relatif à un tel événement.

En général, sur la base des données à disposition, l'on peut en déduire une tendance à la baisse en ce qui concerne les formations de glaces sur les cours d'eau suisses, la formation de glace va vraisemblablement encore continuer à diminuer en fonction des effets du réchauffement du climat (voir chap. 3.3.11).

La mise en danger possible par la formation de glace est traitée au chapitre 3.6.2.5.

3.4.5 Résumé, importance pour la viabilité du site et la conception de l'installation

Les calculs indiquent que les événements de crues hydrométéorologiques peuvent être nettement dépassés par rapport aux débits maximum et aux niveaux d'eau atteints définis dans les scénarios de ruptures de barrages. Indépendamment des ruptures multiples séquentielles, la rupture totale du barrage de Mühleberg provoque le plus haut niveau d'eau sur le site de construction.

La disposition de la centrale est conçue de telle façon que tous les événements de crues importants pour la sécurité sont maîtrisés. D'une part, cela se fera par un dimensionnement de la terrasse adapté. Si par exemple des composants de la centrale liés à la sécurité devaient être édifiés en fonction de la hauteur de la terrasse admise lors des analyses de ruptures de barrages, 10.000 ans d'événements dus aux crues (de sécurité) seraient largement couverts, ainsi que l'ensemble des scénarios de ruptures de barrages, à l'exception de quelques ruptures multiples séquentielles.

D'autre part, la centrale est conçue afin qu'un arrêt sûr du réacteur soit garanti, même pour les événements importants lors desquels l'eau s'élève au-dessus du point zéro de la centrale. Cela est réalisable par un système de sas étanche ou par un positionnement adapté des traversées du bâtiment.

Le dimensionnement de la terrasse et la conception de la centrale doivent garantir que seuls les événements de crues avec une très faible fréquence d'apparition provoquent une inondation de l'aire de la centrale qui peut dépasser le point zéro de celle-ci.

Les répercussions des étiages et des influences géomorphologiques sont insignifiantes et/ ou sont couvertes par la conception ou le dimensionnement de l'installation et sont ainsi sans importance pour la viabilité du site.

Du point de vue actuel, les effets prévisibles du changement du climat seront couverts par la conception.

Des vitesses de courants qui pourraient avoir des effets d'érosion peuvent survenir uniquement en cas de rupture du barrage du lac de Wohlen. Les mouvements sédimentaires pourraient localement bloquer le passage de l'eau ; cependant, du fait des diverses sources froides (voir chap. 2.4) un tel blocage n'a aucune influence sur la sécurité nucléaire.

3.5 Géologie, sol de fondation, sismologie

3.5.1 Géologie

3.5.1.1 Vue d'ensemble

Le site de Niederruntigen choisi pour l'EKKM se trouve sur l'Aar, près de la confluence avec la Sarine. Il est situé dans le bassin molassique de la Suisse occidentale, qui est limité ici par le Jura plissé au nord et par la molasse subalpine écaillée et les nappes préalpines au sud.

Le bassin molassique est un bassin typique d'avant-pays, qui s'est constitué au pied des Alpes en formation. En raison de la subduction, la plaque continentale européenne s'enfonce en direction du sud. Le poids additionnel de la masse alpine a eu pour effet qu'au Tertiaire, la plaque européenne s'est incurvée vers le bas, ce qui a entraîné la formation, au nord du front alpin, d'un bassin molassique au profil triangulaire. C'est aux abords des Alpes proprement dites que le bassin est le plus profond et c'est là que les sédiments qui y sont déposés sont les plus épais. Leur épaisseur se réduit en direction du nord et ils s'enfoncent en coin dans la région du Jura. La sédimentation de la molasse débuta au Tertiaire avec la subsidence de tout le Plateau suisse (Oligocène). Les sédiments principalement sablonneux de la molasse se composent de matériaux d'érosion des Alpes en formation déposés dans le bassin de l'avant-pays septentrional. Ces dépôts du Tertiaire se trouvent en discordance au-dessus des sédiments mésozoïques.

La sédimentation des couches mésozoïques s'est faite dans des conditions relativement calmes entre le Trias et le Malm supérieur et en partie jusqu'au Crétacé, ce qui correspond à une période comprise entre env. 245 et 160 (resp. 65) millions d'années. La base des séries mésozoïques se compose d'évaporites ductiles, principalement d'anhydrite et de sel gemme. Un ancien soubassement rocheux cristallin, de plus de 300 millions d'années (Pré-Mésozoïque ou Paléozoïque), forme la base. Il se compose surtout de granites et de gneiss. On y trouve aussi des inclusions de sédiments permien et carbonifères, déposés dans des fossés (*graben*). Ceux-ci sont des dépressions définies par des failles et dus à des mouvements décrochants transpressifs. Durant cette période, on peut dire que la croûte a été soumise à une nette extension.

Il y a env. 13 millions d'années, la collision à l'origine de la formation des Alpes entraîna un déplacement vers le nord des couches du bassin molassique le long d'un horizon de cisaillement (théorie de la poussée à distance). La théorie « thin-skinned », largement acceptée par la communauté scientifique, affirme que le socle situé sous le Jura plissé n'a pratiquement pas été touché. La compression s'y est transmise vers le sud, sur le front alpin. Ce sont les couches d'anhydrites et de sels gemmes du Trias, situées sous les dépôts molassiques, qui ont joué le rôle d'horizon de décollement. Selon la théorie « thick-skinned », au contraire, le socle aurait été comprimé sous le Plateau avec le terrain de couverture. Il n'y aurait pas eu de cisaillement (ou alors dans une faible mesure) dans les couches du Mésozoïque.

En bordure septentrionale du bassin molassique, l'horizon de cisaillement est déplacé par des failles de socle. La poussée vers le nord des couches de la molasse a eu pour effet le soulèvement des paquets de couches mésozoïques et, par conséquent, la formation du Jura plissé.

Figure 3.5-1 : Carte géologique et tectonique de la Suisse et des régions limitrophes, simplifiée d'après l'Office fédéral des eaux et de la géologie 2000a [61] et 2000b [62]



Geological cross-section of the Alpine region from NW to SE. The section shows the Autochthonous European foreland basement (pink) and the overlying nappes: Jura, Molasse basin, Subalpine Molasse, Prealpes klippen, Helvetic nappes, and Penninic nappes. The IR and AR massifs are shown beneath the Helvetic nappes, and the MB massif is beneath the Penninic nappes. A regional top crust restored mid-crustal detachment is indicated. The vertical scale ranges from 0 km to -50 km, with a note '[No vertical exaggeration]'. A 'pin' location is marked at 0 km.

Source : Université de Fribourg

3.5.1.2 Modèle géodynamique

3.5.1.2.1 Objectif

Le modèle géodynamique présenté ici donne une vue d'ensemble de la tectonique et de la géodynamique des environs étendus de l'EKKM. La structure de Fribourg et sa limite orientale – la zone de Fribourg – sont en particulier décrites dans leur cadre régional.

3.5.1.2.2 Géologie et tectonique régionales

La géologie et la tectonique de la région de Mühleberg sont déterminées par l'évolution du bassin molassique du Plateau, qui ne peut être comprise que dans le contexte des processus géologico-tectoniques à grande échelle. C'est pourquoi ceux-ci sont brièvement expliqués ci-dessous.

Le site de l'EKKM – figure Figure 3.5-1 (point rouge) et figure Figure 3.5-8 2 (flèche rouge) – est situé dans la zone de transition entre le Plateau occidental et central. Au sud se trouvent les Alpes, au nord l'arc jurassien (Jura plissé). Le sous-sol du Plateau est constitué d'une épaisse couche de sédiments molassiques, qui ont été déposés dans l'avant-pays alpin au Tertiaire, entre env. 34 et 10 millions d'années. Les rivières ont transporté le produit de l'érosion des Alpes – qui étaient en train de se soulever – sur de vastes plaines alluviales jusque dans le bassin molassique. L'évolution ultérieure des dépôts du bassin molassique a été marquée par deux avancées de la mer, suivies à chaque fois d'un retrait. Au cours de ce développement se sont déposées successivement la molasse marine inférieure (UMM), la molasse d'eau douce inférieure (USM), la molasse marine supérieure (OMM) et enfin la molasse d'eau douce supérieure (OSM). En bordure des Alpes, l'épaisseur des dépôts molassiques atteint 6 km. Les couches s'amincissent vers le nord. Au cours des périodes suivantes, les sédiments molassiques de la partie occidentale du Plateau ont été érodés jusqu'à la molasse d'eau douce inférieure.

Au-dessous des sédiments molassiques horizontaux, on trouve une succession de calcaires, marnes, argiles, anhydrites et sels gemmes du Trias, ainsi que du Jurassique. Ces sédiments mésozoïques et les couches de la molasse reposent sur le socle cristallin. Celui-ci correspond à celui de la Forêt-Noire et des Vosges au nord, ainsi qu'aux grands massifs des Alpes au sud (massifs de l'Aar et du Gothard). Il se compose essentiellement de granites et de gneiss. Localement, on trouve des creux en forme de sillons remplis de sédiments du Carbonifère et du Permien (sillons permo-carbonifères).

Les différentes caractéristiques tectoniques et les unités structurales que l'on rencontre sur le Plateau sont déterminées par une combinaison entre les conditions tectoniques lors du dépôt des sédiments et la compression ultérieure (plissement et cassure) pendant la phase principale du plissement des Alpes. L'histoire géologique récente du bassin molassique se déroule dans le champ de contrainte entre Alpes, Forêt-Noire et fossé du Rhin. A grande échelle, la tension peut s'expliquer par la convergence et la collision entre le microcontinent adriatique et la plaque européenne. On situe généralement la période principale de la formation récente des montagnes entre env. 25 et 3-4 millions d'années. Durant cette période, tout le paquet de sédiments mésozoïques et tertiaires, au-dessus du Trias moyen, a été décollé et poussé vers le nord. Dans la partie méridionale du bassin, la série molassique du Tertiaire peut aussi être détachée des couches mésozoïques sous-jacentes.

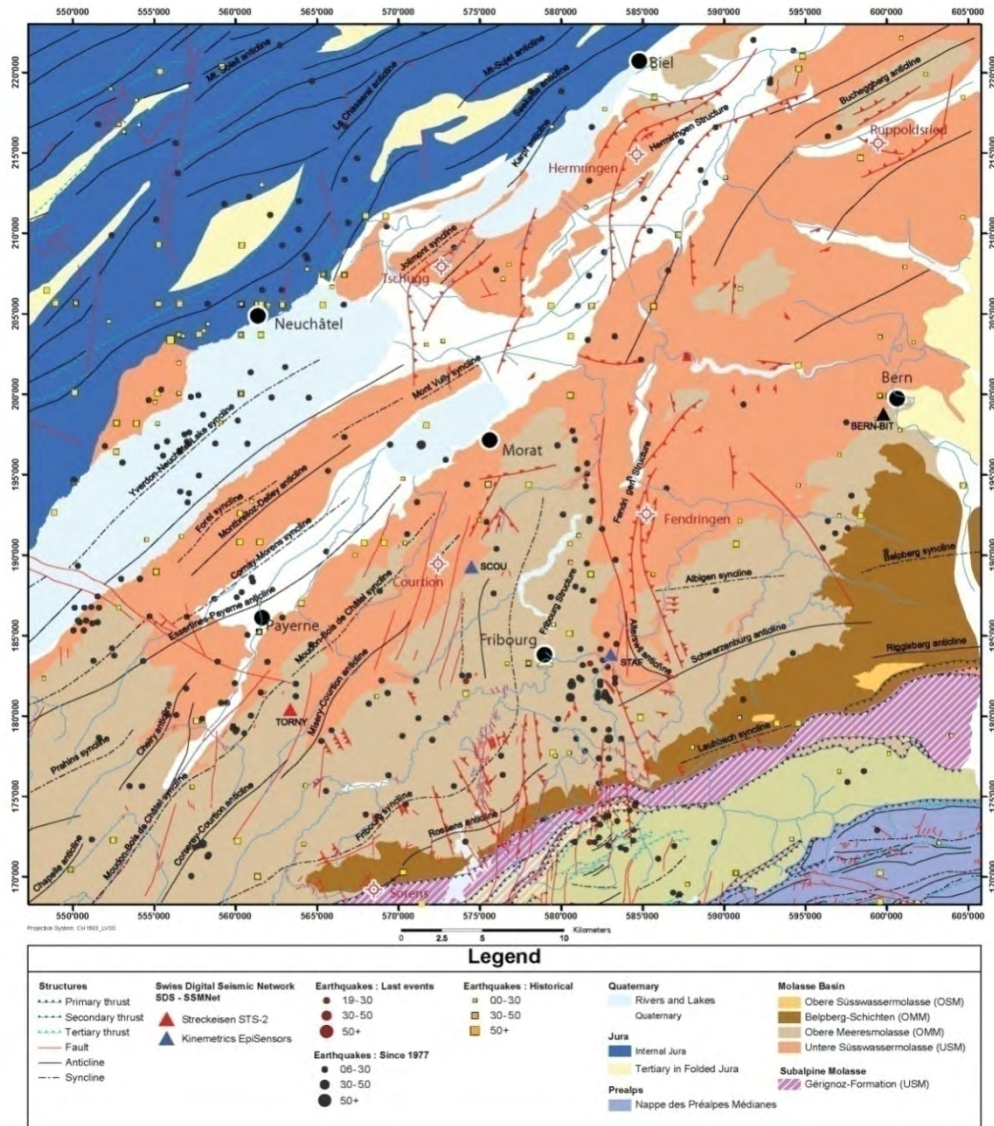
Des études récentes suggèrent cependant que la formation des reliefs est encore active aujourd'hui, ce dont témoigne une activité sismique continue. Mais dans notre région, la magnitude de la plupart des séismes est faible. La pression la plus importante se trouve à la perpendiculaire au front de la montagne, c'est-à-dire dans la partie occidentale du Plateau, en direction à peu près NO-SE.

3.5.1.2.3 Structures tectoniques dans le bassin molassique

Le cisaillement du bassin molassique et la formation des plis et chevauchements du Jura ont certainement eu lieu en même temps. La tectonique compressive de l'avant-pays alpin a eu des conséquences sur la constitution de la molasse. Les chevauchements et failles inverses qui sont liés aux structures plissées – généralement déterminées par des cassures – prennent naissance dans le niveau de décollement des évaporites du Trias qui surmontent le socle.

Les plis et chevauchements sont généralement orientés SO-NE. On note cependant des exceptions à cette tendance générale. On observe ainsi en plusieurs endroits que des zones de failles frontales, orientées SO-NE (ou des rampes) passent à des rampes latérales orientées SSO-NNE, comme dans le cas des structures de Tschugg et de Hermrigen (figure Figure 3.5-3). Le synclinal (la zone) de Fribourg orienté N-S est une autre structure à signaler : elle s'étend de la molasse subalpine au sud de Fribourg en direction du nord jusque dans la région de Gümmenen à l'est du lac de Morat.

Figure 3.5-3 : Carte tectonique synoptique, intégrant les résultats récents de l'interprétation sismique (voir chapitre 3.5.3.7.2), notamment les failles qui sont en rapport avec la zone de Fribourg et les structures de Hermrigen et de Tschugg.



Les failles avec déplacements latéraux, resp. horizontaux, sont particulièrement intéressantes : l'une orientée à peu près N-S avec sens du mouvement vers la gauche (senestre), qui correspond à la zone de Fribourg et une autre de direction, NO-SE à ONO-ESE avec failles normales vers la droite (dextrales), qui correspond à la faille de La Lance.

Ces structures se composent de failles de faible étendue et peuvent être interprétées à l'aide de données de sismique réflexion dans le sous-sol ou de données géologiques à la surface. Les quelques failles qui forment la limite orientale de la structure ou zone de Fribourg sont les éléments structuraux les plus notables dans la zone étudiée (voir chapitres 3.5.3.7.2 et 3.5.1.2.4).

3.5.1.2.4 Structure et zone de Fribourg

La structure de Fribourg (FS) s'étend de la molasse subalpine en direction du nord jusqu'aux abords de Gümmenen à la hauteur de l'extrémité orientale du lac de Morat. Grâce à différentes données géologiques et géophysiques et surtout à l'aide de la nouvelle interprétation des lignes de sismique réflexion, la FS peut être identifiée et décrite avec précision. L'expression « zone de Fribourg » provient d'études sur la localisation d'épicentres. Les épicentres de trois essaims sismiques récents semblent se trouver sur une ligne droite (un linéament) de direction approximativement N-S qui passe directement à l'est de la ville de Fribourg (voir figures Figure 3.5-3 et Figure 3.5-25). Cet alignement est connu sous le nom de zone de Fribourg (FZ).

Pour la FS, il s'agit d'un large synclinal orienté N-S, appelé aussi synclinal de Fribourg-Galmiz. Les bordures orientales et occidentales se caractérisent par de légères flexures qui peuvent présenter localement une géométrie faiblement anticlinale. La formation des synclinaux (ou structure de *graben*), tout comme celle des flexures, est liée à la réduction des horizons évaporitiques du Trias. Leur épaisseur est plus faible dans la partie centrale du synclinal et plus forte à l'est et à l'ouest des bordures. Au-dessus de cet horizon, dans la zone de transition, apparaît une sorte de flexure dont l'origine est liée au développement de failles – souvent avec déformation normale. Dans le champ de contrainte actuel, ces failles sont réactivées en failles décrochantes senestres (« strike-slip faults ») et sont la cause de l'activité sismique observée. Celle-ci se concentre sur le bord oriental de la FS où des séismes se produisent fréquemment, surtout dans le secteur situé au sud. Ces essaims sont alignés N-S, ce qui a conduit à l'hypothèse qu'il pourrait s'agir d'une grande faille active de 30 km de long [22].

Grâce aux nouvelles interprétations des données sismiques, il est possible aujourd'hui d'attester que cette faille de 30 km de long n'existe pas (voir chapitre 3.5.3.7.2). Ces interprétations prouvent que la bordure orientale de la structure et de la zone de Fribourg se compose d'un certain nombre de failles peu étendues. A partir des manifestations des foyers de séismes, mais aussi de mesures de tension in situ, on peut déduire qu'il s'agit d'un champ de contrainte local orienté SE-NO. La SF s'est constituée, dans ces conditions, en zone de cisaillement de type Riedel avec sens de mouvement sénestre. A l'intérieur de cette zone, des segments de faille plus petits, orientés SSO-NNE ou SSE-NNO, montrent aussi un sens de mouvement sénestre.

La structure de Fribourg est limitée au nord, elle disparaît à la hauteur de l'extrémité orientale du lac de Morat. Les structures tectoniques situées plus au nord font partie d'un système de structures plissées déterminées par des failles avec une orientation SO-NE. Les chevauchements, liés aux plis, forment des rampes que l'on identifie nettement sur les cartes structurales déduites de la sismique réflexion (voir chapitre 3.5.2.5, figure Figure 3.5-39). Du côté ouest, ces rampes changent typiquement de direction pour s'orienter SSO-NNE jusqu'à presque N-S. Entre la structure de la région de Hermrigen et celle de Tschugg, on observe une géométrie synclinale orientée à peu près N-S. Ce synclinal correspond à une structure d'interférence qui est liée aux rampes latérales au nord et ne peut donc pas être considérée comme le prolongement septentrional du synclinal de Fribourg ou de la zone de Fribourg. Cette structure ne peut pas non plus être mise en rapport avec des mouvements d'évaporites du Trias : elle est exclusivement un résultat de la tectonique de chevauchement et de plissement dont il a été question plus haut.

De manière générale, on peut constater que les segments de faille de la couverture sédimentaire ne s'étendent pas jusqu'au soubassement rocheux. Les mouvements tectoniques de ces sédiments sont découplés de la tectonique du soubassement. Cela n'exclut pas que des « soft links » existent entre les systèmes de failles de la couverture et ceux du soubassement, mais la probabilité d'une seule grande faille est faible. Le rapport longueur/largeur (« aspect ratio ») de 2 :1 qu'il faut admettre pour les bassins molassiques le confirme, ce qui, à son tour, est lié au fait que tous les séismes observés dans la région étudiée surviennent à faible profondeur, c'est-à-dire à moins de 3-4 km et qu'ils doivent donc être localisés dans les séries sédimentaires.

3.5.1.2.5 Topographie, néotectonique et tectonique actuelle

La topographie et la morphologie fluviale des environs éloignés de Mühleberg permettent de connaître les processus de dépôt et d'érosion glaciaires et post-glaciaires. Les principales caractéristiques sont les profondes vallées fluviales post-glaciaires, aussi bien dans la région de Fribourg que dans celle de Berne [117]. Le glacier a laissé des structures superficielles principalement orientées NE-SO. Les structures topographiques plus importantes, comme le Mont Vully ou le Mont Gibloux sont à imputer à des structures tectoniques du sous-sol (plis et chevauchements).

Il est facile de reconnaître de telles caractéristiques topographiques et morphologiques, aussi bien sur des orthophotos et des images satellite que dans un modèle d'altitude numérique. Les nouvelles données LIDAR¹ à haute résolution permettent de déceler jusqu'aux plus petites structures. Mais même avec ce type de données, on n'a identifié aucune structure tectonique, comme des paliers ou des déplacements, qui pourrait indiquer des failles actives. En comparant la direction des vallées avec l'orientation des failles, on a cependant pu montrer que les vallées profondément encastrées suivent pour la plupart la direction de failles données. La direction d'écoulement des cours d'eau résulte en général de l'influence combinée des gradients topographiques, de l'inclinaison des couches et de l'orientation des failles ou des fissures, ce que l'on observe particulièrement bien dans la région de la Sarine et dans la vallée de Gottéron (près de Fribourg).

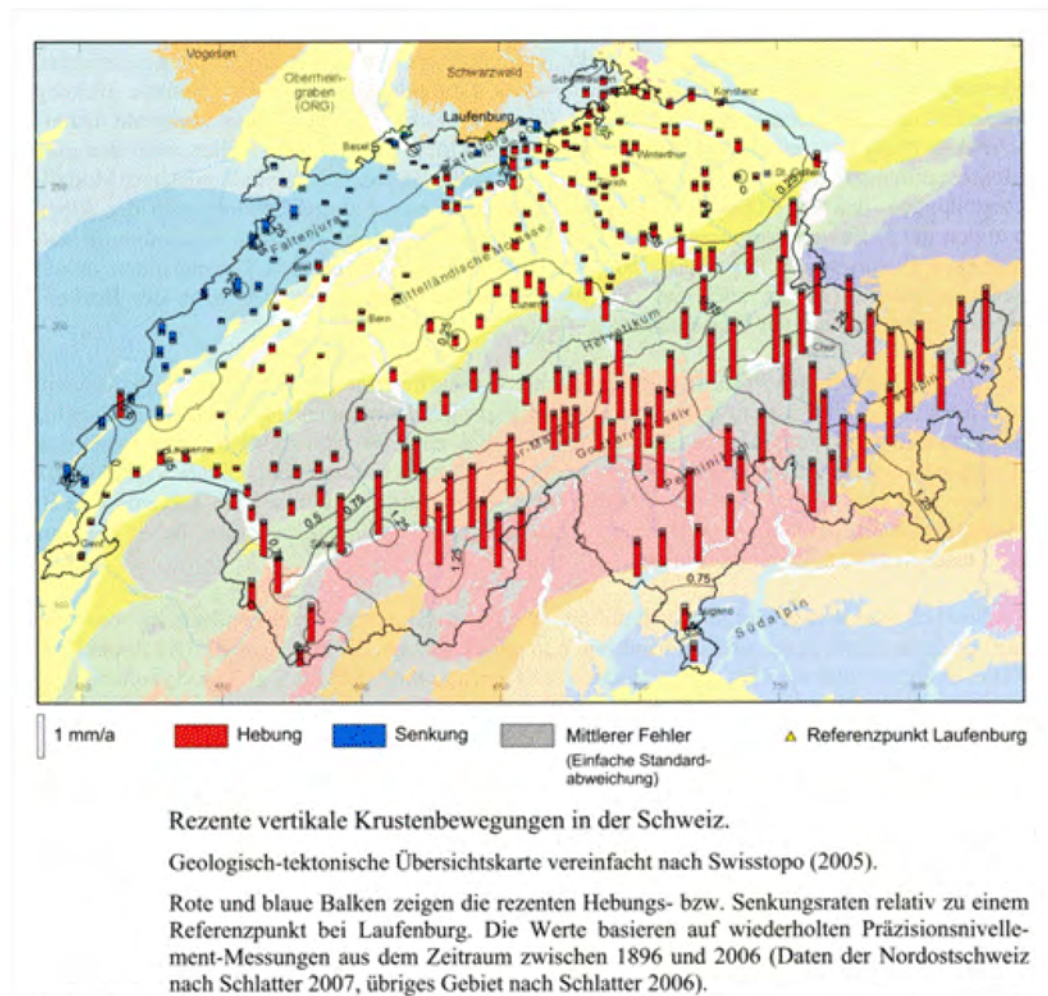
Dans la région qui entoure Mühleberg, il n'existe aucune indication géologique de structures néotectoniques importantes. Les mouvements néotectoniques les plus proches se situent plus à l'ouest, le long de la faille de La Lance. Ce déplacement horizontal dextre de direction NO-SE s'étend du Jura à La Lance et au lac de Neuchâtel en longeant le Mont Aubert et se perd dans la molasse située au sud-ouest de la ville de Payerne (figure Figure 3.5-3).

Une étude sismique réalisée dans la partie sud-ouest du lac de Neuchâtel, à la hauteur de La Lance, montre que la faille s'est développée en deux segments dans le lac [118] et que les sédiments du Quaternaire ont été déplacés le long de la ligne de faille. On ne connaît aucune indication de mouvements tectoniques post-glaciaires dans la région de la KKM, ni le long de la zone de Fribourg.

¹ LIDAR : Light Detection and Ranging.

Les mesures GPS et de nivellement permettent aussi de tirer des conclusions sur des mouvements actuels (voir figure Figure 3.5-4). Des études sur l'ensemble du territoire suisse font apparaître une image homogène avec de très faibles taux d'élévation pour la molasse de la Suisse occidentale, de l'ordre de < 0.25 mm/an. Il n'existe non plus aucun déplacement latéral ni mouvements différentiels qui pourraient indiquer une éventuelle activité tectonique. Le cas échéant, les failles actuellement actives peuvent être identifiées par leur sismicité (voir FZ).

Figure 3.5-4 : Mouvements verticaux récents de la croûte en Suisse (tiré de [123]). Les taux de soulèvement dans le bassin molassique entre Berne, Bienne et Yverdon sont de 0 à 0.25 mm/an. Il s'agit essentiellement de soulèvements. Ces données ne peuvent pas être attribuées à une activité tectonique spécifique.



Le champ de contrainte récent peut être déduit à l'aide des mécanismes au foyer des séismes [23]. La direction de contrainte maximale dans la zone étudiée est approximativement SE-NO. Pour les environs proches de Mühleberg on ne dispose pas de mesures ou autres déterminations des contraintes.

3.5.1.2.6 Sismicité récente, profondeur des foyers

Les cartes de l'aléa sismique du Service sismologique suisse (SED) recensent les observations historiques (depuis env. 1000 apr. J.-C.) et instrumentales (depuis 1975) des séismes (figures Figure 3.5-5 et Figure 3.5-6). Elles montrent que l'activité sismique est nettement plus élevée dans la région de Bâle et en Valais. La partie orientale des Grisons et la vallée du Rhin dans le canton de Saint-Gall ont aussi une activité sismique relativement importante. Le bassin molassique central – sur lequel se trouve le site de Mühleberg – présente en revanche une fréquence de séismes nettement plus faible. Dans cette région, les épicentres sont répartis de manière diffuse et – à part quelques exceptions comme la zone de Fribourg – ne peuvent pour la plupart pas être mis en relation avec des accidents tectoniques connus.

Des différences régionales importantes se marquent aussi pour ce qui concerne la profondeur des foyers : au nord des Alpes, les foyers sismiques se répartissent sur toute l'épaisseur de la croûte supérieure et inférieure, du terrain de couverture (par exemple zone de Fribourg, voir chapitre 3.5.1.2.4) jusqu'à une profondeur de plus de 30 km. Au sud d'une ligne qui correspond à peu près au front des nappes helvétiques, les séismes n'apparaissent plus que dans les 10-15 km supérieurs (figure Figure 3.5-5). Des foyers profonds sous la molasse du Plateau ou sous le Jura sont inhabituels pour une plateforme continentale stable (« intraplate region »). On présume généralement que, dans la croûte inférieure, la roche ne subit plus que des déformations ductiles en raison des conditions de pression et de température. Les raisons de la présence de ces foyers profonds ne sont pas évidentes ; Deichmann [124] tente de l'expliquer par la présence d'eaux sous haute pression qui pourraient fortement abaisser la résistance à la pression tangentielle de zones de faiblesse préexistantes, au point que des ruptures cassantes seraient possibles même en profondeur, là où en conditions anhydres ou de faible pression d'eau on s'attendrait à une déformation ductile.

La répartition de la sismicité est traitée plus en détail au chapitre 3.5.3.2.

3.5.1.2.7 Modèle tectonique

Le modèle géodynamique régional proposé pour les environs de l'EKKM se compose de différents éléments structuraux dont l'évolution temporelle et la succession ont conduit à un modèle complexe de systèmes de failles (voir figure Figure 3.5-7).

Figure 3.5-5 : Sismicité (a) et répartition de la profondeur des foyers (b), tiré de [123]

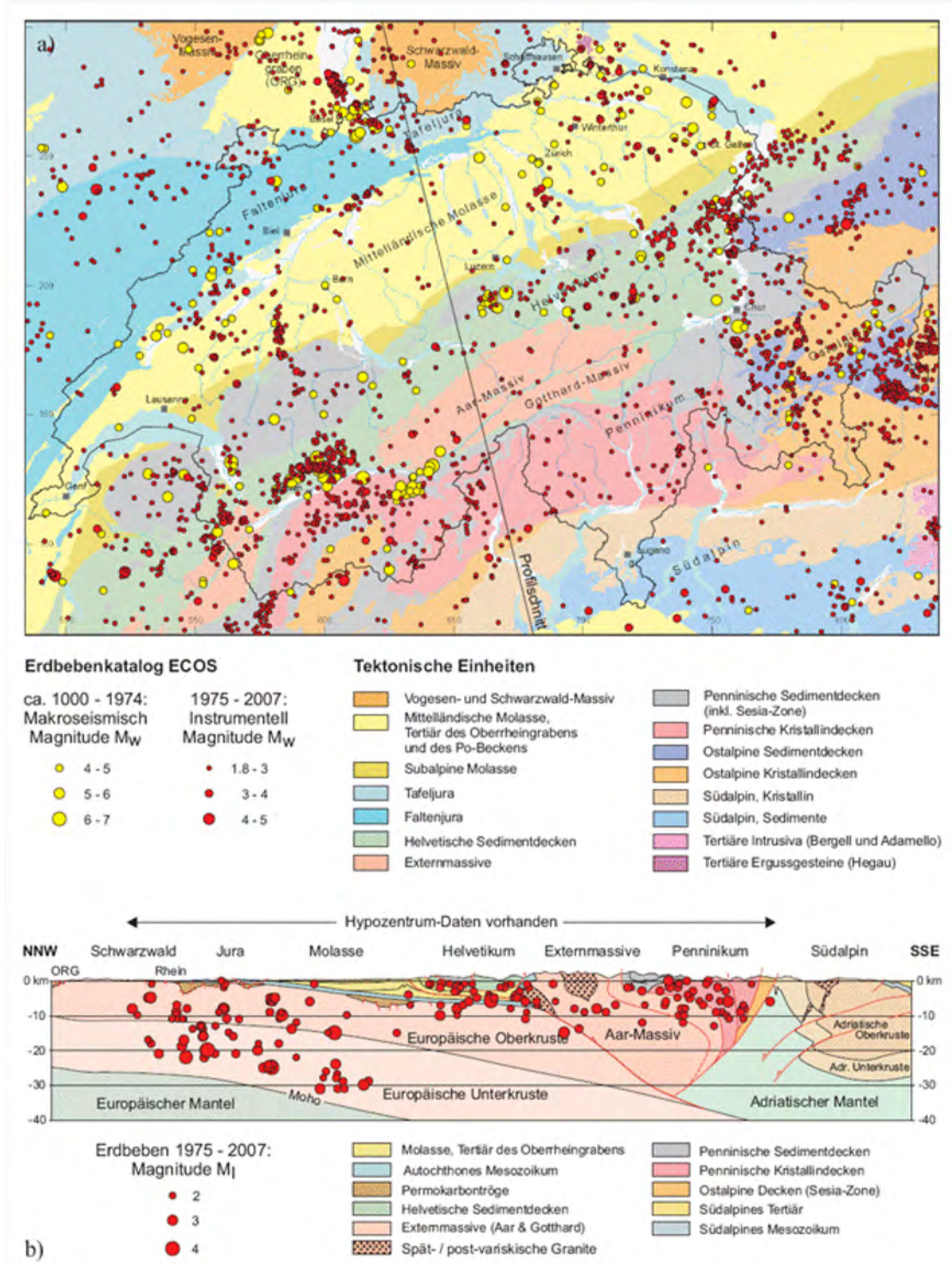
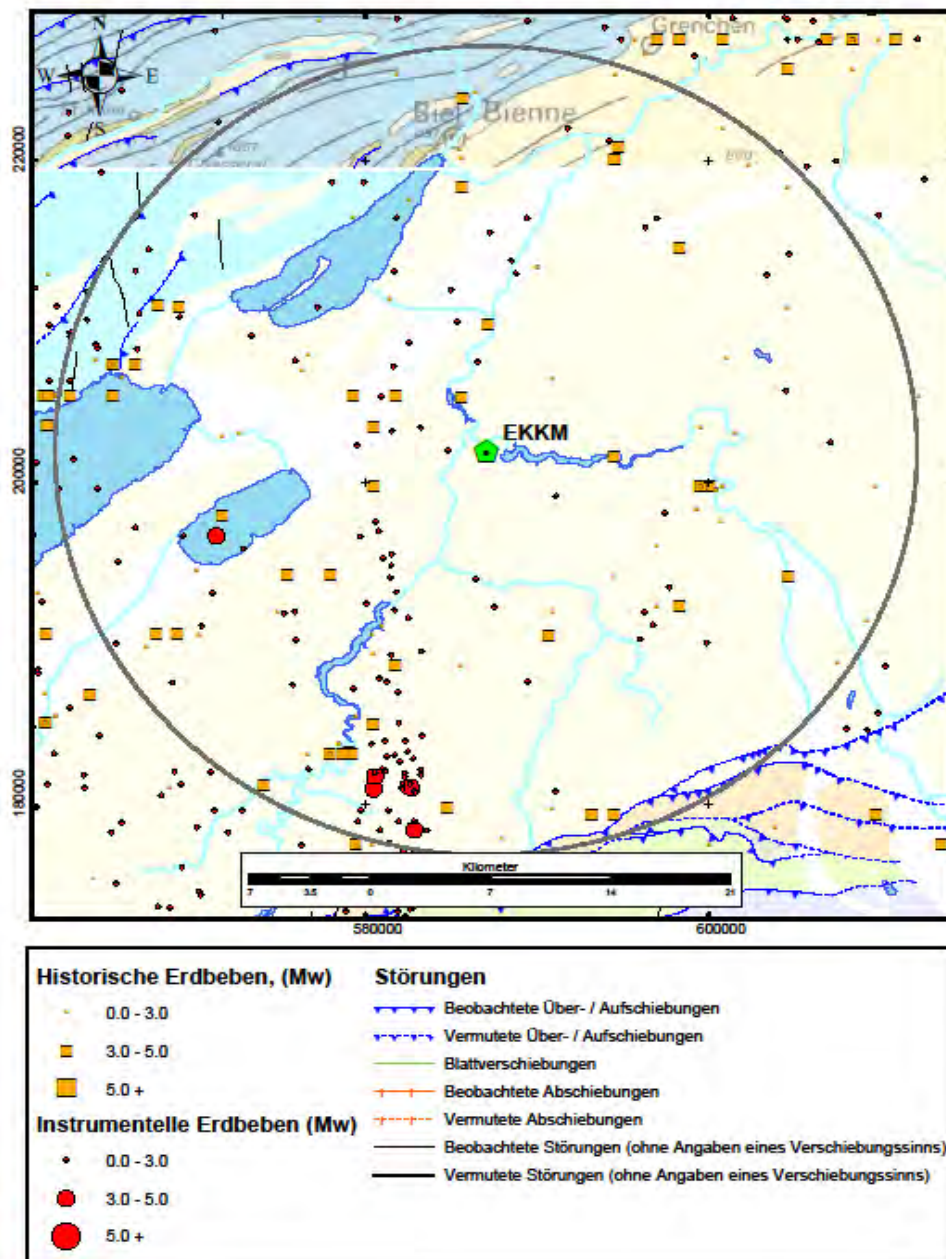


Figure 3.5-6 : Carte montrant les épicentres de séismes dans un rayon de 25 km autour de l'EKKM. La concentration d'activité sismique dans la zone de Fribourg, orientée N-S, est discutée de manière approfondie au chapitre. 3.5.3.6.



La déformation a eu lieu principalement dans la couverture sédimentaire (du Tertiaire-Mésozoïque jusqu'à récemment), qui a été cisaillée au niveau des évaporites du Trias et séparée du soubassement rocheux au sens large (y compris d'éventuelles traces permo-carbonifères) (hypothèse de la poussée à distance). Des failles se sont développées soit dans la couverture sédimentaire, soit dans le soubassement rocheux (voir les nouvelles interprétations régionales des données de la sismique réflexion, chapitre 3.5.3.7.2).

Dans la couverture sédimentaire, on observe une série de plis liés à des failles qui ont pour direction générale SO-NE. Ces plis sont apparus par cisaillement dans l'avant-pays, causés par la compression orientée SE-NO, peut-être en même temps que le plissement du Jura (c'est-à-dire il y a env. 4-13 millions d'années). Les anticlinaux de Courtion, Montbrelloz-Delley et Mörigen de la structure de Hermrigen en sont des exemples. Dans la zone subjurassique, à savoir dans la zone de transition entre le Jura plissé et le bassin molassique, ces structures de failles liées à des plis ont formé des rampes latérales, ce qui donne des structures orientées à peu près N-S. Ceci vaut surtout pour les structures de Tschugg et de Hermrigen.

La structure de Fribourg présente une orientation N-S et s'étend de la molasse subalpine écaillée, au sud, jusqu'à approximativement à l'extrémité orientale de lac de Morat. Les flancs de cette structure montrent une géométrie de flexure, liée à un certain nombre de faisceaux de failles orientée à peu près N-S.

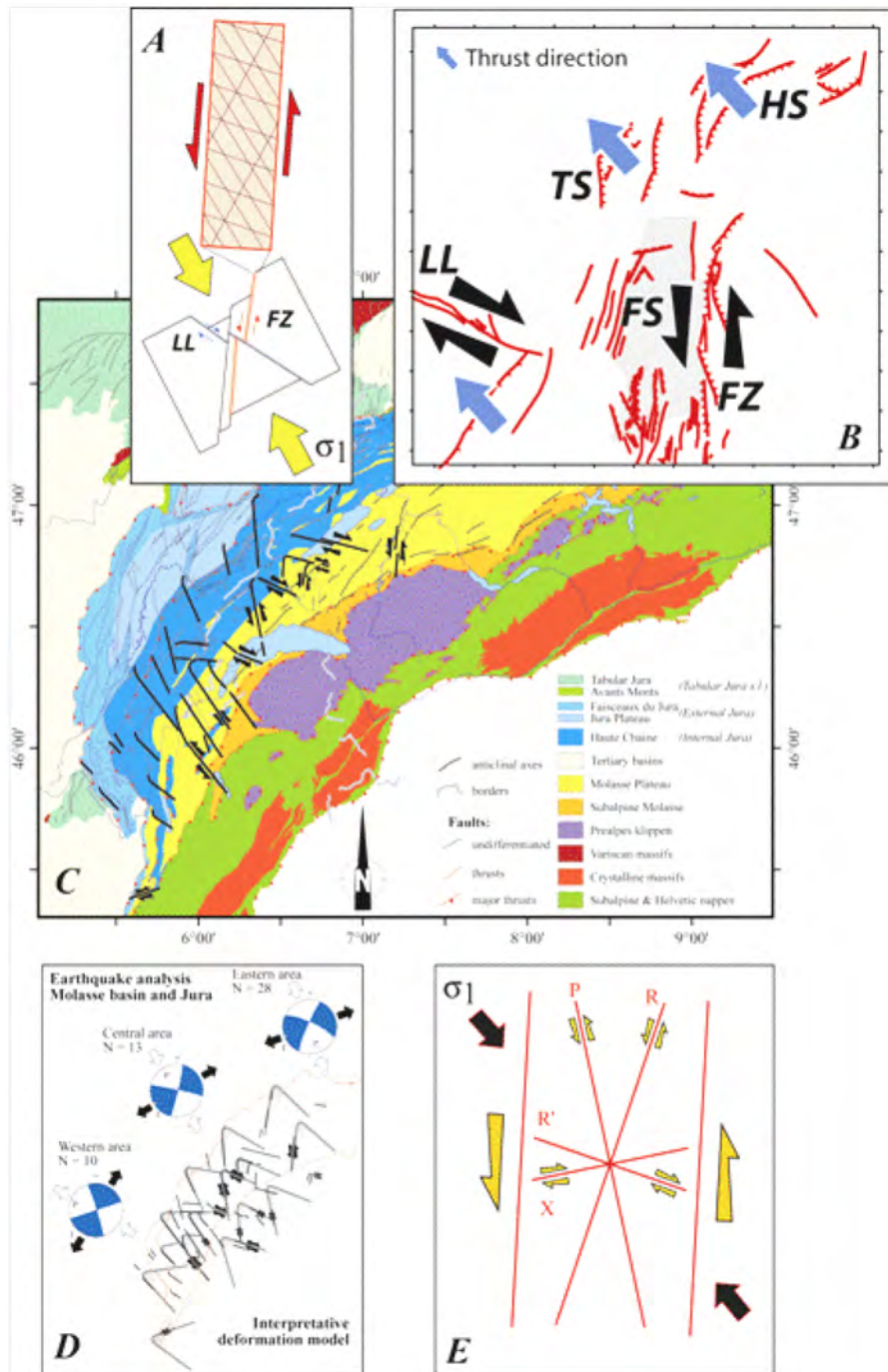
Au centre et au sud, la bordure orientale de la structure de Fribourg – appelée ici zone de Fribourg – correspond à la présence de quelques foyers de séismes qui présentent une direction de mouvement sénestre. Ces mouvements sont interprétés comme de des réactivations de failles latérales de *graben*. Dans la zone elle-même, de nouvelles failles auraient pu apparaître ou des failles existantes auraient pu être réactivées, avec une orientation qui correspond au modèle de Riedel – c'est-à-dire soit NNE-SSO soit NNO-SSE (voir figure Figure 3.5-7).

Dans le bassin molassique de Suisse occidentale, on observe un certain nombre de décrochements sénestres et de failles orientées NO-SE avec une composante de mouvement dextre. Ces zones de failles, avec leur géométrie interne de type Riedel, peuvent être considérées comme faisant partie d'un vaste système de failles conjuguées (voir Figure 3.5-7, carte C), actif dans un champ de contrainte compressif orienté SE-NO. Ces zones de failles comprennent le Jura plissé et s'étendent jusqu'au bassin molassique – comme le montre par exemple la faille de La Lance.

Ce système de failles conjuguées pivote le long de l'axe de l'arc jurassien et la direction du raccourcissement ou de la collision se modifie, passant de NNO-SSE à presque E-O à l'ouest, ce qui correspond à peu près au champ de contrainte actuel ([57] ; [23] ; [54]). Les failles font partie d'un système de mouvements horizontaux qui déforme les couches sédimentaires dans l'avant-pays alpin et qui est détaché du soubassement rocheux.

La structure et la zone de Fribourg sont l'expression la plus orientale de ce système, avec la particularité que les failles de Riedel orientées N-S se sont développées dans la couverture sédimentaire par-dessus une structure héritée et qu'elles sont liées à une tectonique salifère. Cette structure est de ce fait limitée dans son étendue et ne se prolonge pas au-delà de l'extrémité nord du lac de Morat.

Figure 3.5-7 : Carte et croquis d'un modèle tectonique régional



- A) Modèle de failles conjuguées ; chaque système se compose d'une série de failles qui sont ordonnées selon une géométrie de Riedel.
- B) Carte tectonique simplifiée de la structure de Fribourg (FS) avec les éléments structuraux principaux : faille de La Lance – LL, zone de Fribourg – FZ, structure de Hermrigen – HS, structure de Tschugg – TS. Cette carte se base sur la nouvelle interprétation sismique, voir Figures 3.5-3 et 3.5-39.
- C) Carte géologique de la Suisse avec les zones importantes de mouvements horizontaux dans l'avant-pays alpin occidental (tiré de [62] et [68]).
- D) Modèle général d'un système de failles conjuguées dans l'avant-pays alpin occidental et orientation des contraintes dues à des manifestations de foyers de séismes qui montrent les directions de contrainte qui se modifient (tiré de [57] et [56]).
- E) Modèle de cisaillement de Riedel : direction principale de cisaillement et systèmes de failles subordonnés (P, R, R', X)

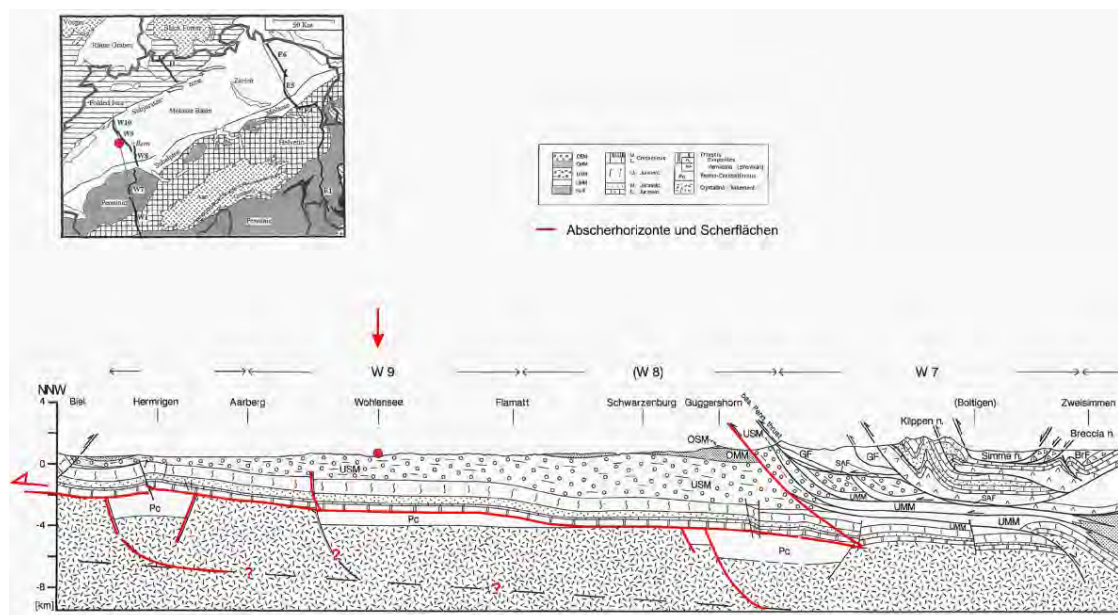
3.5.1.3 Géologie locale du site

3.5.1.3.1 Evolution de la vallée

A l'époque glaciaire, la région du lac de Wohlen a été entièrement recouverte de glace à plusieurs reprises par les glaciers de l'Aar et du Rhône. Lors de la plus grande glaciation (Most Extensive Glaciation (MEG) ou Riss) et de la dernière avancée glaciaire (Last Glacial Maximum (LGM) ou Würm), la surface de la molasse a été fortement remodelée (creusement de l'actuel lac de Wohlen et de la vallée de la Sarine) et les sédiments meubles du Quaternaire, qui se trouvent aujourd'hui près de la surface, se sont déposés.

La vallée de l'Aar, qui, près de Mühleberg, est taillée dans les roches de la molasse d'eau douce inférieure, fait partie, tout comme le fond du lac de Wohlen, de la continuation du sillon de l'Aar qui prend naissance au sud de Berne. Alors que la vallée de la Sarine, orientée N-S, ne s'est enfoncée que peu profondément dans la surface de la molasse, la vallée de l'Aar, de direction O-E, présente un creusement important entre Wohlen et la confluence avec la Sarine [19].

Figure 3.5-8 : Profil géologique à travers le bassin molassique de la Suisse occidentale (modifié à partir de Pfiffner et al. 1997 [63]. Désignations : USM, molasse d'eau douce inférieure ; Pc, permocarbonifère)



3.5.1.3.2 Fond rocheux – Molasse d'eau douce inférieure

Dans la région de Mühleberg, le fond rocheux, qui se trouve sous les sédiments du Quaternaire, est constitué par la molasse d'eau douce inférieure. Les grès de la molasse marine supérieure ont complètement disparu par érosion lors des glaciations. L'aire de dépôt de la molasse marine inférieure se trouvait déjà plus au sud. C'est pourquoi, dans la région de Mühleberg, seule la molasse d'eau douce inférieure apparaît. Dans ce secteur, elle présente une épaisseur globale d'env. 2 000 m (voir figure Figure 3.5-8).

Dans la région de Mühleberg, l'aire de dépôt de la molasse d'eau douce inférieure était marquée par les vastes plaines fluviales de l'avant-pays alpin (plaine alluviale avec des cours d'eau à méandres, voir figure Figure 3.5-9). Les roches sablonneuses à silteuses prédominent. Quatre types de faciès peuvent être observés dans la molasse d'eau douce inférieure, aussi bien sur les affleurements que dans des forages. Ils se distinguent par leur origine et par leur géométrie spécifique. Des différences peuvent aussi être observées et mesurées dans les caractères pétrographiques (granulométrie et composition minéralogique) et pétrophysiques (porosité et perméabilité).

Ces quatre types sont les suivants [20] :

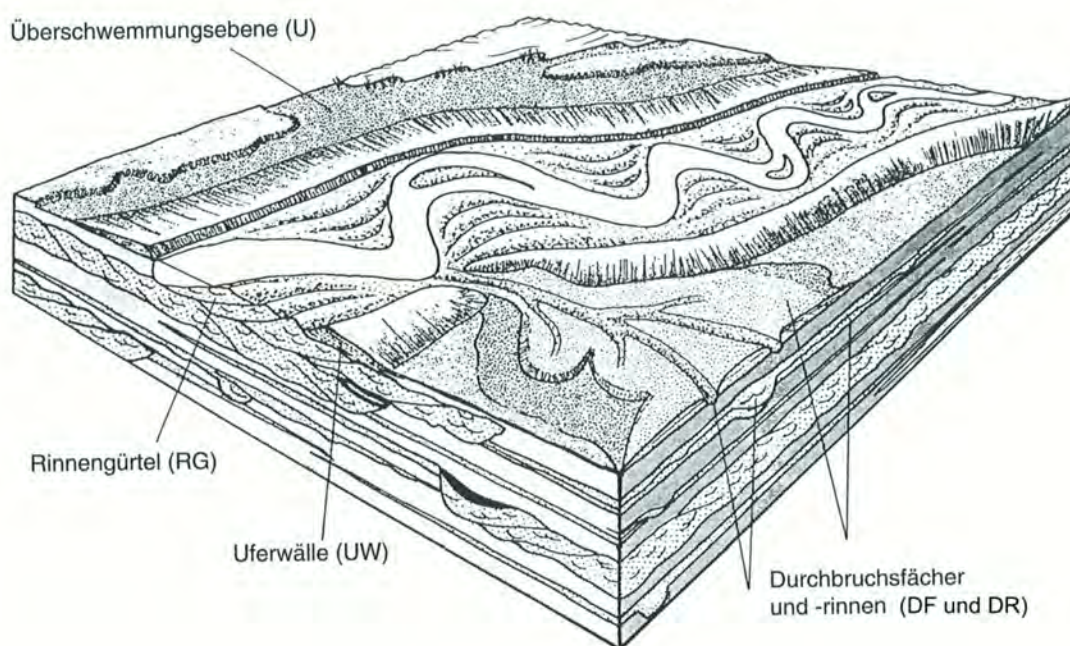
- Les lits des méandres (RG) se composent de grès à granulométrie moyenne à grossière et forment des corps tabulaires très étendus latéralement. On distingue deux types de chenaux avec un transport mixte de sédiments, qui se différencient aussi par leurs dimensions : les chenaux présentant des lits de sédiments plus importants sont dominants, généralement plus larges et plus continus que ceux avec un taux de matériaux en suspension plus élevé. Ils forment des corps de plusieurs kilomètres de long et jusqu'à 1 500 m de large et ont une épaisseur de 2 à 15 m. Les lits de méandres avec matériaux en suspension, quant à eux, présentent des longueurs de plusieurs kilomètres, des largeurs de 100 m et des épaisseurs de 2 à 4 m. En direction des Alpes et de l'ouest, on constate une diminution générale de la largeur, de la continuité et de l'interconnexion des chenaux. La porosité et la perméabilité primaires diminuent à l'est et vers la bordure nord du bassin.
- Les dépôts de crevasse (DF) et les chenaux de crevasse (DR) sont finement à moyennement sablonneux et présentent une base tout à fait plane. Ce sont des dépôts de hautes eaux qui se sont sédimentés rapidement dans la plaine d'inondation. Ils forment des grès tabulaires de plusieurs kilomètres de long, de plusieurs centaines de mètres de large et de 1 à 2 m d'épaisseur. Les chenaux de crevasse (DR) sont des événements éphémères liés à des inondations, qui traversent les levées naturelles et qui se composent de lentilles de grès de quelques centaines de mètres de long, de moins de 10 m de large et jusqu'à 4 m d'épaisseur.
- Les levées naturelles et les sables d'inondations distales (UW) se composent de silts grossiers et de grès fins ; elles forment des corps sédimentaires tabulaires atteignant au max. 3 m d'épaisseur, 30 m de large et quelques centaines de mètres de long. Elles sont recouvertes partiellement de sédiments fins provenant de la plaine d'inondation. La lamination, les rides chevauchantes et les rides de courant sont des structures qui apparaissent fréquemment, ce qui indique que ces sédiments à la granulométrie relativement fine se sont déposés rapidement.
- Les dépôts d'inondation de paléosols et marais (UPS) se composent d'argiles et de silts. Ceux-ci sont laminés et fortement marbrés ou tachés. Les sédiments fins à très fins ont été

charriés par les hautes eaux jusque dans les zones éloignées de la rivière, puis se sont déposés. Rarement plus épais que 2 m, ils sont très étendus (longueurs et largeurs de plusieurs kilomètres) et présentent souvent une superposition complexe de profils de sol différents. La sédimentation originale a été effacée par la bioturbation et l'action des racines et modifiée par l'expansion et/ou la compaction des minéraux argileux.

Ces types de faciès sont imbriqués latéralement et horizontalement. Leur épaisseur et leur étendue latérale varie fortement. Une stratification d'origine n'existe pas.

L'extension spatiale des faciès ci-dessus peut être caractérisée ainsi : les lits de méandres forment une structure spatiale qui est entourée par une matrice à granulométrie fine, composée d'éléments provenant des levées naturelles et des plaines d'inondation. Les dépôts et les chenaux de crevasse font le lien entre ces deux groupes.

Figure 3.5-9 : Modèle de faciès simplifié de la molasse d'eau douce inférieure dans la partie septentrionale du bassin molassique (tiré de [70], légèrement modifié)

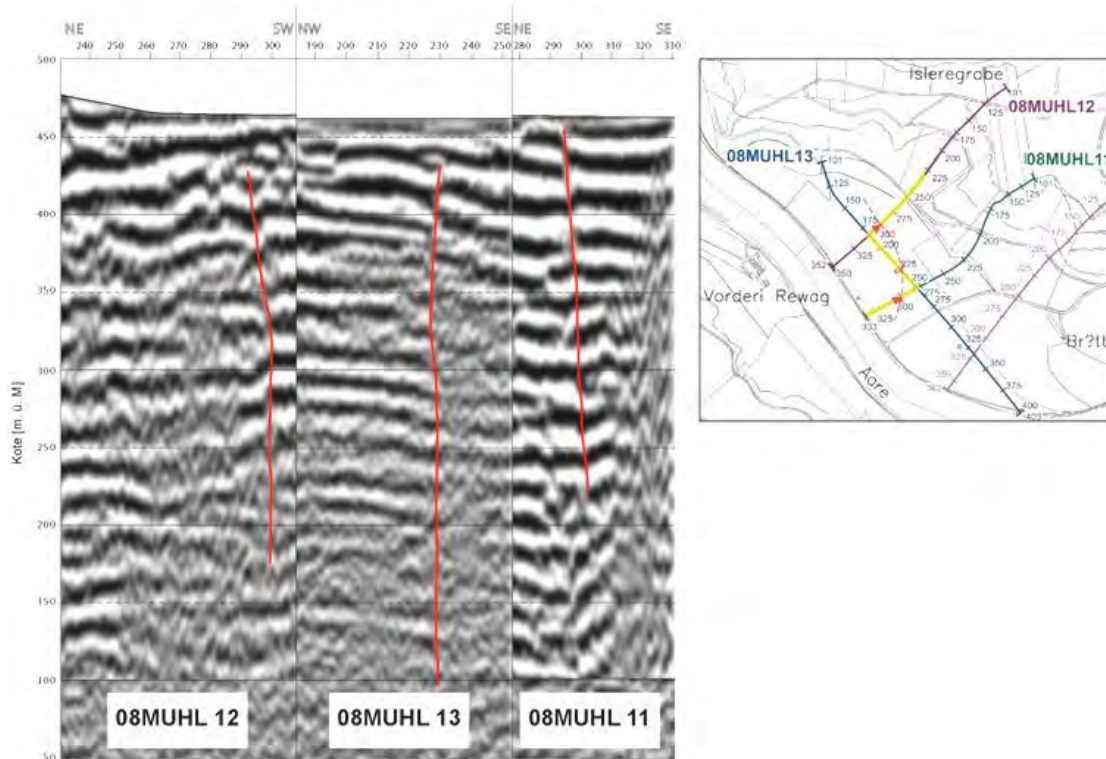


L'utilisation d'un scanner dans les forages pour des investigations optiques et acoustiques [21] a permis de révéler l'existence de fissures dans la molasse d'eau douce inférieure. La densité des fissures diminue avec la profondeur.

La sismique-marteau, qui avait pour but de renseigner sur la surface de la molasse, a donné aussi quelques indications sur la succession des couches dans le sous-sol profond (max. env. 50 m). En revanche, la faille supposée par GeoExpert [51] au nord-ouest de l'emplacement de la nouvelle installation, de l'autre côté de l'Aar au lieu-dit la « Brättele », ne paraît pas irréfutable (voir figure Figure 3.5-10) : d'une part, sa vergence le long des trois profils sismiques sur lesquels elle figure est contradictoire et sa courbure est vraiment forte ; d'autre part, la déformation visible des réflexions ne suffit pas comme indication irréfutable de faille. Le long de ces profils, il y a beaucoup d'autres déformations analogues qui n'ont pas été interprétées comme des failles –

probablement à juste titre – mais implicitement comme des artefacts de l’acquisition ou du traitement des données.

Figure 3.5-10 : Emplacement de la faille présumée au nord-ouest du site de l’EKKM, de l’autre côté de l’Aar. Les trois segments de profil montrent l’interprétation de GeoExpert pour la faille subverticale présumée dans l’USM [51]. La carte de droite montre la courbure de la faille qui en découle. D’autres déformations analogues de la réflexion sismique le long de ces segments et d’autres profils (non représentés ici) n’ont pas été interprétés comme des failles. L’emplacement des trois sections de profils concernés est indiqué en jaune sur la carte de droite.



Après le retrait de la dernière avancée glaciaire (Last Glacial Maximum (LGM) ou Würm), l’absence du poids de la glace a eu pour conséquence l’apparition, sur les surfaces rocheuses, de formes de décompression. C’est ainsi que se sont formées des fentes de décompression parallèles à la vallée, ce qui permettrait d’expliquer les gradins qui caractérisent la morphologie des parois rocheuses de la vallée de l’Aar près de Mühleberg.

3.5.1.3.3 Couverture de roches meubles du Quaternaire dans la région de Mühleberg

Dans la région de Mühleberg, la succession des dépôts quaternaires peut être présentée comme suit de façon simplifiée voir tableau Tableau 3.5-1). Le sous-sol rocheux est constitué par la molasse d’eau douce inférieure. Les dépôts de la moraine ancienne qui reposent directement au-dessus sont attribués au stade de la plus grande glaciation. Normalement, ces dépôts sont recouverts par des débris provenant de chenaux (*Rinnenschotter*).

L

es débris de chenaux sont interprétés comme provenant du retrait de l'avant-dernière glaciation (MEG) et forment les « alluvions des terrasses » de la vallée de l'Aar. Par endroits, ces débris sont recouverts par des dépôts de moraine de fond et de moraine supérieure des glaciers de l'Aar et du Rhône de la dernière avancée glaciaire (LGM), pouvant atteindre localement jusqu'à 10 m d'épaisseur. Les alluvions des terrasses sont pour la plupart recouvertes directement par des alluvions récentes de l'Aar ainsi que localement par des remplissages artificiels. Les alluvions se composent de dépôts alluvionnaires récents de l'Aar, tardi- ou post-glaciaires.

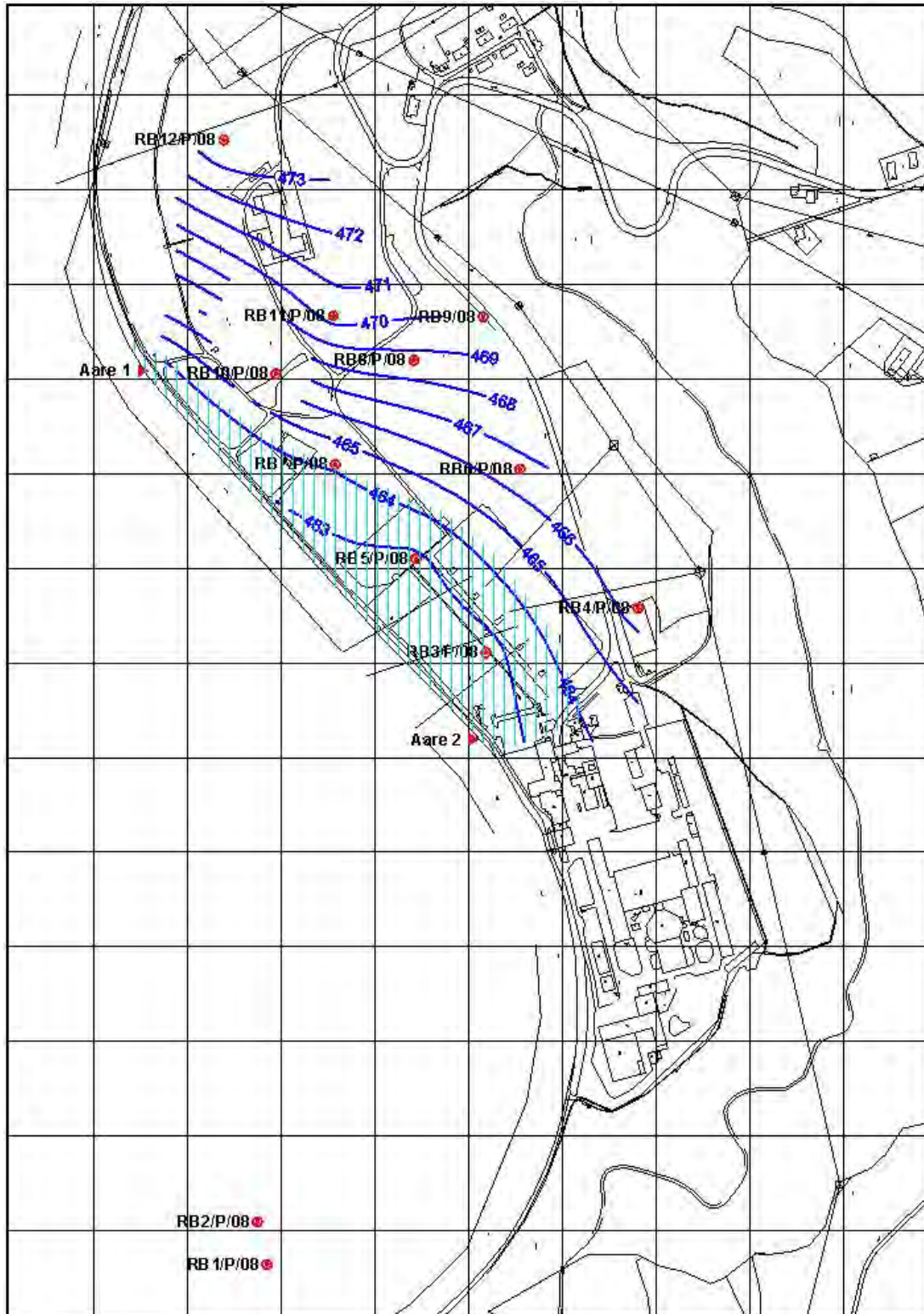
Tableau 3.5-1 : Stratification de la couverture de roches meubles du Quaternaire dans la région de Mühleberg (des dépôts les plus récents aux plus anciens)

Désignation	Brève description	Milieu de formation	Epaisseur	Fonction hydrogéologique
Alluvions récentes	Graviers à sables silteux séparés les uns des autres par une mince couche d'humus	Terrasses alluviales tardi- et post-glaciaires	Quelques mètres	Localement aquifère constitué de roches meubles
Moraine de fond et supérieure	Graviers plus ou moins argilo-silteux de composition variable, souvent avec des composants fragmentés et parfois cassés	Dépôts morainiques des glaciers de l'Aar et du Rhône de la dernière glaciation (LGM)	Jusqu'à 10 m	Aquifuge (couche de séparation)
Débris de chenaux	Graviers fortement sablonneux, caractérisés par des intercalations de nombreuses lentilles silteuses et argileuses, peuvent contenir des blocs atteignant 1 m	Dépôts de retrait lors de l'avant dernière glaciation (MEG)	Jusqu'à 15 m	Localement aquifère constitué de roches meubles
Dépôts de la moraine ancienne	Composés de matériaux d'épandage sablonneux-graveleux, avec des galets fragmentés et polis, ainsi que des blocs isolés	Dépôts de moraines de fond de la plus grande glaciation (MEG)	Quelques mètres	Aquifuge (couche de séparation)

3.5.1.4 Hydrogéologie du site

Dans la région du site de l'EKKM, les mesures du niveau de la nappe souterraine ont été effectuées dans onze forages de reconnaissance réétalonnés, équipés de piézomètres [60] (voir figure Figure 3.5-11), dont huit sont pourvus en outre d'indicateurs de pression de l'eau de porosité. Deux points de mesure ont de plus été installés pour mesurer le niveau de l'Aar, afin de pouvoir estimer l'interaction entre l'Aar et la nappe souterraine.

Figure 3.5-11 : Emplacement des sondages du sol de fondation, des forages et des points de mesure



3.5.1.4.1 Nappe souterraine dans les roches meubles

Dès les travaux de forage, il est apparu que les eaux souterraines circulent principalement dans les alluvions (couche c2, voir chapitre 3.5.2.1) et dans la moraine (couche c1). Il s'agit essentiellement d'un aquifère avec surface d'eau libre. Localement, les limons de pente (couche b2) et les alluvions récentes de l'Aar (couche b1) recouvrent ces couches aquifères comme un couvercle étanche. Lors de quelques forages, les eaux souterraines sont légèrement montées après le début du percement, ce qui signifie que les eaux sont par endroits légèrement sous pression. Les mesures effectuées dans les piézomètres fixes indiquent des percées d'env. 0.3 à 9.3 m à partir du bord supérieur du terrain (OKT). En profondeur, la molasse d'eau douce inférieure joue le rôle d'aquifuge. L'épaisseur moyennes de l'aquifère est d'env. 5 m.

Direction du courant et pente (rive gauche de l'Aar) : comme cela a déjà été constaté dans des études antérieures [26] le niveau de la nappe souterraine se trouve plus haut que le niveau de l'Aar. Les eaux souterraines s'écoulent vers le nord-ouest avec une pente moyenne d'env. 2 à 3% et sont exfiltrées dans l'Aar. La nappe souterraine est ainsi alimentée surtout par les affluents des versants, ainsi que par l'infiltration directe des eaux météorologiques. La nappe souterraine n'est donc pas alimentée par l'Aar, mais la rivière constitue l'exutoire. Ce n'est qu'en cas de montée rapide du niveau de l'Aar que les eaux fluviales peuvent, dans les zones riveraines, s'infiltrer brièvement dans l'aquifère de roches meubles.

L'exploitation des données de mesure de mai 2008 à juillet 2009 (voir [111]) fait apparaître qu'à cause de l'effet de retenue, le niveau des eaux souterraines n'est influencé par les variations de l'Aar que dans les zones riveraines (voir partie bleu clair de la figure Figure 3.5-11). Plus loin, la nappe souterraine réagit uniquement au renouvellement des eaux par l'infiltration des eaux météorologiques. Les niveaux d'eau représentatifs, c'est-à-dire le niveau ces hautes, moyennes et basses eaux, ont pu être déterminés à l'aide d'analyses de corrélation avec des données de stations de mesure cantonales. La Figure Figure 3.5-11 montre les isopièzes du niveau de la nappe souterraine par hautes eaux.

Direction du courant et pente (rive droite de l'Aar) : un « by-pass-system » n'est pas exclu dans la région de la nappe souterraine en rive droite de l'Aar (Runtigenau), à savoir que les eaux de la rivière sont infiltrées, puis exfiltrées en aval.

Perméabilité de l'aquifère et productivité théorique des puits : pour pouvoir évaluer la perméabilité de l'aquifère souterrain, des essais de pompage sur de petits volumes ont été effectués dans les forages RB1/P/08, RB3/P/08, RB4/P/08 et RB11/P/08.

Les données fournies par ces essais indiquent les perméabilités horizontales suivantes (voir tableauTableau 3.5-2) :

Tableau 3.5-2 : Résultats des mesures de forage pour la nappe souterraine

Forage	Perméabilité k	Epaisseur de l'aquifère H
RB1/P/08	$k_{\text{Darcy}} \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	4 m
RB3/P/08	$k_{\text{Darcy}} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	3.5 m
RB4/P/08	$k_{\text{Darcy}} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	5 m
RB11/P/08	$k_{\text{Darcy}} \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	6 m

En raison de la perméabilité et de l'épaisseur de l'aquifère, la productivité la plus importante est à attendre à l'emplacement du forage RB11/P/08. Selon le diamètre du puits, les productivités calculées pour ce site (c'est-à-dire sans tenir compte d'éventuelles pertes) peuvent être déduites comme suit (voir tableau Tableau 3.5-3. On peut remarquer que l'abaissement ne devrait pas dépasser $H/3$ (à l'emplacement de RB11/P/08, $s \leq 2.0 \text{ m}$).

Tableau 3.5-3 : productivité théorique de la nappe souterraine à l'emplacement du forage RB11/P/08

Diamètre du puits D [m]	Quantité pompée Q [l/min]	Abaissements [m]
0.3	500	1.8
0.4	600	2.0
0.5	680	2.6
0.6	740	3.0

Ces indications valent pour l'état non influencé par les constructions. La productivité effective sera déterminée après l'aménagement du puits au moyen d'essais de pompage par paliers.

3.5.1.4.2 Hydrologie de la roche molassique

La perméabilité directionnelle de la molasse d'eau douce inférieure dépend d'une part de la porosité des roches sablonneuses, silteuses et argileuses et d'autre part des systèmes de fissures.

La pétrophysique (porosité et perméabilité) des différents éléments de faciès a été examinée lors de diverses études et présente parfois de grandes différences d'un élément à l'autre, par exemple [24]. Plus la porosité est grande, plus la perméabilité est élevée, ce qui entraîne une meilleure perméabilité directionnelle. Les porosités moyennes indiquées dans [24] sont les suivantes : RG entre 6.4 et 28.3% (valeur moyenne entre 17.5 et 23.4%), DF et DR entre 2.6 et 24.7% (valeur moyenne entre 12.4 et 15.4%), UW entre 2.3 et 25.6% (valeur moyenne entre 8.2 et 13.5%) et U entre 2 et 20% (valeur moyenne entre 6.4 et 11.3%). En s'appuyant sur les valeurs moyennes, on peut considérer que RG, DF et DR sont plutôt favorables à la perméabilité directionnelle et qu'UW et U sont comparativement moins perméables et font obstacle à l'écoulement des eaux souterraines.

Il est possible de tirer les conclusions suivantes des mesures de la pression dans les pores :

- En principe, il faut tabler sur le fait que la pression d'eau de porosité augmente avec la profondeur.
- Selon le point de mesure et la profondeur de l'installation, les pressions d'eau de porosité dans la roche peuvent se trouver jusqu'à 3 m au-dessus du potentiel de l'aquifère de roches meubles qui le recouvre.
- A tous les points de mesure, les pressions d'eau de porosité mesurées se situent au-dessous des cotes de terrain. Il faut cependant remarquer que la profondeur d'installation maximale des capteurs de pression correspond à une cote d'env. 436.79 (RB3). Au même point de mesure, une nappe artésienne a été rencontrée à une cote d'env. 398 m lors du processus de forage.
- Des résultats de mesures présentant des pressions d'eau de porosité plutôt faibles sont interprétés comme des indications de fissures. Les écarts mesurés pour les pressions d'eau de porosité varient entre 0.33 m et 1.58 m.

3.5.2 Sol de fondation

Pour étudier le sol de fondation, les travaux décrits dans [60] ont été effectués :

- Campagne de mesures géosismiques (sismique marteau, sismique de surface) pour déterminer la profondeur de la surface de la molasse.
- Creusement de 10 forages carottés dans la zone « Niederruntigen » sur la rive gauche de l'Aar (voir figure Figure 3.5-11). Profondeur des forages : 40 à 87 m.
- Creusement de 2 forages carottés dans la zone « Brättele » sur la rive droite de l'Aar (voir figure Figure 3.5-11). Profondeur des forages : 50 m.
- Mesures in situ de la vitesse des ondes P et S au moyen de la sismique « down-hole ».
- Passage aux scanners optique et acoustique des trous de forage pour fournir des indications sur les trous de forage et identifier des fissures ou autres irrégularités du sous-sol.
- Essais de laboratoire sur les carottes de forage, usuels en géotechnique, pour déterminer la compacité, la résistance au cisaillement et à la pression, les angles de frottement, etc.
- Des essais à la colonne de résonance sur les carottes de forage pour déterminer en laboratoire les vitesses des ondes P et S.

Des piézomètres et / ou des capteurs de pression dans les pores ont été installés dans tous les trous de forage. Le niveau de la nappe souterraine ou / et la pression interstitielle seront mesurés sur une longue période afin qu'il soit possible de fournir des constats sur leur évolution et leurs variations.

3.5.2.1 Description générale des couches

Sur la base des indications du chapitre 3.5.1.3.3, les couches suivantes peuvent être distinguées sur le site de l'EKKM :

Sous la couche de couverture (couche a, voir chapitre suivant 3.5.2.2) se trouvent des alluvions récentes de l'Aar (couche b_1), ainsi que les limons de pente de la molasse altérée (couche b_2). Au-dessous, on trouve les débris de chenaux (couche c_2), qui sont interprétés comme des débris de retrait de l'avant-dernière glaciation. Par endroits, les débris de chenaux sont recouverts de dépôts de moraines de fond et supérieures des glaciers de l'Aar et du Rhône au stade LGM (couche c_1). La couche la plus profonde décrite dans le présent rapport est la molasse d'eau douce inférieure (couche d, USM). Les couches a à c_2 (incluse) sont indiquées comme roches meubles.

La surface du terrain a été en partie fortement modifiée par les travaux de construction effectués dans le passé (WKW Mühleberg 1917-1920, centrale nucléaire de Mühleberg et sous-station (UST) Mühleberg West 1967-1971). La couche de couverture (couche a) ne se compose donc pas seulement de sols altérés, mais aussi de matériaux provenant des abords immédiats et déposés, ainsi que de remplissages artificiels proprement dits.

Figure 3.5-12 : Profil le long de l'Aar

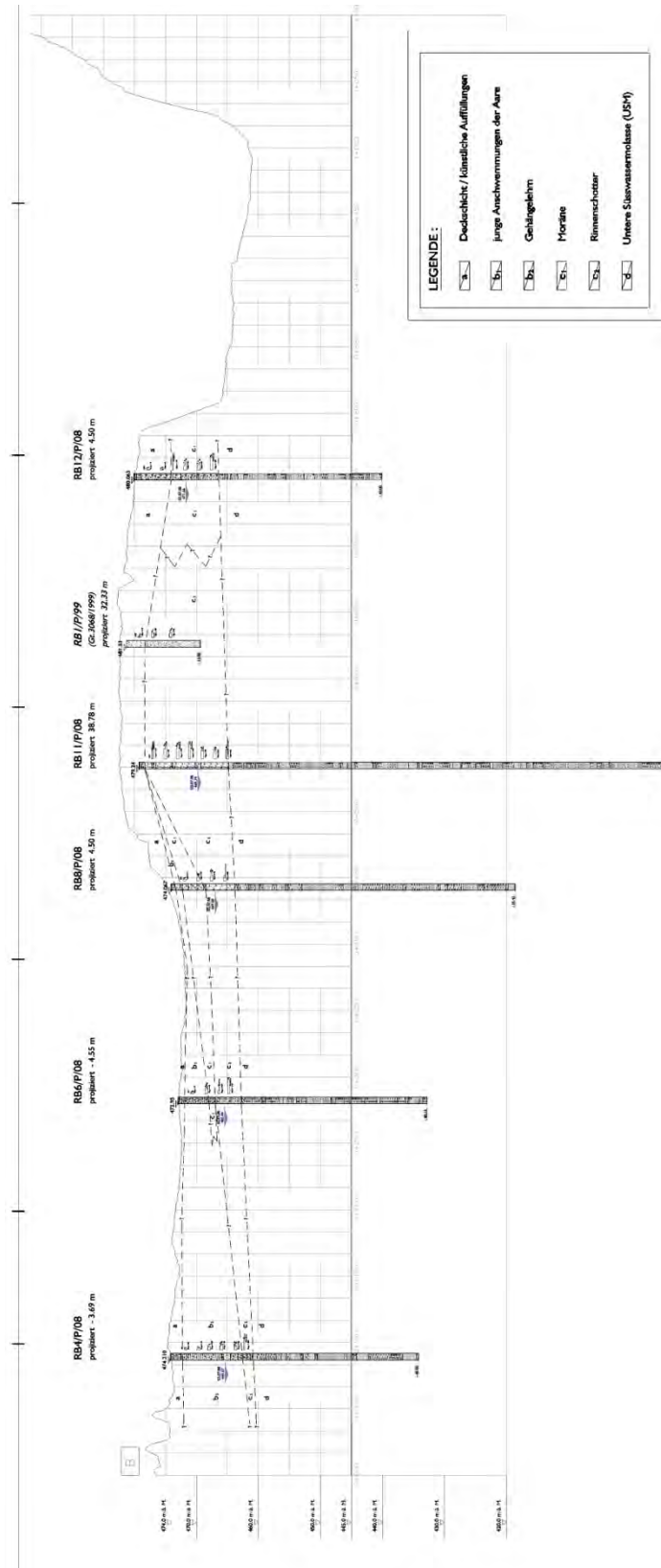
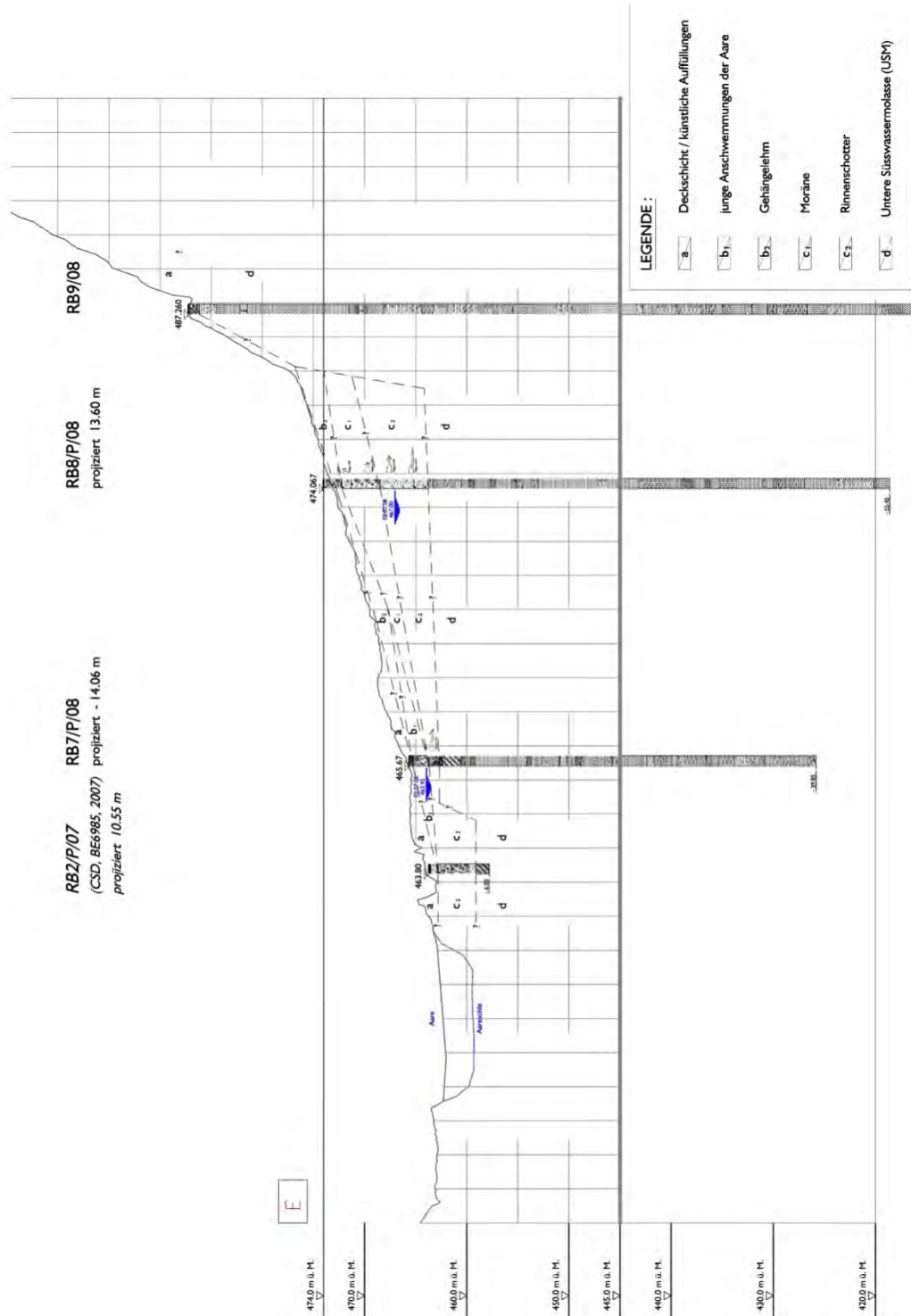


Figure 3.5-13 : Profil à travers l'Aar



La description des couches qui suit s'appuie sur les résultats obtenus aussi bien au cours des investigations présentes sur le sol de fondation [60] que sur les connaissances déjà acquises lors d'études précédentes [25], [26].

3.5.2.2 Description géotechnique des roches meubles

Tableau 3.5-4 : Description géotechnique des couches des roches meubles

	Composition	USCS ¹ (selon SN 670 004- 2b-NA)	Epaisseur	Evaluation
Couche a Couche de couverture / remplissage artificiel	- Selon l'emplacement du forage, remblai (terreau ou humus, couche herbeuse) - Sous le terreau : remblai de gravier sablonneux au-dessous : surtout des sables, peu silteux à très silteux, parfois aussi graveleux, brun foncé à gris ocre, humide à mouillé, parfois traversé de racines, gravier, sablonneux à très sablonneux, peu silteux à très silteux, parfois galets, aux composantes à arêtes vives à arrondies, en partie fragmentées, brun gris à beige gris, humide à mouillé, béton, silt, sablonneux, pauvre à riche en graviers et galets, incorporations organiques, gris, humide	GP, GM, GC-GM, SW, SP, SP-SM, SC-SM, (CL-ML)	Se rencontre jusqu'à des profondeurs d'env. 0.4 m à 6.0 m à partir du bord supérieur du terrain. Considérée sur une large étendue, la limite inférieure de la couche se situe à une altitude entre env. 460.5 m et 486.2 m.	Dépôt meuble à compact, resp. consistance semi-rigide à très dure. Les zones de remblai ont une bonne capacité portante, les autres zones ont une capacité portante faible à moyenne. Les zones de remblai sont peu sensibles au tassement, les autres le sont fortement. Selon la composition, sensible au gel de manière négligeable à moyenne (G1 à G3 d'après SNV 670 140b). Les zones à granulométrie fine sont sensibles à l'eau et, mis à part les remblais, également aux secousses, parfois non cohésives.
Couche b₁ Alluvions récentes	Silt et sable fin, peu de graviers, pauvre à riche en galets, sables (surtout sables fins à moyens), propre à silteuse, faiblement graveleuse à graveleuse, grise, incorporations organiques (bois), d'après [25] également silts argileux, silts avec sables et graviers, sables propres, graviers silteux avec sables et graviers propres avec sables possibles.	SP-SM, SP-SC, d'après [25] aussi CL-ML, SM, SP, GM, GW	Dans l'état actuel des investigations sur le sol de fondation, elle n'affleure que dans les forages proches de l'Aar dès une profondeur d'env. 2.0-5.5 m à partir du bord supérieur du terrain. L'épaisseur est de 1.5 m à 1.6 m. La limite inférieure de la couche se situe à une altitude entre env. 461.2 m et 463.7 m.	Dépôt meuble à moyennement compact. Capacité portante faible à moyenne, sensibilité au tassement moyenne à forte ; peu appropriée pour supporter des fondations. Légèrement sensible au gel (G2 d'après SNV 670 140b). Sensible à l'eau et aux secousses.

¹ Unified Soil Classification System.

	Composition	USCS ¹ (selon SN 670 004- 2b-NA)	Epaisseur	Evaluation
Couche b₂ Limon de pente	Produits d'altération de la molasse : silt, très finement sablonneux à sables fins, faiblement à fortement silteux, rarement graveleux, inclusions grises, roses, ocre, rouille et noires, carrière de grès calcaire, stratification fine, gris beige à beige, humide, peu à assez plastique	SC, SC-SM, CL, CL-ML, aussi ML	Dans l'état actuel des investigations sur le sol de fondation, elle affleure surtout sur les versants. L'épaisseur est de 1.0 à 9.7 m, la limite inférieure de la couche se situe à une altitude entre 461.5 m et 472.3 m et descend en direction du NW.	Consistance mi-rigide à dure, resp. meuble à compacte, parfois aussi dépôts non compacts. Faible capacité portante, forte sensibilité au tassement ; non appropriée pour supporter des fondations. Moyennement sensible au gel (G3 d'après SNV 670 140b). Sensible à l'eau et aux secousses.
Couche c₁ Moraine	Silt, fortement sablonneux, graveleux, brun clair, sec, faiblement plastique à sables moyens, faiblement silteux à silteux, peu de graviers (surtout graviers fins à moyens), brun ocre ; d'après [25], dans la zone de la centrale nucléaire existante on trouve aussi des graviers et du sable, propres à peu silteux, parfois des galets, brun ocre, composantes à arêtes vives ou arrondies, blocs possibles, humide.	CL-ML, dans la zone de la centrale nucléaire actuelle aussi GM, GP	Dans l'état actuel des investigations sur le sol de fondation, elle n'affleure que localement avec des épaisseurs comprises entre env. 1.0 m et 7.7 m. La limite inférieure de la couche se situe à une altitude entre env. 466.3 m et 468.5 m.	Consistance rigide à dure, resp. dépôt moyennement à très compact. Très bonne capacité portante, peu sensible au tassement ; très appropriée pour supporter des charges concentrées de fondation. Sensibilité au gel moyenne à forte (G3 à G4 d'après SNV 670 140b). Sensible à l'eau et aux secousses, parfois non cohésif.
Couche c₂ Débris de chenaux	Graviers, fortement sablonneux, propres à peu silteux, mouillés, composantes aux arêtes arrondies jusqu'à complètement arrondies, galets, graveleux, sablonneux, propres à peu silteux.	GW, GW-GM, localement aussi SP, SM	Dans presque tous les forages, affleurent comme dépôts au-dessus de la molasse d'eau douce inférieure (USM). L'épaisseur est d'env. 1.0 m à 14.3 m, la limite inférieure de la couche se situe à une altitude entre 4570 m et 470.2 m et descend en direction du NW.	Dépôt compact à très compact. Très bonne capacité portante, peu sensible au tassement ; très appropriée pour supporter des charges concentrées de fondation. Pratiquement pas à légèrement sensible au gel (G1 à G2 d'après SNV 670 140b). Non cohésif.

¹ Unified Soil Classification System.

	Composition	USCS ¹ (selon SN 670 004- 2b-NA)	Epaisseur	Evaluation
Couche d Molasse d'eau douce inférieure	Distinction selon les types de faciès : Lits de méandres (RG) : grès moyens à grossiers Dépôts de crevasse (DF) : grès fins à moyens Levéés naturelles (UW) : grès fin silteux à silts Dépôts d'inondation (U) : silts à argiles		Se trouve dans toute la zone, épaisseur d'env. 2000 m.	Très bonne capacité portante, peu sensible au tassement ; très appropriée pour supporter des charges concentrées de fondation.

3.5.2.3 Valeurs dynamiques de référence

Les caractéristiques dynamiques ont été déterminées aussi bien in situ par la sismique down-hole et la sismique de surface qu'en laboratoire (par des essais à la colonne de résistance).

3.5.2.3.1 Roches meubles

En raison de l'épaisseur parfois très faible des roches meubles et de la présence de composants à granulométrie grossière, il a été difficile de prélever un échantillon de sol sain et d'effectuer un essai de laboratoire pertinent : il n'existe pas de données convaincantes. C'est pourquoi les caractéristiques dynamiques ont été déterminées uniquement par la méthode de sismique hybride.

La vitesse des ondes P dans les roches meubles a été indiquée ici avec $v_P = 600-1800$ m/s, aucune information n'a été donnée sur la vitesse des ondes S. Aucune limite de couches n'est identifiable dans les roches meubles.

La sismique down-hole qui a été effectuée ne peut donner aucune indication fiable sur la vitesse des ondes P et S dans les roches meubles. Cela s'explique par la difficulté de savoir quelles sont les temps d'arrivée des ondes P et S, ce qui rend impossible la détermination précise de la vitesse des ondes dans les roches meubles.

¹ United Soil Classification System.

3.5.2.3.2 Roche

Sismique hybride

Die P-Wellen-Geschwindigkeiten des Molassefelsens wurden durch die hybride Seismik zu $v_P = 1\,800\text{--}3\,600\text{ m/s}$ angegeben. Der Bereich von $v_P = 1\,800\text{--}2\,400\text{ m/s}$ zählt zur verwitterten Molasse.

Sismique down-hole

Les vitesses des ondes P et S ont été déterminées au moyen de la sismique down-hole. Les vitesses mesurées présentent peu de différences selon la profondeur et varient peu d'un forage à l'autre [52].

Les vitesses des ondes P se situent principalement dans une fourchette de $v_P = 2000\text{--}2500\text{ m/s}$, les valeurs correspondantes pour les ondes S sont de $v_S = 800\text{--}1000\text{ m/s}$. Le coefficient dynamique d'élasticité se situe entre $E_{\text{dyn}} = 4000\text{ et }6000\text{ MN/m}^2$, le module dynamique de cisaillement est de $G_{\text{dyn}} = 1200\text{--}2300\text{ MN/m}^2$. Le coefficient de Poisson varie peu avec la profondeur et se situe principalement entre 0.38 et 0.44.

Test par colonne de résonance

Les vitesses mesurées des ondes de cisaillement se situent entre $v_S = 300\text{ et }1400\text{ m/s}$. Avec $v_S = 560\text{ m/s}$, la valeur moyenne est nettement inférieure aux valeurs mesurées avec la sismique down-hole. Le coefficient dynamique de cisaillement se situe entre $G_{\text{dyn}} = 200\text{--}1100\text{ (–5000) MN/m}^2$. Avec $G_{\text{dyn}} = 530\text{ MN/m}^2$, la valeur moyenne est également nettement inférieure à la valeur calculée à partir des vitesses des ondes de cisaillement déterminées par la sismique down-hole.

Les raisons des différences entre les valeurs de terrain et celles de laboratoire sont connues. La différence des valeurs mesurées peut être due à la modification de l'état de tension (entre les conditions de terrain et de laboratoire). Au laboratoire ce sont en outre des échantillons isolés qui sont étudiés alors que sur le terrain les valeurs moyennes sont mesurées sur un grand volume de sol. Les facteurs de 2-3 entre terrain et laboratoire, donnés dans la littérature, sont confirmés ici.

L'amortissement dans le domaine des amplitudes de dilatation due au cisaillement γ jusqu'à env. 1×10^{-5} se situe en moyenne à env. 7% ; pour des valeurs supérieures (γ jusqu'à env. 1×10^{-3}), elle s'élève jusqu'à env. 20%.

3.5.2.4 Conséquences pour la technique de construction

3.5.2.4.1 Données de base actuelles pour le projet

L'emplacement et la cote de fondation du bâtiment du réacteur variera en fonction de la technologie du réacteur. La disposition des autres constructions dépendra aussi du choix de la technologie.

D'après les indications de charge et de surface des différentes technologies, la pression au sol spécifique peut être estimée à env. $0.4\text{--}0.8\text{ MN/m}^2$ (en fonction des bâtiments et des technologies).

Selon la technologie, la cote de fondation du réacteur se situera entre env. 448 m et 462 m.

3.5.2.4.2 Résistance du sol et tassements

Le bâtiment du réacteur reposera directement sur la roche et les autres bâtiments seront situés probablement plus haut.

Dans les roches meubles, les couches c1 (moraine) et c2 (débris de chenaux) sont les plus appropriées pour de petits bâtiments avec semelle de béton armé. En raison de leur sensibilité au tassement, les couches b1 (alluvions récentes) et b2 (limons de pente) ne conviennent pas pour des fondations.

Dans le cas de charges plus importantes, il est exclu de construire des semelles de béton armé dans les roches meubles ; c'est la roche qui sert d'horizon de fondation. Si les bâtiments se trouvent plus haut et ne sont pas en contact direct avec la roche, on peut envisager une fondation sur pilotis. Pour calculer une telle installation, il faudra tenir compte du risque de liquéfaction lié aux contraintes horizontales, dont il est question au chapitre 3.5.2.4.3.

La roche offre un excellent sol de fondation quant à la force portante et à la résistance au tassement. La stratification est subhorizontale et on peut présumer que si l'ancrage est suffisant (env. 5 m) et que la charge repose verticalement sur les couches, c'est principalement la force portante de la roche intacte qui supportera la charge.

En raison du déchargement important de l'excavation et de la rigidité de la roche, le tassement ne devrait pas être un problème important.

Les cotes de fondation prévues pour le réacteur tiennent entièrement compte de ces données.

3.5.2.4.3 Risque de liquéfaction

Dans le contexte des risques de tremblements de terre induits par la géologie et la géotechnique, l'évaluation du risque de liquéfaction des roches meubles, ainsi que des tassements qui en résultent et de la stabilité des talus sur les rives de l'Aar, revêt une importance majeure.

Le risque de liquéfaction des couches de roches meubles a été évalué au moyen de processus empiriques ([112], [113], [116]) : en s'appuyant sur le nombre de coups mesuré sur place par le Standard Penetration Test (SPT), sur la liquéfaction observée ou non observée, ainsi que sur une tension de cisaillement induite par un séisme de magnitude 7.5 (« cyclic shear stress ratio » CSR), on détermine une courbe limite qui sépare les zones de liquéfaction et de non-liquéfaction. Les tassements possibles dus à la liquéfaction sont également déterminés dans chaque couche de roches meubles à l'aide des coups SPT mesurés sur place [114].

Les couches de sol qui ne sont pas retenues sur les côtés (par exemple les rives de l'Aar à Mühleberg) pourraient perdre leur stabilité par liquéfaction et entraîner des éboulements latéraux. A Mühleberg, la couche supérieure des roches meubles (couche a) se trouve au-dessus du niveau de la nappe souterraine et n'entre donc pas en ligne de compte pour des phénomènes induits par la liquéfaction. Des études ont montré que des sols sablonneux avec des nombres de coups SPT de moins de 15 pouvaient présenter un risque d'étalement latéral [115]. Le nombre moyen de coups SPT des deux couches suivantes (couches b et c), qui est de 17 et 30, se situe au-dessus de cette valeur, de sorte que le risque de tels phénomènes existe encore pour la couche b – même s'il peut être considéré comme faible. La couche c ne présente en revanche aucun risque de liquéfaction.

Etant donné que la couche b ne convient pas pour la fondation de bâtiments en raison de sa sensibilité au tassement, aucune construction ne sera implantée dans cette couche. En cas de fondation dans la couche c, ainsi que dans la molasse (couche d), on veillera à ce que la couche b ne soit gênée par aucune résistance horizontale.

Le risque de liquéfaction a été déterminé pour toutes les constructions importantes pour la sécurité dans la centrale nucléaire actuelle de Mühleberg. Les tassements induits par liquéfaction pour des valeurs PDA entre 0.2 g et 1.0 g sont de l'ordre de quelques centimètres. On peut donc admettre que sur le site de Mühleberg, les tassements seraient négligeables, même en cas de grandes accélérations induites par un séisme. On peut dès lors exclure que des dégâts sur des installations importantes pour la sécurité seraient causés par la liquéfaction du sol (pour autant que les fondations de ces installations ne se trouvent pas dans la couche b).

3.5.2.4.4 Mesures d'aménagement du territoire destinées à protéger les eaux souterraines

L'Aar est classée dans le secteur A₀ de protection des eaux (le secteur A₀ comprend les eaux superficielles et leurs zones riveraines, pour autant qu'il y ait nécessité de garantir une exploitation particulière), le secteur d'implantation du projet à proprement parler se trouve dans le secteur B de protection des eaux (qui comprend des régions dont les nappes souterraines ne présentent qu'un faible intérêt pour l'exploitation). Dans le secteur de protection B, ce sont les directives générales sur la protection des eaux qui sont en vigueur pour les projets de construction, comme le devoir de diligence, l'interdiction de polluer et le maintien de la nappe souterraine. Quel que soit le secteur de protection, il est nécessaire d'obtenir une autorisation en matière de protection des eaux (basée sur la législation cantonale) pour les installations en contact avec la nappe souterraine, l'évacuation des eaux, etc.

L'éventualité d'un changement d'affectation de la région (du secteur A₀ au secteur A_u) peut être évaluée comme suit : l'épaisseur moyenne de la nappe souterraine des roches meubles est d'env. 4 m dans le périmètre étudié et peut varier entre 0 et 6 m. L'alimentation ne se fait pas par l'Aar et il n'y a pas non plus de situation « by-pass » (infiltration des eaux courantes en amont, exfiltration en aval). Les perméabilités montrent aussi que la productivité de l'aquifère des roches meubles est limitée (les débris de chenaux perméables à granulométrie grossière présentent des étalements latéraux limités). Du point de vue de la loi sur la protection des eaux, il ne s'agit pas d'une nappe souterraine intéressante pour l'exploitation. Il ne faut donc pas s'attendre à un changement de statut, c'est-à-dire à un reclassement de la région dans le secteur de protection A_u (eaux souterraines exploitables).

3.5.2.4.5 Eboulements spontanés

Dans la région de la centrale nucléaire en projet, il n'existe pas de véritable zone d'éboulements. Deux secteurs de pentes présentent cependant, en raison de leur inclinaison, une disposition aux éboulements spontanés. Il s'agit d'une part de la colline molassique « Runtigerain », située au sud, qui présente par endroits des rochers abrupts et une faible couverture de roches meubles, et d'autre part du pied du versant, situé au nord et partiellement composé de produits d'érosion de la molasse. On considère que les facteurs qui pourraient déclencher de tels éboulements spontanés de surface sont soit de fortes précipitations, soit un séisme.

Les précipitations ne provoquent que des mouvements très limités dans l'espace, ce qui fait que ceux-ci restent sans effet sur le site. Un séisme en revanche peut entraîner la chute de paquets de terre et de rochers plus importants. Les divers scénarios sont décrits ci-dessous.

Pour le « Runtigerain », on peut imaginer que des roches meubles se détacheraient et qu'il y aurait des chutes de pierres. Comme les roches meubles sont peu épaisses, les matériaux détachés n'occuperaient que très peu de place. En cas de chute de pierres, les matériaux tomberaient directement devant la paroi, étant donné l'escarpement du versant et l'effet d'amortissement des limons de pente.

Au pied du versant nord, des éboulements spontanés sont imaginables en raison du risque de liquéfaction des limons de pente. Mais cette couche n'est de toute façon pas appropriée pour des fondations à cause de sa sensibilité au tassement. Comme cette couche proche de la surface présente une faible épaisseur, il est facile d'empêcher les éboulements spontanés à l'aide de drainages (lutte contre les causes) ou de maîtriser leurs conséquences en prenant des mesures simples, comme éviter de placer des ouvertures proches du terrain du côté du versant ou construire de petits murs de soutènement (protection de l'ouvrage).

Des éboulements dans le lac de Wohlen ou dans l'Aar sont certes théoriquement imaginables ; leurs effets (inondation du terrain d'implantation et perte du refroidissement par les eaux fluviales) sont traités aux chapitres 3.4.4.2.1 et 3.6.2.42.

3.5.2.5 Contrôle de la néotectonique lors des travaux de déblaiement

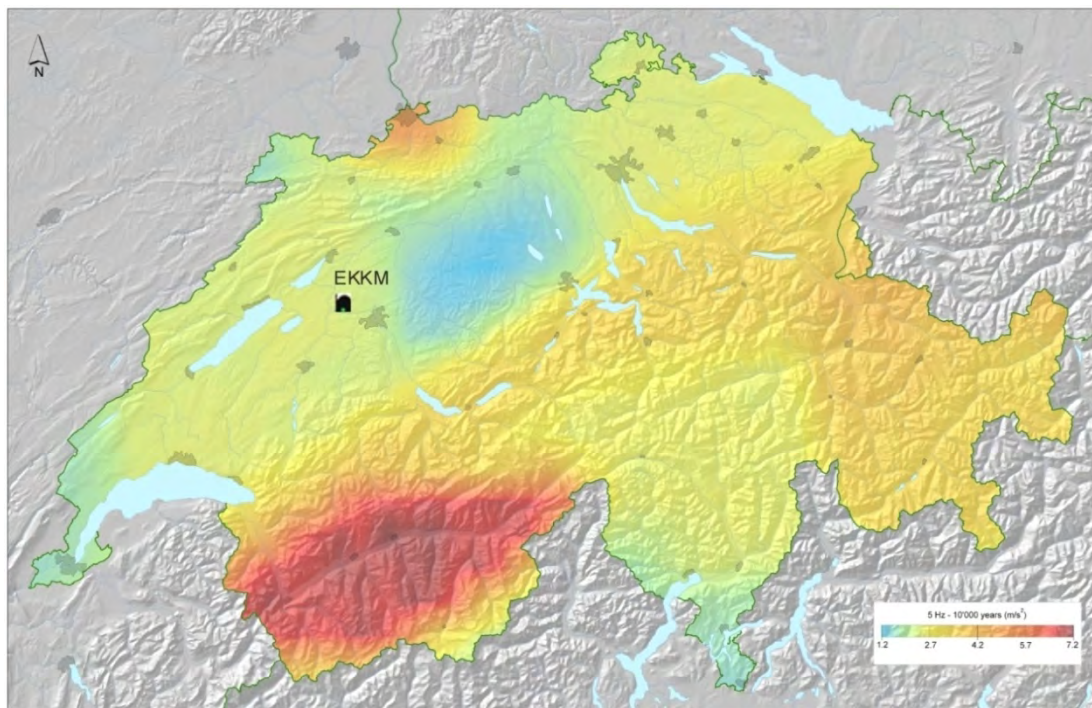
Dans les projets de construction réalisés jusqu'à maintenant sur le site de Mühleberg, on n'a observé aucune déformation dans les roches meubles qui pourrait être attribuée à des processus tectoniques. Néanmoins, lors de la réalisation du projet de l'EKKM, une attention particulière sera portée aux manifestations de processus tectoniques dans les roches meubles, dans le cadre d'un accompagnement géologique. A cet effet, la planification du contrôle de la construction prévoit des prélèvements géologiques à chaque étape du déblaiement.

3.5.3 Sismologie et risque de séismes spécifique au site

3.5.3.1 Tremblements de terre considérés comme événements externes

Mühleberg se trouve dans une région de Suisse à faible aléa sismique (voir figure Figure 3.5-14). et la plupart des sismologues estiment que l'ensemble de la Suisse fait partie des « intraplate regions », c'est-à-dire de régions relativement stables au sein des grandes unités tectoniques (PEGASOS 2004 [76]). Dans ces régions d'activité sismique faible à moyenne, la probabilité de séismes importants est faible ; mais si la probabilité d'occurrence de tremblements de terre diminue, la force de ceux-ci augmente. Avec des probabilités annuelles extrêmement faibles $\leq 10^{-4}$, telles que prises en considération dans l'analyse de sûreté d'une centrale nucléaire, il faut envisager de forts séismes – même dans des régions calmes du point de vue sismologique – qui pourraient provoquer d'énormes secousses et par conséquent des dégâts importants aux installations. C'est pourquoi les tremblements de terre font partie des plus importants événements externes à prendre en considération selon l'ordonnance sur l'énergie nucléaire (OENu [2]).

Figure 3.5-14 : Carte de l'aléa sismique du Service sismologique suisse (SED, 2004). Sont représentées les accélérations horizontales attendues (en m/s^2) pour une fréquence de 5 Hz et un temps de retour de 10 000 ans.



Source : Service sismologique suisse (SED)

3.5.3.2 Analyses de l'aléa sismique

3.5.3.2.1 Analyse déterministe

Lors d'une analyse déterministe des risques sismiques, on identifie d'abord toutes les sources sismiques dont on admet qu'elles pourraient contribuer au risque sur le site. On établit ensuite pour chaque source l'éloignement et la plus grande magnitude envisageable du séisme. Avec un coefficient d'atténuation correspondant à la géologie locale, on calcule pour chaque source le mouvement de vibration du sol qui en résulte (« ground motion », GM), que l'on exprime par un paramètre GM approprié (par ex. « peak ground acceleration », PGA). C'est la valeur maximale du paramètre de mouvement du sol qui est déterminante pour l'accélération de référence, donc par exemple la valeur PGA la plus élevée qui puisse être attribuée à une seule source.

Les incertitudes sont prises en considération dans la mesure où des hypothèses *pessimistes*, autrement dit *prudentes* (ou *conservatrices*), sont émises au sujet des caractéristiques des sources et du coefficient d'atténuation. Cette manière de faire s'oppose à la pratique de l'analyse probabiliste (voir chapitre 3.5.3.2.2) où ce sont les hypothèses *les plus probables* qui sont choisies et où les incertitudes sont prises en considération par des estimations paramétriques, des modèles alternatifs ou des distributions aléatoires.

3.5.3.2.2 Analyse probabiliste

Contrairement à l'approche déterministe, l'analyse probabiliste (« probabilistic seismic hazard analysis », PSHA) prend en compte non seulement les ground motions pour un seul scénario prudent (ou pour un petit nombre d'entre eux), mais tous les scénarios vraisemblables dans un rayon de plusieurs centaines de kilomètres.

La méthodologie de l'analyse probabiliste des aléas a été introduite en 1968 par C. A. Cornell [119], [120].

Pour déterminer l'aléa sur un site, trois données doivent être spécifiées :

- 1 La géométrie et la description géographique de la source. Une source sismique est un volume de la croûte terrestre caractérisé par une faille tectonique, par une concentration de sismicité historique ou généralement par des propriétés géologiques et tectoniques semblables, distinctes des régions avoisinantes et qui peut donc entrer en ligne de compte en tant que déclencheur d'un séisme. La situation relative de la source par rapport au site et un rapport magnitude / longueur de faille déterminent la distribution de probabilité conditionnelle de la distance entre la surface de faille et le site.
- 2 Les fréquences d'occurrence, c'est-à-dire le taux moyen de séismes de toutes magnitudes dans le périmètre d'une zone source et la distribution des magnitudes. Il s'agit aussi d'établir la magnitude maximale $M_{\max}$ considérée comme possible dans la zone source.
- 3 La fonction d'atténuation. C'est un algorithme qui permet d'estimer les amplitudes des accélérations (GM) qui interviennent sur le site à la suite d'un séisme d'une certaine magnitude à une certaine distance. Dans des modèles empiriques, on tient compte – au moyen de l'écart-type σ (qui mesure la *variabilité aléatoire*) – des variations que présentent plusieurs séismes de même magnitude et éloignement à une seule station d'observation, ou un seul et même séisme dans plusieurs stations de même éloignement.

Grâce à ces trois données – géométrie de la source, fréquences d’occurrence et fonction d’atténuation – il est possible de calculer l’aléa, et donc la probabilité annuelle qu’une valeur seuil donnée de l’amplitude d’accélération soit dépassée sur le site. Cette probabilité résulte de l’intégration sur la distance, la magnitude et les contributions des différentes sources. L’aléa est calculé pour plusieurs amplitudes d’accélération. Le résultat est une courbe d’aléa qui représente la probabilité annuelle de dépassement en fonction de l’amplitude d’accélération. Des courbes d’aléa sont déterminées pour différents paramètres de mesure du mouvement vibratoire du sol, par exemple pour la « Peak Ground Acceleration » (PGA) ou pour des accélérations spectrales à différentes fréquences.

Pour comprendre l’analyse probabiliste, il est tout à fait utile et raisonnable de partir de l’analyse déterministe. Ici aussi, l’élément de base est le scénario du séisme unique dont l’effet à distance sur le site est modélisé. Mais par la double intégration sur la magnitude et sur la distance, tous les séismes dont la zone source se trouve dans la région du site et qui pourraient causer des dégâts sont cumulés, chaque scénario étant pondéré par sa probabilité d’occurrence, qui dépend elle-même du lieu et de la magnitude. La multiplication par le taux d’occurrence transforme les probabilités en fréquences annuelles, un résultat qui a la préférence pour des décisions relatives au dimensionnement ou pour la comparaison avec d’autres accidents externes. Enfin, avec la somme cumulée sur toutes les zones sources, on inclut dans l’analyse une vaste zone d’influence, avec le potentiel sismique supposé de toutes les failles et unités tectoniques.

L’approche probabiliste de l’aléa repose sur un grand nombre d’analyses déterministes, donc sur la modélisation de nombreux scénarios. L’analyse déterministe n’est pas un complément, mais une *partie* de l’approche probabiliste. La PSHA vise – et parvient – à englober tous les scénarios de séismes crédibles. Mais cette approche ne dit encore rien sur la manière dont les divers scénarios sont modélisés ou dont les mouvements du sol sont calculés sur le site.

3.5.3.2.3 Modélisation des scénarios de séismes

Dans le cadre d’une analyse probabiliste, le calcul des mouvements du sol (ground motions, GM) s’appuie le plus souvent sur un modèle simple de la source sismique (point ou faille) et sur un modèle empirique de GM (ou d’atténuation) (voir chapitre. 3.5.3.5.3). Dans le cas de forts séismes près du site, ce modèle simplifié de la source ne suffit souvent plus. La forme et la situation de la fracture de départ commencent à jouer un rôle (« finite source effect »). De plus, les bases de données des séismes sur lesquelles s’appuient les modèles empiriques de GM comprennent souvent trop peu de séismes à proximité des failles. C’est pourquoi la question de la validité des modèles empiriques pour le voisinage est parfois posée, c’est-à-dire que l’on se demande s’ils seraient en mesure de prédire correctement les accélérations sur le site.

Dans des cas particuliers de ce genre, on essaie parfois de modéliser l’effet à distance des séismes. Ces simulations numériques (« extended source simulations », ESS) calculent les paramètres du mouvement de vibration du sol à partir d’un modèle spatial et dynamique précis de la source et d’un modèle des couches du sous-sol comprises entre la source et le site, conformément à la théorie de la propagation des ondes. Si les experts s’accordent pour affirmer que l’avenir est à la simulation numérique, la question de savoir si cette approche représente aujourd’hui déjà une alternative valable ou du moins un complément utile est en revanche controversée. En effet, les hypothèses qui doivent être faites dans les données d’entrée

(paramètres géométriques et dynamiques du modèle de la source, paramètres de transmission, etc.) sont difficilement vérifiables alors qu'elles peuvent influencer de manière critique les résultats de la modélisation. Si les prédictions des mouvements du sol données par les ESS divergent fortement de celles du modèle empirique (dans un sens ou dans l'autre), on accordera en général plus de crédit aux secondes.

Même si les résultats des ESS ne doivent pas être utilisés sans précautions, ces simulations peuvent être valables lorsqu'il s'agit d'estimer l'importance de l'effet « extended source » au voisinage d'une source. La dépendance azimutale (« directivity »), la forme des spectres ou la forme de l'atténuation dans un rayon de quelques kilomètres seulement seront par exemple révélateurs. Les résultats des ESS sont souvent mis en concordance avec les mouvements du sol calculés de manière empirique afin de vérifier les modèles GM dans le voisinage mal couvert ou de les extrapoler dans ce secteur (voir chapitre 3.5.3.4.2).

3.5.3.3 Le projet PEGASOS

3.5.3.3.1 Une analyse SSHAC niveau 4 appliquée au site

En Suisse, au début des années 1980 déjà, après les premières évaluations des bases de données de séismes historiques – qui étaient présentées comme des cartes de l'aléa sismique – on a opté pour la méthode de l'analyse probabiliste de l'aléa sismique (PSHA). En 1997, de nouvelles directives ont été publiées aux Etats-Unis pour la réalisation de ces analyses et la détermination des données d'entrée nécessaires, sous la responsabilité du « Senior Seismic Hazard Analysis Committee » (SSHAC). Celui-ci avait été chargé par diverses institutions américaines – dont la Nuclear Regulatory Commission (US-NRC) – d'évaluer les expériences réalisées jusque-là avec des analyses probabilistes et de proposer, sur cette base, une procédure acceptable et cohérente [77]. Les recommandations du SSHAC précisent de quelle manière les données d'entrée d'une analyse probabiliste doivent être recueillies, quel rôle jouent les experts et quelles règles et procédures formelles doivent être respectées pour parvenir à un résultat solide et robuste. Selon SSHAC, l'« expert elicitation » (questions formelles aux experts) a pour but de constituer, pour toute question importante pour les inputs, tout le spectre des hypothèses et opinions dominantes dans la communauté scientifique et de quantifier les incertitudes associées¹. Il n'est pas nécessaire d'obtenir un consensus des évaluateurs puisque tous les modèles entrent sur un pied d'égalité dans l'analyse. Les recommandations spécifient quatre niveaux d'analyse avec un degré croissant d'effort et d'exigences. Elles se différencient principalement par le nombre d'experts impliqués à titre de représentants de leur spécialité et par le degré de leur interaction.

Vers la fin des années 1990, le développement de la méthode analytique et les recommandations du SSHAC ont incité la DSN à demander une nouvelle évaluation du risque sismique aux emplacements des centrales nucléaires de Suisse. L'analyse devait appliquer les directives méthodologiques les plus récentes. Une étude de niveau 4 était demandée, à savoir la variante la plus complexe et la plus exigeante pour des installations et des constructions particulièrement sensibles quant à la sûreté. Suite à cela, l'« Analyse probabiliste de l'aléa sismique aux

¹ « To represent the center, the body, and the range of technical interpretations that the larger informed technical community would have if they were to conduct the study » (103).

emplacements des centrales nucléaires suisses » (PEGASOS) a été commandée, planifiée et réalisée entre 2001 et 2004.

PEGASOS est la première – et jusqu’ici la seule – étude de ce type en Europe et l’une des analyses de l’aléa sismique les plus complètes et les plus approfondies du monde. De nombreux experts internationaux reconnus – d’Europe et des Etats-Unis – ont été impliqués dans le projet. L’étude a été accompagnée tout au long par une équipe de review de la DSN : dans son rapport final d’expertise [73], la DSN conclut à une évaluation globalement positive.

3.5.3.3.2 Structure du projet

Le projet PEGASOS était divisé en quatre projets partiels correspondant aux principaux thèmes à étudier :

- Le sous-projet SP1 devait élaborer les modèles sismiques des sources (« Seismic Source Characterisation »). Quatre groupes d’experts y participaient, composés chacun de trois spécialistes de différentes disciplines – un sismologue, un géologue connaissant les caractéristiques locales et un spécialiste des aspects sismo-tectoniques. La caractérisation des sources sismiques, fondée sur une volumineuse base de données constituée selon les vœux des experts, comportait non seulement la définition spatiale des sources, les taux d’activité, les magnitudes, les fréquences, les magnitudes maximales, les profondeurs de foyers et les répartitions des types de failles, mais aussi l’estimation des incertitudes associées. Chacun des groupes d’experts pluridisciplinaires a élaboré sa propre solution au problème posé.
- Le sous-projet SP2 était chargé de développer les modèles de réduction pour le calcul des accélérations du sol sur le site (« Ground Motion Characterisation »). Le travail comprenait l’évaluation, le choix, la recomposition et la pondération de modèles empiriques de GM publiés dans différentes fenêtres de magnitude et d’éloignement. Il s’agissait aussi de quantifier les incertitudes sous la forme d’alternatives, de répartitions et de valeurs délimitantes des domaines physiquement possibles. Chaque expert, tout en étant en contact avec ses collègues et en échangeant avec eux, a développé une solution indépendante.
- Le sous-projet SP3 était responsable de la caractérisation de l’effet de site pour le calcul de la réponse au sol (« Site Response Characterisation »). Les quatre experts étaient chargés de développer un modèle des couches de roches meubles proches de la surface spécifique à chaque site et d’en déduire des facteurs de renforcement en fonction de la fréquence. Pour ce faire, il fallait tenir compte de nombreuses dimensions susceptibles de jouer un rôle, notamment les comportements non linéaires en cas de fortes amplitudes d’accélération, l’angle d’incidence et les effets 2D. Dans ce cas aussi, l’estimation des incertitudes faisait partie des solutions fournies par chacun des quatre experts.
- Le sous-projet SP4 avait la mission d’effectuer les calculs proprement dits de l’aléa (« Seismic Hazard Computations »). Ceux-ci devaient se baser sur la combinaison de toutes les variantes de modèles et répartitions de paramètres de tous les experts de tous les projets partiels, ce qui signifiait en pratique qu’il fallait calculer un très grand nombre de données d’entrée individuelles et en tenir compte, avec une pondération adéquate, dans le résultat final. Le cahier des charges de SP4 comprenait aussi les analyses de sensibilité destinées à mettre en évidence les contributions au risque des différents scénarios de séisme, ainsi que l’importance respective des divers éléments d’input.

3.5.3.3 Données d'entrée

La méthodologie SSHAC a pour but et pour contenu essentiel de constituer, pour chaque thème significatif de l'input, le spectre complet des opinions dominantes dans la communauté scientifique informée et de l'utiliser dans l'analyse de l'aléa.

Dans le cadre de PEGASOS, le concept d'« expert elicitation » a été utilisé au sens large pour tous les processus et activités servant à développer les données et les modèles d'entrée pour l'étude de l'aléa. Faisaient partie de ces processus de travail :

- Constitution et suivi de bases de données spécifiques au sous-projet
- Rencontres et ateliers
- Entretiens avec les experts et séances de travail interactives
- Rencontres de feed-back
- Mise en forme et paramétrage des inputs de la PSHA
- Résumés écrits (« elicitation summaries »)

Selon leur mandat, les experts et groupes d'experts ont défini non pas une seule version des données d'input, mais des variantes qui correspondaient à leur point de vue à partir du spectre d'avis exprimés dans le cercle des spécialistes de leur discipline. L'élaboration des données d'entrée par les experts a exigé au total plus de deux ans. Durant cette période, cinq ateliers, plusieurs séances interactives, des entretiens avec des experts et d'autres séances sur des thèmes spécialisés ont eu lieu pour chaque sous-projet.

Bien que les solutions proposées par les différents experts et groupes d'experts aient parfois présenté de fortes divergences, les résultats des interprétations, exprimés sous forme d'aléa, ont été étonnamment homogènes. Contrairement à d'autres études comparables, les grandes marges d'incertitude n'étaient pas dues à des avis extrêmes de certains experts (« outliers »), mais résultaient des incertitudes que les spécialistes avaient intégrées à leurs propres estimations.

3.5.3.4 Incertitudes

L'une des caractéristiques importantes de l'analyse probabiliste de l'aléa sismique est la prise en compte quantitative des incertitudes sur toutes les hypothèses et valeurs d'input. Ces incertitudes sont propagées tout au long de la séquence de calcul et se traduisent, dans les résultats, par des distributions d'incertitudes.

Les études PSHA avancées distinguent deux types d'incertitudes : les incertitudes épistémiques et la variabilité aléatoire. Celle-ci – appelée aussi « hasard » – est intrinsèque au processus physique lui-même ou à la compréhension simplifiée de celui-ci. La force, le lieu et la date du prochain séisme qui devrait survenir sur une faille sont par exemple des éléments de la variabilité ou de l'incertitude aléatoire. L'état actuel des connaissances ne permet pas de les prédire, quelle que soit la qualité des bases de données. La composante aléatoire de l'incertitude n'est donc pas réductible. L'incertitude épistémique, au contraire, est liée au manque de données qui pourraient fournir des indications plus précises ou plus solides sur le déclenchement de séismes ou leurs effets. Les incertitudes épistémiques peuvent donc en principe être réduites par des progrès méthodologiques ou des recherches complémentaires.

Dans les analyses, ces deux types d'incertitudes sont traités de manières différentes : les incertitudes aléatoires sont directement incluses dans l'intégrale des risques afin d'obtenir une seule courbe d'aléa, alors que les incertitudes épistémiques sont prises en compte dans de multiples suppositions, hypothèses, modèles ou valeurs paramétriques. Ces nombreuses interprétations, représentées comme les branches pondérées d'un « arbre logique », sont systématiquement calculées et aboutissent à une série de courbes d'aléa avec pondération associée, d'où l'on déduit finalement la distribution des incertitudes, souvent représentée par des courbes moyenne, médiane ou quantiles des probabilités de dépassement.

3.5.3.3.5 Résultats

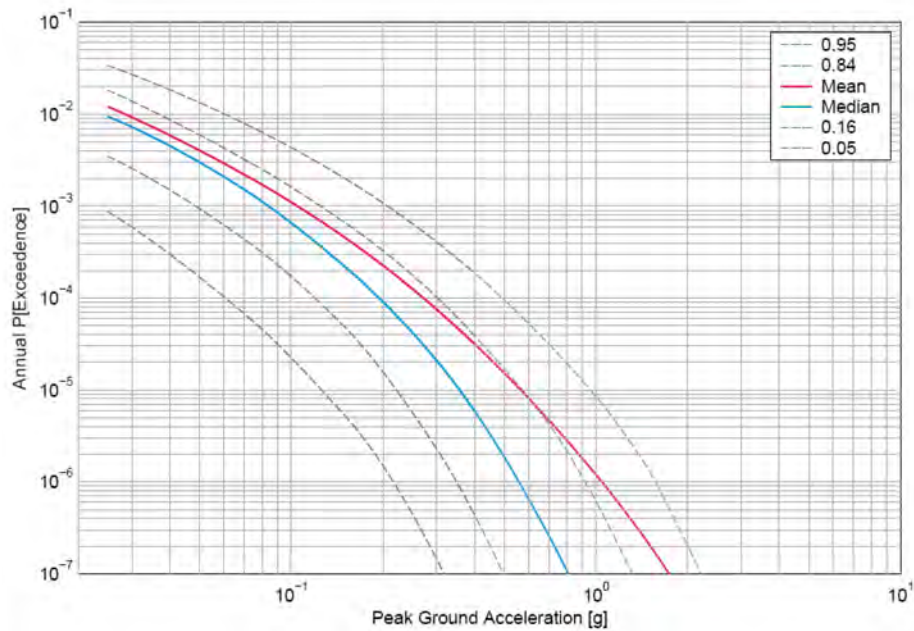
Les résultats de l'étude PEGASOS [125] comprennent des courbes et des spectres d'aléa pour les accélérations verticales et horizontales de la roche¹ et du sol² qui se rapportent à trois niveaux de référence différents. S'y ajoutent les dé-agrégations des contributions à l'aléa selon la distance et la magnitude, ainsi que les études de sensibilité, destinées à mettre en évidence l'importance relative des diverses catégories d'input et de la diversité des avis des experts.

On représente d'ordinaire ces résultats sous forme de courbes d'aléa pour des fréquences définies ou de spectres pour des probabilités définies. Les figures Figure 3.5-15 et Figure 3.5-16 montrent des exemples pour la région du site avec les distributions d'incertitudes associées. La figure Figure 3.5-15 fait par exemple apparaître qu'à Mühleberg, une accélération horizontale (PGA pour la roche) de 0.2 g a une probabilité de 10^{-4} par année d'être dépassée. Cette accélération est la valeur médiane de la distribution qui représente l'incertitude de l'affirmation. Si l'on tient compte du renforcement, en fonction de la fréquence, par les couches rocheuses proches de la surface (« effet de site »), la valeur correspondante (pour le sol) est d'env. 0.4 g).

¹ Le terme de « roche » (reference rock), tel qu'il est utilisé ici dans le contexte de l'aléa sismique, ne correspond pas à la définition géologique de « roche en place », située au-dessous des couches de roches meubles proches de la surface. Dans ce sens, la « roche » est définie par une vitesse d'ondes de cisaillement arbitraire et conventionnelle ; dans le cas de PEGASOS, cette vitesse était de 2000 m/s. Les « accélérations de la roche » (rock motions) sont des accélérations fictives, pronostiquées, qui seraient mesurées à la surface (ou au niveau des fondations) si toutes les couches proches de la surface étaient déplacées à une vitesse de $V_s < 2000$ m/s et remplacées par une vitesse de la roche de 2000 m/s (reference rock site condition). Si on les met en relation avec les probabilités de dépassement annuelles, on obtient l'« aléa de la roche » (rock hazard).

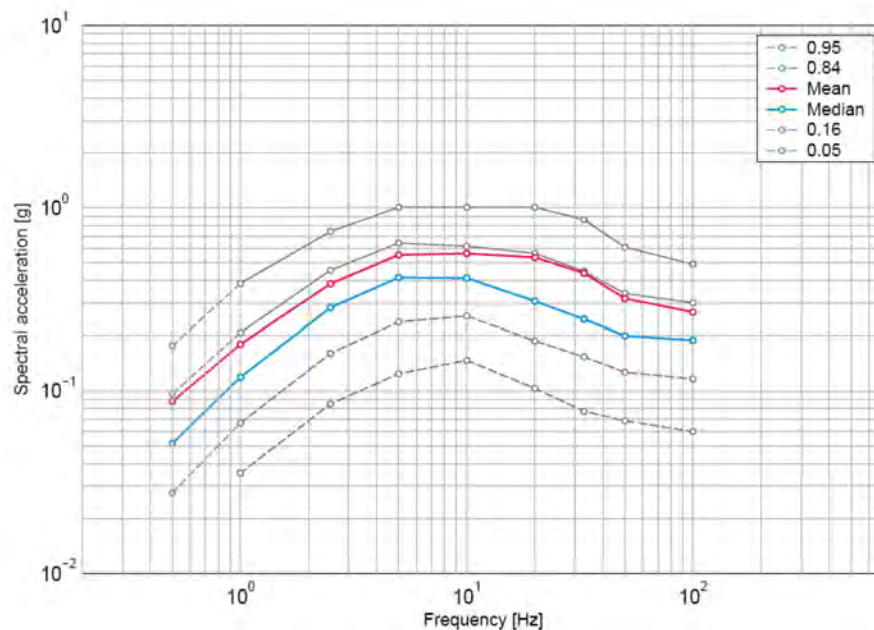
² « Sol » (soil) est le terme utilisé ici pour les couches géologiques proches de la surface dont les vitesses sont inférieures à la vitesse de référence de la roche de 2000 m/s. Dans ce sens, le sol ne correspond pas aux roches meubles situées au-dessus de la roche en place, même si celles-ci sont comprises. Les « accélérations du sol » (soil motions) englobent l'« effet de site », c'est à dire le renforcement du mouvement vibratoire du sol par les couches proches de la surface ayant une vitesse $V_s < 2000$ m/s. Ce sont des valeurs réalistes pour des accélérations qui seraient effectivement mesurées sur le site à une cote définie (par exemple la surface ou les fondations). L'« aléa du sol » (soil hazard) est obtenu comme fonction des probabilités annuelles de dépassement.

Figure 3.5-15 : Courbe d'aléa pour la région du site de Mühleberg, composantes horizontales pour la roche, la surface, la PGA. La distribution des incertitudes est représentée par les courbes de la moyenne, de la médiane et des quantiles de 5%, 16%, 84% et 95%.



Source : SwissNuclear

Figure 3.5-16 : Spectre d'aléa (« Uniform Hazard Spectrum ») pour la région du site de Mühleberg, composantes horizontales, roche pour une probabilité annuelle de dépassement de 10^{-4} et 5% d'atténuation (critique).



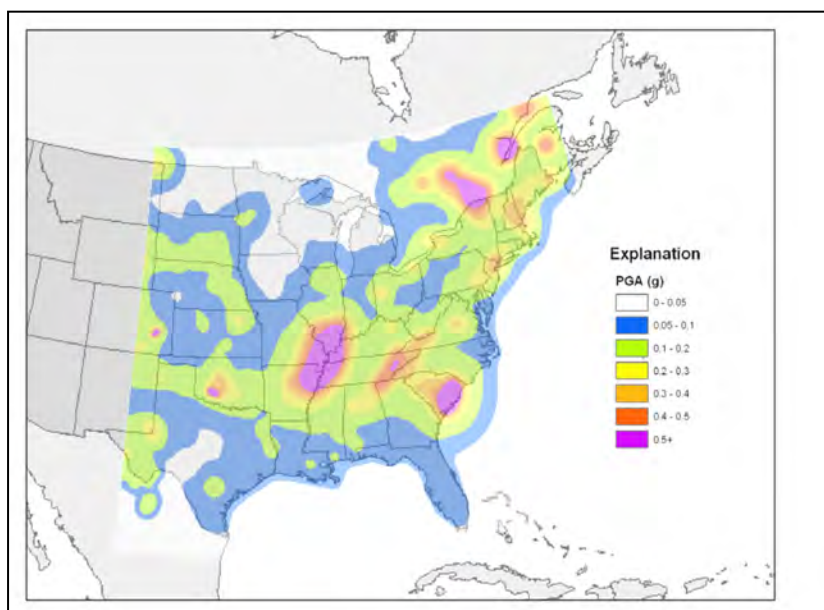
Source : SwissNuclear

3.5.3.3.6 Les résultats de PEGASOS comparés aux études antérieures

En comparaison avec les études probabilistes d'aléa effectuées dans les années 1980, les valeurs d'accélération du sol données par PEGASOS sont nettement plus élevées. Selon le site, la PGA (« peak ground acceleration » par hautes fréquences), qui correspond à une probabilité annuelle de dépassement de 10^{-4} , est 1.7 à 2.7 fois supérieure à la valeur calculée précédemment. Cette situation ne peut s'expliquer que par le fait que dans l'étude récente, il a été tenu compte de la variabilité aléatoire des modèles de ground motions (GM) dans l'intégrale de l'aléa [76] (voir chapitre 3.5.3.2.2). Cette source d'incertitude supplémentaire, qui correspond à la dispersion des modèles empiriques de GM, s'explique par le caractère trop simplificateur du premier modèle. Dans la réalité, il n'est pas possible de décrire de façon adéquate en n'utilisant que deux paramètres – la magnitude et la distance – les processus complexes qui se déroulent aussi bien dans la source du séisme que dans le transport de l'énergie. Cette source d'incertitude a été ignorée au début. Mais depuis le milieu des années 1980, le standard international tient compte de la variabilité des modèles de GM dans les analyses probabilistes de l'aléa.

Pour le site de Mühleberg, les accélérations (de roche) de PEGASOS sont proches des valeurs d'aléa d'autres régions présentant une activité sismique semblable, c'est-à-dire faible à moyenne. On le voit notamment dans la comparaison avec la partie orientale et centrale des Etats-Unis où, selon la Figure 3.5-17, les valeurs moyennes de la PGA (pour la roche) ayant une probabilité de dépassement de 10^{-4} se situent entre 0.1 g et 0.4 g. Pour Mühleberg, la valeur correspondante est de 0.26 g.

Figure 3.5-17 : Valeurs moyennes de la PGA pour des roches dures (3000 m/s) avec une probabilité annuelle de dépassement de 10^{-4} dans la partie centrale et orientale des Etats-Unis (calculées sur la base d'une carte d'aléa USGS – pour des roches moins dures, de 2000 m/s, il résulterait des accélérations à peine plus élevées, selon la norme PEGASOS). Les résultats d'aléa de PEGASOS correspondent à la codification jaune.



Source : SwissNuclear

3.5.3.4 Suite des travaux : PEGASOS Refinement Project (PRP) et réseau étendu de surveillance sismique

3.5.3.4.1 Réduction des incertitudes dominantes

Malgré son évaluation généralement positive de l'étude PEGASOS, le groupe de review de la DSN a aussi relevé des potentiels d'amélioration. Le « PEGASOS Refinement Project (PRP) » a pour objectif de compléter et d'améliorer l'étude PEGASOS et ses résultats.

Les incertitudes épistémiques dominantes devaient être réduites par une amélioration des bases de données (notamment par des investigations supplémentaires sur le terrain). Avant d'esquisser le projet, on a élucidé quelles incertitudes pesant sur les diverses données d'entrée et lesquelles il importait le plus de réduire en raison de leur influence sur l'aléa. Il en est ressorti que l'incertitude globale était dominée par celle des modèles de ground motions du SP2, notamment parce qu'il n'existe pratiquement pas de données dans le domaine de magnitudes $M > 5$ pour la Suisse. En conséquence, on a décidé d'axer le programme de recherche PRP sur les deux principaux objectifs suivants :

- Un nouveau modèle d'atténuation pour la roche : un nouveau modèle d'atténuation pour la Suisse (« Swiss stochastic ground motion model ») doit être développé à l'aide de nouvelles données historiques et instrumentales et incluant la base de données européenne Strong-Motion Data¹. On attend de ce modèle qu'il représente mieux la situation en Suisse et que grâce à lui les incertitudes diminuent (voir chapitre 3.5.3.5.3).
- L'examen de l'effet de site : le renforcement du signal sismique, de la profondeur de référence jusqu'à la cote des fondations de la construction ou de la surface, joue un rôle important pour l'aléa du sol. De nouvelles investigations de terrain sur les sites doivent permettre de mieux caractériser les propriétés des roches meubles proches de la surface et de limiter le champ des interprétations (voir chapitre 3.5.3.5.4).

D'autres améliorations encore sont prévues, notamment le remaniement et la mise à jour du catalogue des séismes du SED, les calculs des résultats d'aléa jusqu'à une limite inférieure de magnitude (« lower bound ») $M_0 = 4.5$ et la modélisation alternative de scénarios de séismes sélectionnés avec des « Extended Source Simulations » (voir chapitre 3.5.3.4.2).

3.5.3.4.2 Extended Source Simulations

Comme expliqué au chapitre 3.5.3.2.3, il est possible d'introduire des Extended Source Simulations (ESS) afin de mieux comprendre les effets existant au voisinage des fractures qui sont à l'origine de séismes, de tester des modèles empiriques de GM ou d'extrapoler des modèles dans le voisinage mal couvert. L'application de cette méthode est aussi planifiée dans le cadre du projet Pegasos Refinement.

Les Extended Source Simulations, telles qu'elles sont prévues dans le cadre du PRP, se rattachent à plusieurs études semblables effectuées durant le projet PEGASOS. La vaste étude ESS, destinée à expliquer les Median Ground Motions au voisinage de la source, qui a été initiée par le groupe d'experts de la DSN et confiée à l'« Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica

¹ Voir <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD>

Sperimentale » (OGS), de Trieste (Italie), revêt une importance particulière. Avec la spécification d'input utilisée pour l'étude, il n'a pas été possible d'identifier, au voisinage proche du site, des failles réelles et connues présentant une telle magnitude potentielle. La profondeur des sources et la capacité limitée de représentation de la sismique réflexion dans le secteur du socle s'y opposaient (voir chapitre 3.5.3.5.2). On a donc choisi une autre voie, qui promettait une flexibilité optimale au prix de calculs plus importants. Au lieu de définir plusieurs sources (hypothétiques) dans le voisinage du site, on a groupé cent sites tests à une distance de 1 à 25 km autour de deux sources fixes. Pour celles-ci, il s'agissait d'une part d'une surface de faille verticale permettant de modéliser des décrochements dextres et senestres et d'autre part d'une surface à 45° pour modéliser les failles normales et les chevauchements. La dimension des surfaces de faille (25 x 12.5 km) était compatible avec un séisme de magnitude 6.5. Avec cette disposition géométrique, des ground motions ont pu être calculés pour un grand nombre de configurations site-source. Pour chaque configuration site-source, on a fait en outre varier les distributions des décrochements (slips) et les paramètres de propagation de la fracture, afin de tenir compte des incertitudes aléatoires et d'améliorer la base statistique.

Les résultats de l'étude contribuent à une meilleure compréhension du rôle de la direction et de l'éloignement pour les accélérations proches de la source, de la forme spectrale de celles-ci et de leur dépendance au type de faille. Ils donnent aussi des informations sur la sensibilité à des changements dans les paramètres d'entrée, permettant ainsi d'évaluer la robustesse de la méthode, notamment en comparaison avec la modélisation empirique des ground motions.

Pour les points de contrôle situés à 1 km de la surface de rupture, les accélérations ESS de l'étude portant sur les fréquences de 2.5 à 100 Hz sont comparables aux accélérations du modèle empirique PEGASOS ; en revanche, pour les fréquences inférieures à 2.5 Hz, elles sont significativement plus élevées (d'un facteur 3 à 5). Les raisons possibles de la faible diminution des amplitudes des accélérations ESS pour les parties du spectre à fréquence faible ont été examinées et intensivement discutées. Trois causes possibles ont été envisagées dans l'étude d'OGS : les propriétés du modèle de propagation des ondes, notamment une couche à faible vitesse de 150 m d'épaisseur proche de la surface, et dans une moindre mesure la forme des distributions des décrochements et l'arrangement géométrique des nucléations (points d'arrachement) sur la surface de rupture.

Comme les accélérations ESS dépendent de manière critique d'hypothèses initiales difficilement vérifiables, on s'est abstenu de les utiliser directement. Au lieu de cela, on les a étalonnées à la distance de 10 km à l'aide des accélérations des modèles empiriques de prédiction des mouvements du sol (GMM) et utilisées ensuite pour tester la validité des modèles dans le voisinage proche. Les valeurs normalisées présentent une très bonne concordance sur tout le domaine de fréquences. Les analyses ESS prévues dans le cadre du PRP pourront recourir aux résultats et enseignements de l'étude d'OGS afin de parvenir à des résultats réalistes et solides.

3.5.3.4.3 Constitution et exploitation d'un réseau microsismique

Pour évaluer le risque sismique, il est important de comprendre les mouvements tectoniques actuels dans le voisinage proche et étendu des sites. Comme une grande partie de ces mouvements se manifestent par des tremblements de terre, la surveillance de l'activité sismique peut apporter des informations sur la situation des zones de faiblesse actives et l'état actuel des tensions de la croûte terrestre.

Il est actuellement prévu d'étendre le réseau de surveillance sismique du Service sismologique suisse (SED) en installant une vingtaine de stations supplémentaires dans le Plateau et le Jura, afin d'abaisser le seuil de détection et d'améliorer la précision de la localisation. Ce réseau microsismique permettra d'enregistrer les secousses même les plus faibles, d'une magnitude $M = 1.0$. Il en résultera notamment un calcul plus précis des mécanismes au foyer et des informations plus fiables sur le régime des tensions.

La requérante ainsi que la Nagra sont associées au nouveau réseau. Pour une mise à profit optimale des données obtenues, le SED se chargera de leur exploitation et de la tenue du catalogue élargi des tremblements de terre. Des vingt stations additionnelles, quatre environ seront construites au voisinage des nouveaux sites de la centrale nucléaire. Les autres le seront en fonction des besoins de la Nagra.

L'université de Fribourg mène actuellement une étude sur la sismicité de la « zone de Fribourg », qui devra déterminer quelles sont les fractures actives du point de vue sismique dans cette zone. Le résultat doit être présenté dans un modèle 3D qui montre les épicentres des séismes enregistrés et les fractures actives. Ce modèle nécessite un réseau encore plus dense de stations d'enregistrement : on prévoit deux arrays mobiles, qui seront installés en divers endroits pour quelques mois à chaque fois et mesureront des séismes de magnitude -1.5 à 1.5.

Les études de l'université de Fribourg contribueront non seulement à élargir le réseau de surveillance des séismes, mais aussi à approfondir la compréhension de la zone de Fribourg.

3.5.3.5 Les risques propres au site de l'EKKM

Les résultats de PEGASOS sont le fruit d'un processus approfondi sur la base des connaissances internationales les plus récentes. Les résultats concernant la KKM se rapportent à un site qui ne se trouve qu'à env. 500 m de l'EKKM. Ils sont donc également valables – sous réserve de l'épaisseur des roches meubles – pour le site de Niederruntigen. Il va de soi que pour l'analyse des résultats, on s'occupera en priorité des questions que les experts ont jugées déterminantes pour l'aléa sismique du site.

La structure de l'évaluation décrite ci-dessous suit les étapes fondamentales de l'analyse probabiliste de l'aléa. Partant des conditions cadres sismo-tectoniques, on examinera de quelle manière les sources sismiques peuvent être caractérisées dans le domaine d'influence, quelles sont les sources qui se sont révélées particulièrement importantes, quel rôle jouent les modèles d'atténuation et comment l'ébranlement du sol par les roches meubles proches de la surface peut être chiffré.

3.5.3.5.1 Base de données et contexte sismo-tectonique

Alors qu'en de nombreuses régions du monde, particulièrement celles à forte activité sismique, les tremblements de terre observés peuvent être mis en relation avec des structures connues de la croûte terrestre, il n'en va pas de même en Europe continentale. A l'intérieur des grandes unités tectoniques (« régions intraplaques »), la sismicité est presque toujours diffuse. A de très rares exceptions près, les foyers sismiques ne peuvent pas être corrélés avec des systèmes de failles géologiques connus et cartographiés. Cette remarque vaut même, dans une moindre mesure, pour des unités macrotectoniques comme les Alpes, le bassin molassique, le Jura ou le fossé rhénan. Ce n'est que rarement que la distribution de l'activité sismique observée suit les formes et les limites des systèmes de failles connus (comme par exemple dans le cas du fossé rhénan), et encore la relation n'est-elle généralement pas évidente (voir figure Figure 3.5-3).

Là où c'est possible, l'évaluation du risque sismique se base souvent sur des failles géologiques jugées susceptibles, sous l'influence des forces tectoniques, de déclencher des tremblements de terre (« failles actives »). La question se pose de savoir ce qu'il faut entendre par « faille active » (*active* ou *capable fault*) et quelles failles situées dans la zone d'influence seraient à classer comme « actives ». Les définitions traditionnelles, généralement développées dans et pour des régions aux caractéristiques tectoniques très différentes de celles de la Suisse, appliquent ce qualificatif à des failles dont on peut démontrer qu'elles ont bougé au cours d'une période qui s'étend très loin dans le passé. Cette période n'est pas définie précisément, mais remonte bien avant l'époque historique, le plus souvent jusqu'au début du Quaternaire. Suivant cette approche, les systèmes de failles connus peuvent être étudiés successivement et classés comme « actifs » ou « inactifs ».

Cette méthode est recommandée par l'AIEA.

Il est vrai que la nouvelle directive DS422 (Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations), encore à l'état d'esquisse, donne plus d'importance à l'analyse probabiliste de l'aléa sismique (PSHA) que les textes antérieurs (Safety Series No. 50-SG-S1 et Safety Guide NS-G-3.3). Néanmoins les exigences relatives à la base de données restent visiblement axées sur la sismicité liée aux failles et sur des analyses déterministes. C'est en particulier le cas des spécifications qui stipulent de manière rigide, en fonction de la distance au site, quelles données il faut relever et comment il faut les présenter. Cette manière de faire est explicable si l'on se rappelle que les recommandations de l'AIEA doivent avoir valeur universelle et définissent une norme minimale pouvant être appliquée partout quant aux relevés à faire et aux dispositions à prendre en matière de sécurité. Elles sont destinées en premier lieu aux projets de centrales nucléaires pour lesquels il n'existe pas encore d'étude de l'aléa sismique relatif au site. Tel n'est pas le cas de l'EKKM. Les études d'aléa menées pour les centrales nucléaires suisses ont atteint ces dernières années un niveau élevé en comparaison internationale, allant souvent très au-delà des directives AIEA pour ce qui est de la qualité et de l'exhaustivité des bases de données aussi bien que de la méthodologie.

La procédure « SSHAC Level 4 » exigée par l'autorité suisse de surveillance pour l'analyse probabiliste de l'aléa (voir chapitre 3.5.3.3) s'accompagne de son propre recueil de règles, qui laisse pleine autonomie aux experts pour la composition et l'organisation des bases de données et le choix des méthodes d'interprétation. Lorsque les règles SSHAC et les recommandations de l'AIEA n'étaient pas identiques voire se contredisaient, priorité a été donnée aux règles SSHAC.

Les experts de PEGASOS ont pu s'appuyer sur des bases de données de grande ampleur, réunies par le projet selon leurs vœux. Pour le groupe d'experts du SP1 (caractérisation des sources), la base de données comprend trois parties

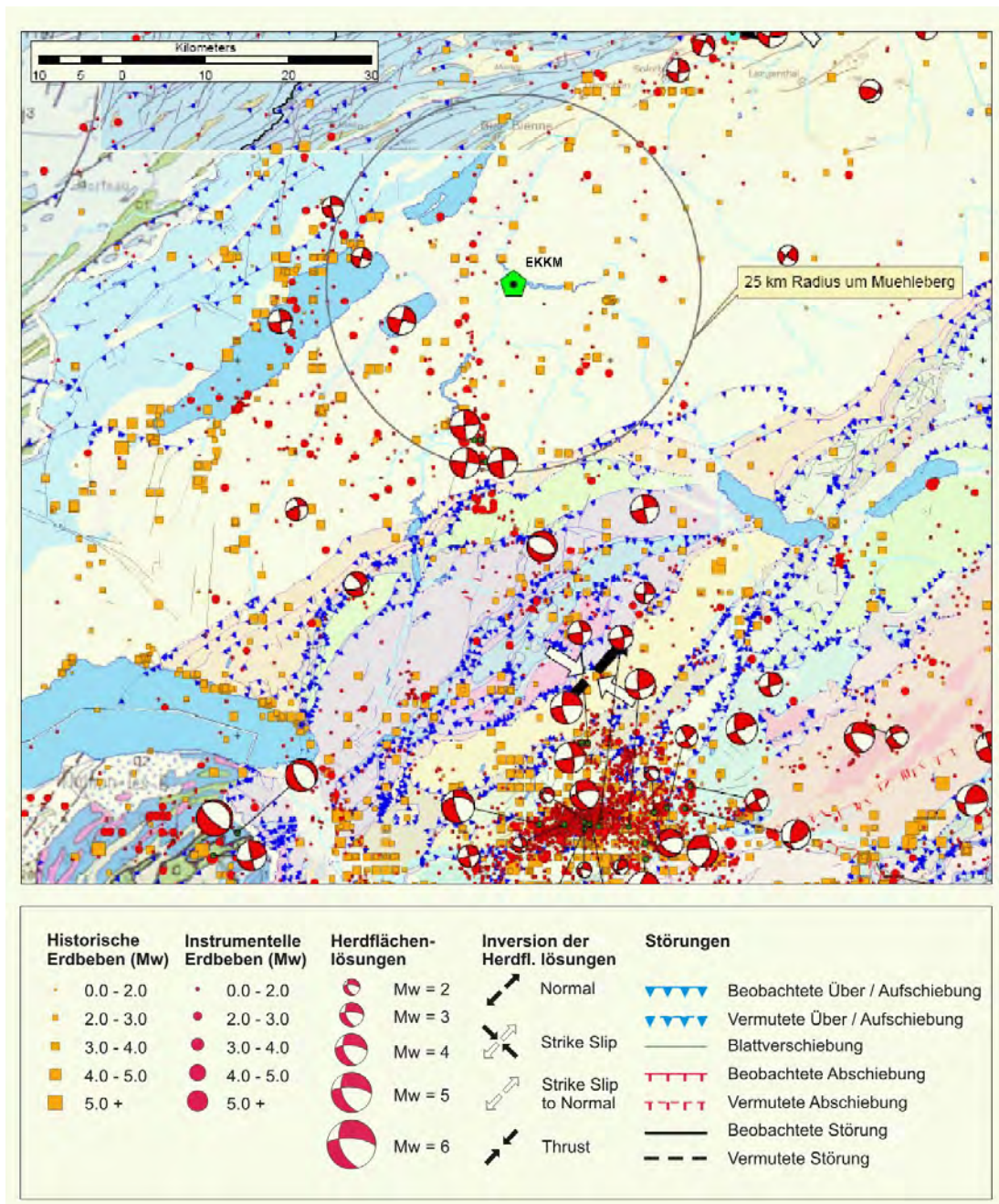
- la base de données du catalogue des tremblements de terre,
- la base de données des structures géologiques,
- la base de données sismo-tectoniques.

Toutes les données localisées sont organisées en couches SIG (système d'information géographique) et peuvent donc être combinées à volonté et cartographiées à n'importe quelle échelle. Les plus importantes de ces « couches SIG » se rapportent aux éléments suivants :

- Géologie et tectonique (10 cartes combinées selon les indications des experts)
- Failles (de tous types, classifiées selon différents critères)
- Catalogue des tremblements de terre (catalogue ECOS : Suisse et régions limitrophes)
- Intensités macrosismiques (1300 - 1980)
- Mécanismes au foyer (cartes avec mécanismes au foyer publiés)
- Topographie (jeu de données RIMINI, combiné avec GTOPO-30)
- Sismique réflexion (réseau complet de lignes de sismique réflexion)
- Structures profondes (cartes sismiques publiées)
- Profondeur du socle (cartes disponibles des isohypses de la surface du soubassement rocheux)
- Profondeur du Moho (épaisseur de la croûte)
- Cartes des flux thermiques et des sources
- Champ magnétique (cartes des champs magnétiques total et résiduel)
- Champ gravitationnel (cartes gravimétriques de Bouguer)
- Mesures de contraintes in situ (tirées du World Stress Map 2000)
- Contraintes résultant de mécanismes au foyer inverses
- Données sur le soulèvement et la subsidence (réseau de mesure national et réseau de mesure Nagra)

Des combinaisons de ces « couches SIG » (voir un extrait pour Mühleberg figure Figure 3.5-18) définissent le Modèle géodynamique dont sont partis les experts du SP1 pour leur zonage de caractérisation des sources. Le contenu de ce Modèle géodynamique a été présenté au chapitre 3.5.1.2.

Figure 3.5-18 : Extrait de la base de données PEGASOS de caractérisation des sources aux environs de Mühleberg (« modèle sismo-tectonique »). L'EKKM en projet est représentée par le pentagone vert.



QSource : SwissNuclear

3.5.3.5.2 Caractérisation des sources

En ce qui concerne la caractérisation des sources, on observe de nettes différences entre certaines recommandations de la directive AIEA DS422 d'une part et les règles du SSHAC d'autre part. Même là où il n'y a pas de contradiction manifeste, une partie des recommandations de l'AIEA se trouvent relativisées voire invalidées par les règles du SSHAC. Ces dernières disent par exemple que ce sont les experts qui fixent les exigences relatives au contenu de la base de données et qu'à cet égard ils ne sont nullement tenus à une gradation de l'effort d'investigation en fonction du rayon comme le préconise la première. De même, les experts sont libres d'appliquer leurs propres critères pour la définition d'une « faille active » (« active fault » ou « capable fault »), libres aussi de décider s'ils procéderont à la caractérisation des sources sur la base d'un modèle de structures sismogènes, d'une sismicité diffuse ou d'une combinaison des deux modélisations.

Quant à l'établissement d'une liste des failles connues dans les environs d'un site et à leur classification selon des critères d'activité ou de magnitude potentielle, les experts du SP1 de PEGASOS étaient unanimes à juger cette approche inutilisable ou inapplicable dans des zones à sismicité diffuse, comme l'Europe continentale. Un membre du groupe EG1c a remarqué à ce sujet que le nombre des failles « actives » pourrait être estimé de manière plus directe si l'on abordait la question par un autre angle. Comme tous les séismes naissent sur des failles géologiques et qu'en Suisse et dans son voisinage proche on connaît plus de 2000 épicentres, cela signifie qu'il doit y avoir en Suisse au moins 2000 failles actives. Or on ne connaît quasiment aucune de ces failles et l'on ne peut même pas conjecturer la position de la plupart d'entre elles. En optant pour un modèle qui privilégie les failles déjà cartographiées, on s'expose à des conséquences indésirables, puisque le potentiel de risque calculé pour les failles dépendrait de manière notable de l'état des connaissances sur leur position et de la possibilité de la placer sur la carte.

Ce groupe d'experts a choisi une définition plus logique des « failles actives », c'est-à-dire de celles qu'il y a lieu de faire figurer dans un modèle de sources en tant que sources de failles (fault sources) discrètes. Cette définition comprend une activité sismique qui se continue, indice que la déformation tectonique d'une région a été sous la dépendance de cette faille et que des tremblements de terre futurs le seraient aussi. Après un examen détaillé de plusieurs candidates, le groupe d'experts EG1c est parvenu à la conclusion qu'il n'existe en Suisse aucune faille satisfaisant à ces critères. Cet avis était celui de trois des quatre groupes d'experts ; seul le quatrième a inclus, avec une faible probabilité, en tant que variantes faiblement pondérées, deux sources de failles dans son modèle : la zone de Fribourg et la faille de Reinach. Celle-ci est discutée en détail au chapitre 3.5.3.6, ainsi que la manière dont PEGASOS en a tenu compte.

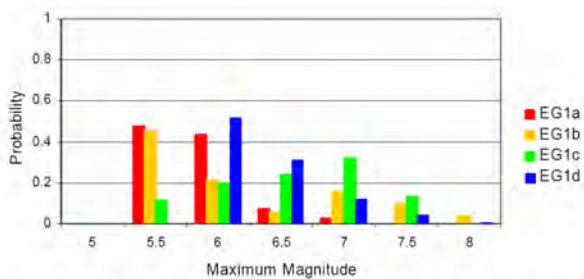
A ces deux exceptions près, l'ensemble de l'activité sismique a été modélisé par tous les experts de PEGASOS sous la forme de zones sources (« area sources »). Une zone source représente une région de la croûte terrestre possédant un taux de répétition en fonction de la magnitude, une magnitude maximale ($M_{\max}$) et une distribution des profondeurs focales qui lui sont propres, distincts de ceux des régions voisines. Ces paramètres sont spécifiés pour chaque zone source en

même temps que les incertitudes épistémiques. En général, on admet une distribution homogène de la sismicité et du potentiel sismique à l'intérieur d'une même zone source ¹.

Une zone source a le caractère d'une enveloppe comprenant une catégorie définie de scénarios sismiques associés à leur fréquence. Concrètement, cela signifie que l'on admet que n'importe quel tremblement de terre de cette catégorie pourrait survenir à tout instant en un point quelconque de la zone source, donc, dans le cas de la zone source qui inclut le site (« zone hôte »), par exemple aussi directement sous l'installation. Comme les contributions de tous les tremblements de terre de la gamme de magnitudes correspondant à la zone source, avec leur fréquence, sont déjà comprises dans le calcul de l'aléa sismique, une caractérisation géologique plus détaillée des failles dont la magnitude potentielle est comprise dans cette gamme est inutile puisque, quel que soit le résultat, cela ne changerait plus rien à l'estimation de l'aléa.

Pour les zones sources situées au nord des Alpes, les quatre groupes d'experts du sous-projet SP1 situent la valeur médiane des distributions de magnitudes maximales à $M_w = 6.1$ et la limite supérieure à $M_w = 7.0$ ou plus (voir figure Figure 3.5-19).

Figure 3.5-19 : Distributions de probabilité de la magnitude maximale pour les zones sources du nord de la Suisse. Développées par les quatre groupes d'experts du SP1 (caractérisation des sources)



Comparison of maximum magnitude distributions developed by the four SP1 expert teams for Northern Switzerland near the border with Germany

Source : SwissNuclear

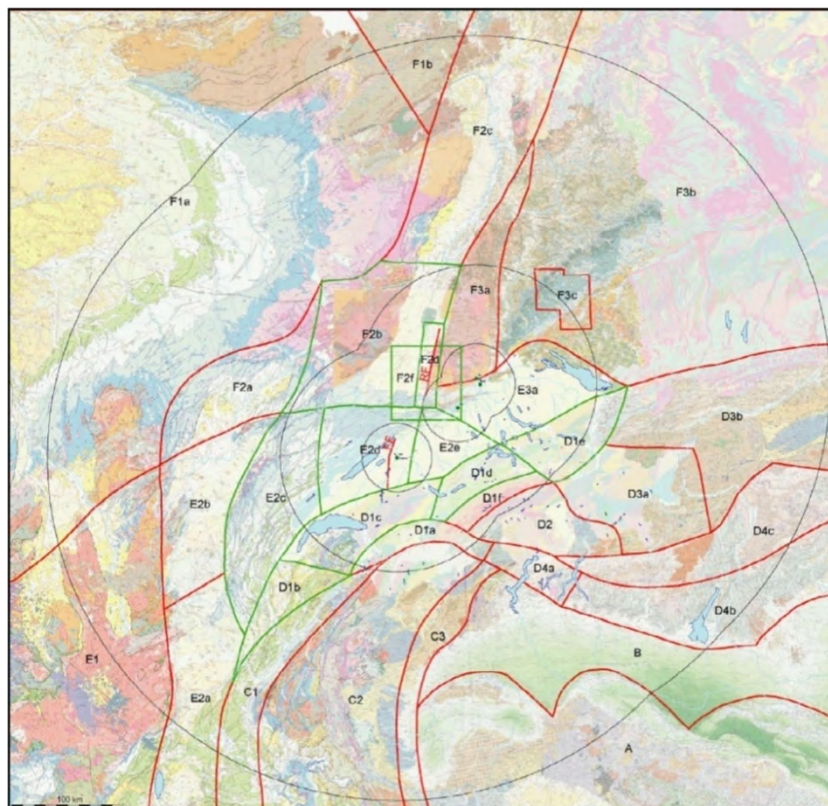
A propos du zonage des sources, une question importante se posait aux experts, celle de savoir si, pour le pronostic de l'activité sismique future, il fallait pondérer davantage la distribution observée de la sismicité ou les limites des unités tectoniques connues. En faveur de la sismicité observée, comme instrument primaire de prévision, il y a la corrélation souvent faible voire non perceptible avec la géologie ; à l'opposé, il y a le fait que l'observation de l'activité sismique ne porte que sur une période géologique très courte. La plupart des experts ont utilisé les deux approches ; en partie à différentes phases du zonage, en partie aussi en tant qu'alternatives dotées de pondérations différentes. La figure Figure 3.5-20 présente à titre d'exemple un zonage du groupe d'experts EG1a. Ce modèle n'est que l'une des 21 variantes géométriques présentées par ce groupe. Tous ces modèles de sources, comme on le voit sur la Figure 3.5-21, sont liés entre

¹ Il est cependant possible aussi de définir des zones sources ayant une distribution de la sismicité spatialement inhomogène. Dans ces cas-là, l'activité sismique observée historiquement et instrumentalement à l'intérieur de grandes zones sources régionales est lissée à l'aide de méthodes spéciales de filtrage 2D (p. ex. « kernel smoothing »). Le groupe d'experts EG1b a fait usage de cette possibilité.

eux en tant que branches pondérées d'un « arbre logique » qui constitue – avec les taux de répétition, les magnitudes maximales et d'autres paramètres des sources – la contribution de ce groupe à l'input des calculs d'aléa. Les familles de modèles des arbres logiques et les distributions de probabilité des paramètres des sources associées à chaque modèle servent à exprimer les incertitudes (épistémiques) de la caractérisation des sources.

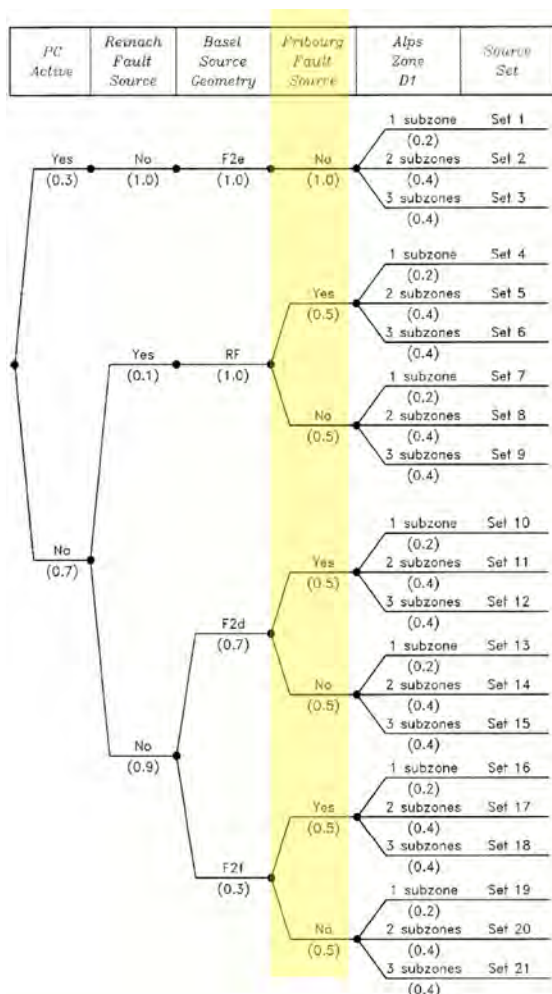
Les incertitudes peuvent contribuer à l'aléa sismique dans une mesure considérable, quoique très variable selon la catégorie d'inputs et le type d'aléa considéré. Les analyses de sensibilité effectuées à la fin de l'étude PEGASOS ont montré que les incertitudes portant sur la caractérisation des sources n'exercent qu'une influence relativement mineure sur l'évaluation de l'aléa. Cependant, si l'on considère spécialement les zones sources du voisinage immédiat du site, on voit que les distributions de probabilité relativement larges des magnitudes maximales représentées sur la figure Figure 3.5-19 ont un effet significatif sur l'aléa, surtout pour de grandes amplitudes des secousses et de hautes fréquences (voir figureFigure 3.5-24).

Figure 3.5-20 : Exemple d'un modèle de zonage du groupe d'experts EG1a. Dans cette variante, la zone du fossé permo-carbonifère n'est pas exclue comme zone source séparée (« PC Active » : No). Dans ces conditions, la zone de Fribourg est modélisée comme faille source (FF) dans la moitié des cas, c'est-à-dire avec une pondération de 0.5 (Fribourg fault source : yes).



Source : SwissNuclear

Figure 3.5-21 : Modèle de zonage des sources du groupe d'experts EG1a présenté sous forme de branches pondérées d'un arbre logique. Les représentations alternatives de la zone de Fribourg dans le cas (« PC Active » : No) sont marquées en jaune.



Source : SwissNuclear

3.5.3.5.3 Modèles de l'atténuation des mouvements du sol

Les (modèles de) relations d'atténuation décrivent la manière dont l'ébranlement du sol diminue à mesure que l'on s'éloigne du foyer, en fonction de la magnitude et de la fréquence. Les experts de PEGASOS ont considéré de nombreux modèles d'atténuation provenant de diverses parties du monde et les ont examinés quant à leur applicabilité. Une discrimination et une sélection univoques se sont cependant révélées impossibles en raison de la base de données trop petite des séismes forts en Suisse. La dispersion, c'est-à-dire l'incertitude épistémique sur les relations d'atténuation, restait très élevée. La question décisive, celle de savoir s'il fallait privilégier des modèles locaux mais mal étayés dans la gamme des fortes magnitudes, ou des modèles bien fondés mais de transférabilité douteuse, n'a pas pu trouver de réponse définitive. Les modèles d'atténuation font partie de la catégorie d'inputs qui contribue le plus à l'incertitude épistémique sur l'aléa sismique.

Dans le cadre du projet PRP (voir chapitre 3.5.4), on s'efforce d'élargir et d'améliorer la base de données des relations d'atténuation empiriques, notamment par des recherches de terrain sur les stations d'enregistrement. On peut s'attendre à ce que cela diminue la dispersion statistique des données et permette aux experts de formuler des relations d'atténuation nouvelles, optimisées pour la Suisse et aux marges d'incertitude plus petites.

3.5.3.5.4 Effet de site

La troisième catégorie de données d'entrée est celle des calculs requis pour déterminer l'effet de site, c'est-à-dire le renforcement du signal sismique depuis une profondeur de référence sur la roche jusqu'à la cote de fondation du bâtiment ou jusqu'à la surface (voir notes explicatives au chapitre 3.5.3.3.5).

En première approximation, le renforcement du signal en fonction de la fréquence dépend du profil de vitesses des ondes de cisaillement dans l'étage des couches proches de la surface¹. La figure Figure 3.5-22 présente le profil V_s que les experts de PEGASOS ont utilisé pour calculer l'effet de site à l'emplacement de la KKM (ligne noire). Ce profil de vitesse fait partie de l'arbre logique à l'aide duquel chaque expert définit l'effet de site et présente son estimation des incertitudes épistémiques. Les investigations sur le sol de fondation avaient pour but de réduire ces incertitudes dans la région du site de Mühleberg.

Une fois ces investigations terminées, les experts du SP3 du PRP (voir chapitre 3.5.3.4) disposeront de tous les résultats qui leur sont nécessaires pour l'interprétation et le recalcul de l'effet de site sur le lieu de l'EKKM. Pour chaque site, et en fonction de leur réévaluation des incertitudes épistémiques, ils établiront un ou plusieurs profils de vitesses des ondes de cisaillement, à l'aide desquels ils recalculeront l'effet de site. Ces calculs seront effectués dans le cadre de la demande d'autorisation de construire.

¹ D'autres éléments de l'arbre logique sont les propriétés matérielles du sol de fondation. Déterminées à l'aide d'une série de travaux sur le terrain et en laboratoire, elles servent de base pour le calcul de modèles 1D équivalents linéaires et 1D non linéaires de l'amplification propre au site. La base de données à ce sujet était si bonne dès le début du projet PEGASOS que les experts ont rapidement pu se mettre d'accord sur un seul et même ensemble de propriétés matérielles non linéaires et propres au site.

Afin d'obtenir tout de même une comparaison provisoire des fonctions d'amplification entre le nouveau site et l'ancien, la maison Résonance Ingénieurs-Conseils SA a été mandatée pour effectuer des calculs équivalents linéaires unidimensionnels de l'effet de site, en utilisant pour cela les quinze mêmes séries temporelles (avec échelle normalisée pour $PGA = 0.4 \text{ g}$) et les mêmes propriétés matérielles que pour les calculs analogues du projet PEGASOS. Le modèle de PEGASOS a servi de profil V_s d'input sous l'installation existante. Pour le nouveau site, c'est la courbe traitillée en bleu¹ (voir figure Figure 3.5-22), qui tient compte de l'épaisseur légèrement plus faible des alluvions sur le nouveau site, qui a été choisie.

Le profil d'input pour l'EKKM s'appuie en outre fortement sur les résultats des mesures down-hole, qui étaient les données récentes les plus fiables au moment des calculs². La figure Figure 3.5-23 montre – comme fonctions de la période (inverse de la fréquence) – les deux fonctions d'amplification moyennes (rapports des deux spectres de réponse calculés l'un à la surface du sol et l'autre sur un hypothétique affleurement de la roche) pour les sites de la KKM et de l'EKKM. D'après ces calculs, le renforcement des signaux sismiques avec la fréquence de résonance est à peu près identique sur les deux sites, mais la fréquence propre semble se déplacer vers des fréquences plus hautes en passant de l'ancienne à la nouvelle installation (14 Hz, période de 0.07 s contre 10 Hz, période de 0.1 s). Pour d'autres fréquences, le renforcement est parfois plus petit, parfois plus grand.

Cette discussion et ces calculs ne sauraient en rien préjuger des résultats du projet PRP. Ils ne représentent qu'un résultat provisoire et servent seulement à estimer dans quelle direction l'effet de site va se modifier selon toute vraisemblance lorsqu'on passera du site de l'ancienne installation à celui de la nouvelle. Les calculs du PRP se baseront sur de nouveaux profils de vitesses élaborés par les experts du PRP. Au moment de rédiger la demande d'autorisation de construire, il est probable que les résultats du PRP seront disponibles. La nouvelle installation pourra ainsi être conçue en fonction d'un pronostic actualisé des valeurs maximales attendues de l'accélération du sol.

¹ Tirée de [60]

² On a pris la moyenne des résultats de dix investigations down-hole sur le nouveau site (courbe brune dans la figure 3.5-22). Les résultats des mesures cross-hole n'étaient pas encore disponibles au moment des calculs.

Figure 3.5-22 : Modèle des vitesses des ondes de cisaillement sur le site de la KKM selon l'estimation des quatre experts du SP3 (effet de site), en noir. Le modèle PEGASOS, ainsi que le profil traitillé en bleu ont servi de données d'entrée pour les calculs d'amplification de résonance pour KKM et EKKM (voir figure 3.5-23). Le profil pour l'EKKM s'appuie fortement sur les résultats des mesures down-hole (fournis par 10 forages, courbe brune, voir [60]) et tient compte de l'épaisseur très légèrement plus faible des roches meubles sur le nouveau site.

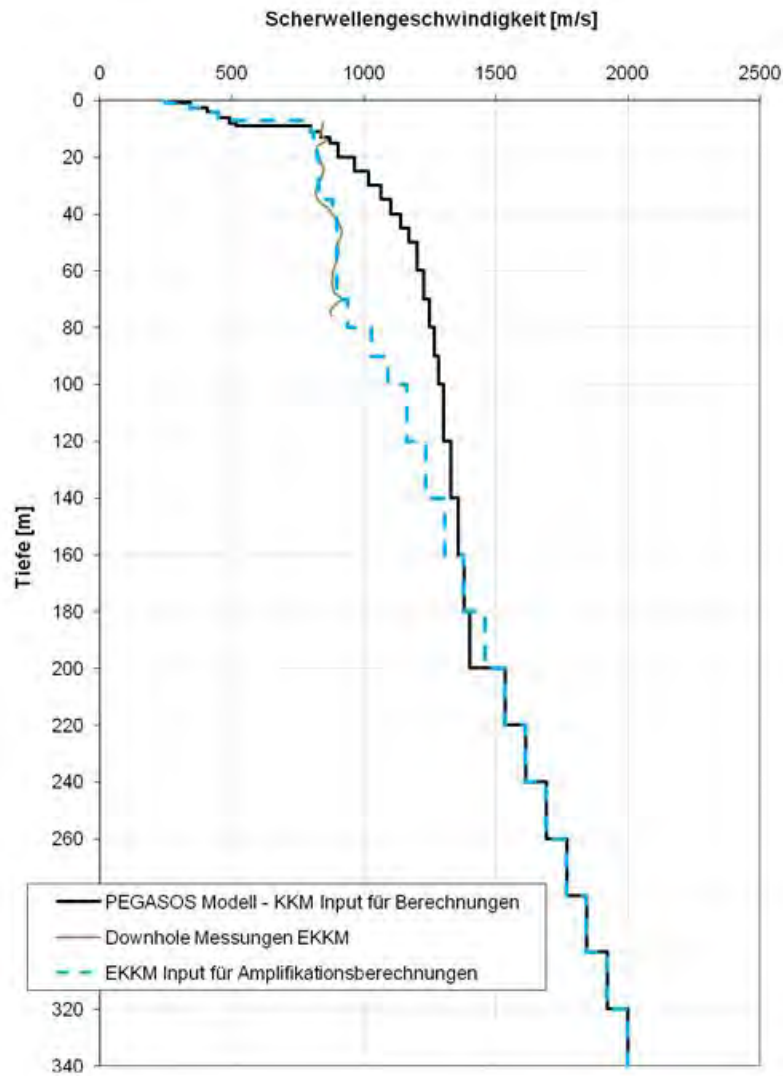
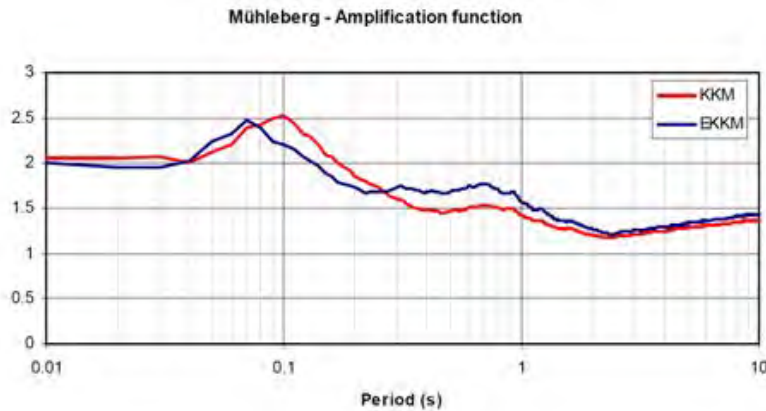


Figure 3.5-23 : Comparaison provisoire des fonctions d'amplification moyennes pour les sites de KKM (rouge) et EKKM (bleu)



3.5.3.5.5 Les principales contributions à l'aléa sismique

Pour l'analyse probabiliste de l'aléa, on considère les séismes survenus dans la région, à toutes les distances jusqu'à 300 km et dans tout le domaine des magnitudes à potentiel de dégâts. En fonction des fréquences et des amplitudes considérées pour les mouvements du sol, ces tremblements de terre contribuent dans des mesures différentes à l'aléa sismique. La déaggrégation des résultats pour Mühleberg montre, comme on le voit sur la figure Figure 3.5-24 (partie supérieure), que pour les faibles amplitudes des secousses (0.05 g) et les fréquences basses (0.5 Hz), les séismes de toute la gamme des distances et des magnitudes apportent des contributions significatives, tandis qu'à l'autre extrémité, pour celle des grandes amplitudes (0,7 g) et des fréquences les plus élevées (PGA), l'aléa est déterminé essentiellement par les séismes proches (< 20 km) et de magnitudes 5 – 7 (voir figure Figure 3.5-24, partie inférieure). Ceci n'est pas propre au site de l'EKKM, mais commun à tous les sites. A mesure que les amplitudes et les fréquences augmentent, le rôle des gros séismes et des séismes éloignés diminue rapidement. Ce tableau se confirme si l'on range en fonction de leur contribution les différentes sources délimitées par les experts.

Les plus fortes contributions sont celles des zones sources proches, à commencer par celle où se trouve le site lui-même (« host zone »), qui vient en tête dans le modèle de chaque expert (voir figure Figure 3.5-28). Si l'on s'intéresse avant tout aux fortes accélérations du sol et aux fréquences élevées, il est indiqué de se concentrer, pour la discussion de l'aléa sismique du site, sur les sources proches, situées à moins de 20 km de distance.

Aux abords immédiats du site de Mühleberg, on ne connaît aucune faille importante que l'on puisse cartographier en surface. Ceci n'a rien d'étonnant puisque d'une part beaucoup de failles de faible ampleur dans le domaine de la molasse n'atteignent pas la surface et que d'autre part les systèmes de failles importants dans le soubassement rocheux et dans les sédiments mésozoïques ne peuvent pas être observés directement. Seules les données de sismique réflexion provenant de l'industrie d'exploration peuvent nous renseigner, mais jusqu'il y a peu elles n'étaient pas accessibles au public. La capacité de représentation de la sismique réflexion dépend de l'état de la technique au moment de l'acquisition des données, mais surtout des propriétés des différentes unités tectoniques qui constituent le sous-sol. Les couches du Mésozoïque, riches en

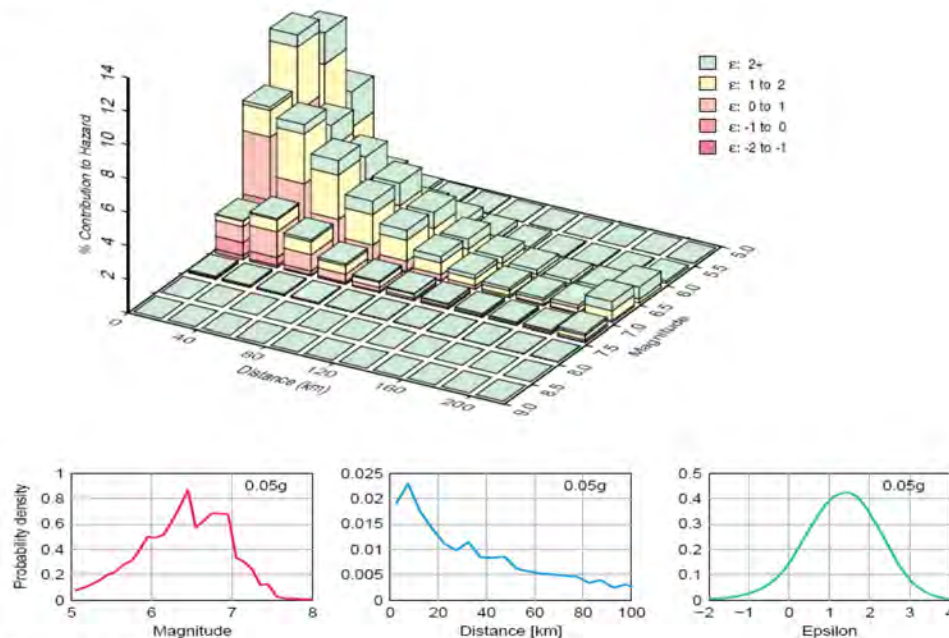
contrastes et uniformes sur de grandes étendues, offrent de meilleures conditions pour cartographier un modèle de fracture que le socle sous-jacent ou les sédiments peu contrastés de la molasse d'eau douce inférieure (voir chapitre 3.5.3.7 et ses figures). En conséquence, on connaît mal les fractures de la molasse. Mais ceci est sans importance pour l'aléa sismique car ces failles peu profondes et peu étendues ne jouent aucun rôle comme foyer de séisme pour l'ingénierie technique.

Du point de vue sismologique, les failles de grande profondeur sont beaucoup plus importantes car des tensions autrement plus conséquentes peuvent s'y développer. Dans les environs éloignés de Mühleberg, on distingue deux systèmes de fractures importants : d'une part des failles pour la plupart non connues dans le soubassement rocheux et d'autre part les fractures du Mésozoïque au-dessus de l'horizon de cisaillement du Trias inférieur, qui se prolongent parfois jusque dans les sédiments molassiques. Dans le passé, ces systèmes de failles ont été analysés à plusieurs reprises à l'aide de données de la sismique réflexion, notamment par Berger & Gundlach (1990), cité dans [70] et par la Nagra. Une nouvelle interprétation de la requérante, qui se base pour la première fois sur l'ensemble des données disponibles de la sismique réflexion, permet désormais de mieux comprendre la structure tectonique de la partie ouest du bassin molassique et d'établir une cartographie détaillée des failles locales et régionales des environs de Mühleberg (voir chapitre 3.5.3.7). Les trois éléments importants pour évaluer l'aléa sismique sont les suivants : le découplage des failles du Mésozoïque par rapport au système de failles du socle, la disposition « en échelons »¹ – en bordure de la structure de Fribourg – de fractures de faible extension et la meilleure compréhension générale de la zone de Fribourg, y compris de ses contours et de ses dimensions.

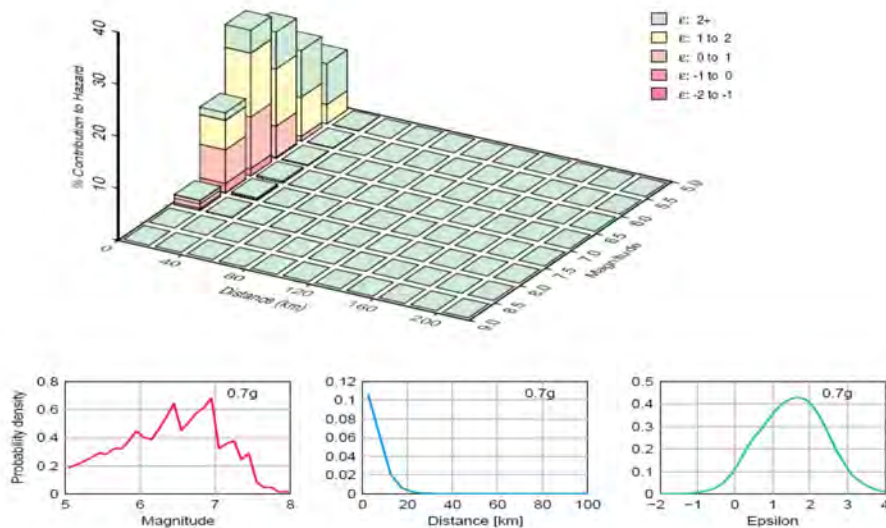
La zone de Fribourg est l'élément structural le plus frappant et le seul connu localement qui pourrait avoir un effet direct sur l'aléa sismique du site. C'est pourquoi son potentiel sismique est traité ci-dessous de manière approfondie.

¹ « En échelons » : éléments de structure parallèles ou subparallèles, étroitement regroupés ou se recouvrant partiellement, par ex. des fractures ou des fissures de distension qui ont un tracé oblique par rapport à la direction générale de la structure.

Figure 3.5-24 : Contributions à l'aléa sismique pour le site de Mühleberg (roche) en fonction de la magnitude, de la distance et de ϵ^1 . En haut pour une amplitude d'accélération horizontale de 0.05 g et une fréquence de 0.5 Hz, en bas pour une amplitude de 0.7 g et une fréquence de 100 Hz (PGA)



Source : SwissNuclear



Source : SwissNuclear

¹ Ecart entre log APE (logarithme de la probabilité annuelle de dépassement) et sa moyenne, exprimé en multiples de son écart-type (σ), en fonction des différents scénarios magnitude/distance.

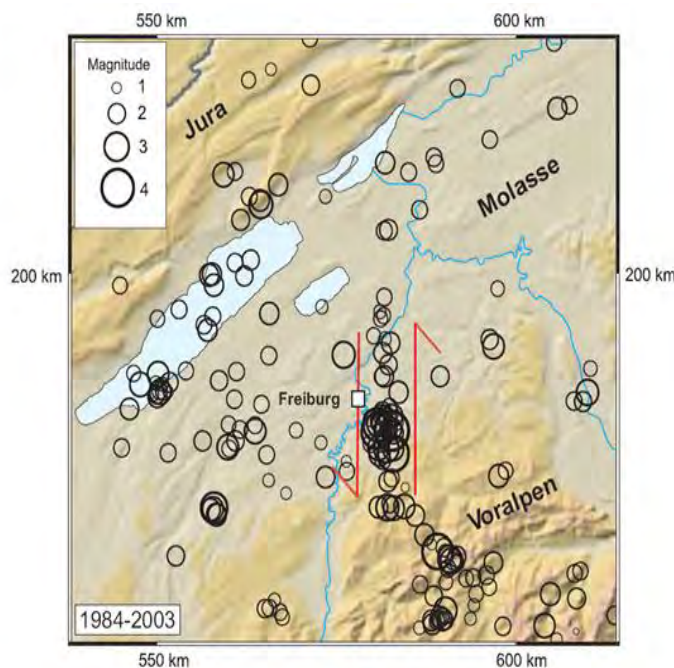
3.5.3.6 Le potentiel d'aléa de la zone de Fribourg (FZ)

Dans ce chapitre, nous décrivons d'abord de quelle manière les experts de PEGASOS ont pris en compte la zone de Fribourg dans leurs modèles de sources et quelles retombées ces différents modèles ont sur l'aléa. Puis nous discuterons des nouvelles connaissances – depuis la fin de l'étude PEGASOS en 2003 – et de leurs répercussions possibles. Dans le dernier chapitre, nous traiterons de la localisation – ou de l'exclusion – de failles aux abords immédiats du site, qui font également partie des nouvelles connaissances, même si ce n'est pas directement lié à la zone de Fribourg.

3.5.3.6.1 La concentration d'activité sismique observée

En étudiant la répartition spatiale de la sismicité dans la partie occidentale du bassin molassique – en soi une région de faible activité sismique – on est frappé par l'accumulation d'épicentres à l'est de la ville de Fribourg. Ces foyers sismiques se concentrent dans une étroite bande qui s'étire vers le nord et se poursuit jusqu'à peu près à la hauteur du lac de Bienne (voir figure Figure 3.5-25). La question de savoir si les séismes du nord ont une relation de causalité avec l'essai de Fribourg proprement dit reste cependant ouverte. La plupart des séismes de Fribourg font partie de trois séries qui avaient été enregistrées en 1987, 1995 et 1999. Leurs magnitudes (ML) sont faibles, quatre séismes ont une ML de 3 et 4 et un seul atteint une ML de 4.3 (correspondant à $M_w = 4.0$). Selon les nouvelles connaissances, les foyers se trouvent à une profondeur moyenne d'env. 2 km. Les mécanismes au foyer indiquent des décrochements (senestres) presque parfaits le long de surfaces de failles orientées +/- NS (voir figure Figure 3.5-18).

Figure 3.5-25 : Carte des épicentres de la partie occidentale du bassin molassique pour les séismes de magnitude $M_w > 1$ pendant la période 1984-2003 (voir [126]). L'alignement des épicentres à l'ouest de Fribourg indique un décrochement senestre actif de direction N-S. Les hypocentres de ces tremblements de terre se trouvent dans le terrain de couverture (voir [22]).



Il est à noter que cette accumulation d'activité sismique peut être mise en relation avec des failles tectoniques connues de direction N-S qui se trouvent en bordure orientale de la structure de Fribourg. Cette corrélation est inhabituelle dans une région présentant une sismicité généralement diffuse, ce qui explique l'intérêt soulevé ces dernières années par la zone de Fribourg.

Avec la faille du Vuache (près d'Annecy en France), la zone de Fribourg fait partie des très rares zones de fracture situées dans le périmètre d'étude de PEGASOS qui répondraient éventuellement aux critères d'une « active fault ». Si l'on tient compte exclusivement des séismes historiques (données macrosismiques) de la période allant d'env. 1000 apr. J.-C. à 1975 (début des observations instrumentales systématiques), la zone de Fribourg n'apparaît pas comme une région active du point de vue sismique (voir figure Figure 3.5-40). On peut en conclure qu'au cours du dernier millénaire, aucun tremblement de terre destructeur lié à la structure de Fribourg n'a eu lieu.

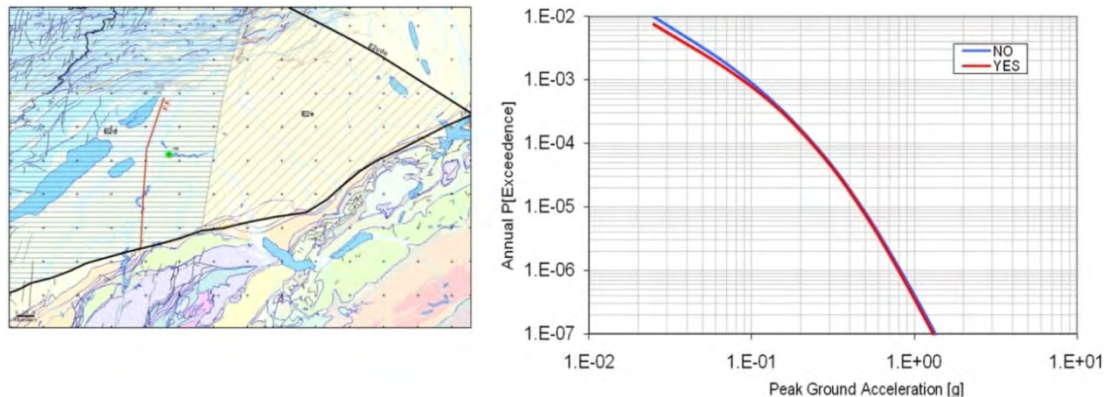
Dans la discussion de l'évaluation présentée par les experts de PEGASOS, on ne tranchera tout d'abord pas la question de savoir si la zone de Fribourg représente une seule faille de grande extension ou un système de failles, c'est-à-dire un dispositif de petites failles non directement liées les unes aux autres. L'abréviation FZ recouvre les deux hypothèses.

3.5.3.6.2 Evaluation de la zone de Fribourg (FZ) par les experts de PEGASOS

Dans leurs modèles, les quatre groupes d'experts ont pris en compte la FZ de différentes manières. La plupart d'entre eux ont choisi de prendre uniquement les zones sources comme éléments de leurs modèles, adoptant ainsi l'hypothèse d'une répartition de sismicité diffuse dans l'espace et instationnaire dans le temps, également dans la région située au sud du site de Mühleberg. Au sein d'une zone source, les foyers de séisme sont liés à des failles actives (« active faults ») le long desquelles peuvent se déclencher des tremblements de terre en raison des tensions tectoniques accumulées. Les experts avaient donc en principe la possibilité de considérer un élément tectonique tel que la FZ simplement comme l'activation d'une « active fault » dans une zone source, ou alors ils pouvaient la modéliser explicitement comme une source linéique ayant des propriétés spécifiques et distinctes de la zone source de l'arrière-plan. Seul un des quatre groupes d'experts a choisi la deuxième solution.

Dans une variante, le groupe d'experts EG1a a considéré la FZ comme source linéique ou faille-source (FF, voir figure Figure 3.5-26) au sein de la vaste zone de l'avant-pays alpin E2cde (combinaison des zones E2c, E2d et E2e). Cette alternative a une pondération de 0.35. Dans toutes les autres variantes (qui ont ensemble une pondération de 0.65), la FZ, qui n'est pas explicitement délimitée, se situe dans une zone source (par ex. dans la variante présentée à la figure Figure 3.5-20).

Figure 3.5-26 : *A gauche* : Détail des scénarios de zonage des sources établis par le groupe d'experts EG1a dans le cas « PC troughs not reactivated » ; FF représente la faille-source de Fribourg. *A droite* : aléa moyen (mean hazard, PGA) dans la région du site de Mühleberg, alternativement avec et sans la prise en compte explicite de la zone de Fribourg comme source linéique (« yes » resp. « no »).

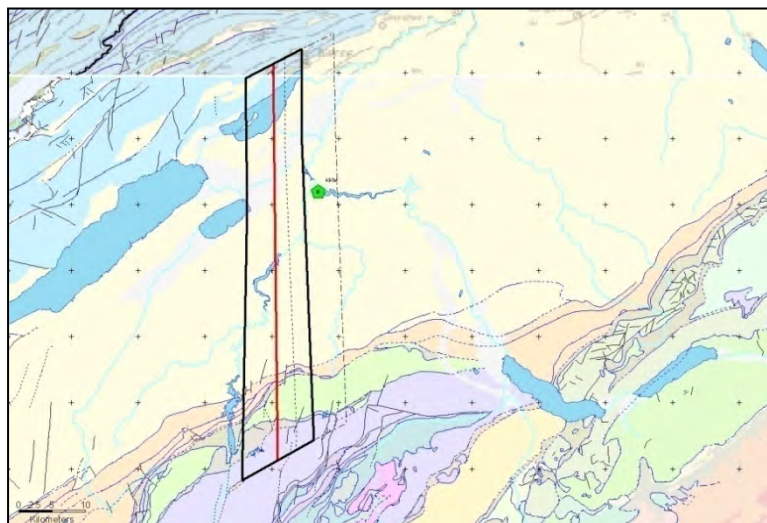


Il est intéressant de se demander comment les alternatives se répercutent sur l'aléa sismique dans la région du site. Pour l'analyse de sensibilité, le modèle d'ensemble des sources est divisé en branches (d'un arbre logique) avec ou sans prise en compte explicite de la FZ. Un calcul séparé de l'aléa sismique sur la base de ces deux alternatives fait alors apparaître les différents effets. Les résultats (voir figure Figure 3.5-26 à droite) montrent que dans la zone de probabilité critique de 10⁻⁴-10⁻⁶, on ne discerne guère de différence quant aux accélérations pronostiquées. Dans ce cas, l'aléa moyen n'est donc pas différent, que la FZ soit modélisée comme une faille-source séparée ou qu'elle soit englobée implicitement dans une zone source.

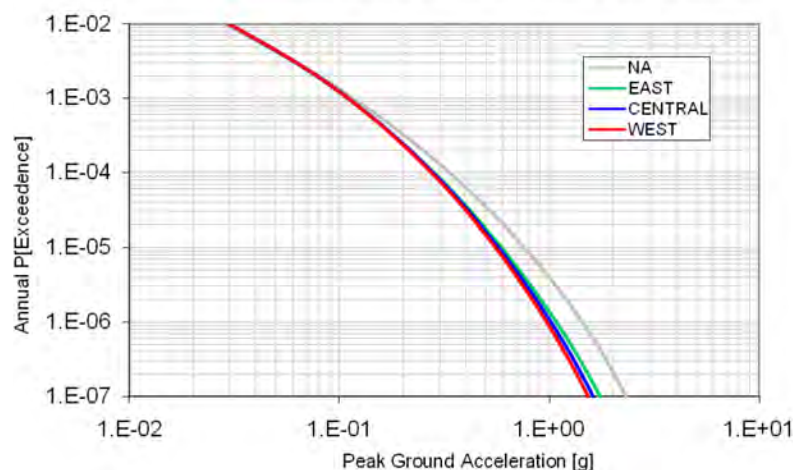
Le groupe d'experts EG1b a choisi une méthode un peu différente. Ce groupe a, lui aussi, décidé de tenir compte explicitement de la FZ, mais a choisi pour cela une zone source étroite de direction N-S, spécifiquement délimitée (AE07, voir figure Figure 3.5-27). La géométrie de cette source suit le modèle de sismicité, à savoir l'alignement des épicentres correspondant à la figure Figure 3.5-25. On définit ainsi la trace d'un décrochement senestre supposé, orienté N-S (trait rouge sur la figure Figure 3.5-27), mais qui peut se produire avec la même probabilité dans toute la source, puisque celle-ci est considérée comme une zone source.

Figure 3.5-27 : *En haut* : Modélisation de la zone de Fribourg par le groupe d'experts EG1b. L'étroite zone source AE07 est déterminée par une faille supposée au centre. Pour la limite orientale, on admet trois positions alternatives avec des pondérations de 0.25, 0.5 et 0.25. L'emplacement du site de l'EKKM est signalé en vert.

En bas : Aléa moyen (mean hazard, PGA) dans la région du site de Mühleberg, dépendant de l'emplacement de la limite orientale de la zone source. La courbe grise (NA) représente la contribution des branches de l'arbre logique sans modélisation explicite de la zone de Fribourg.

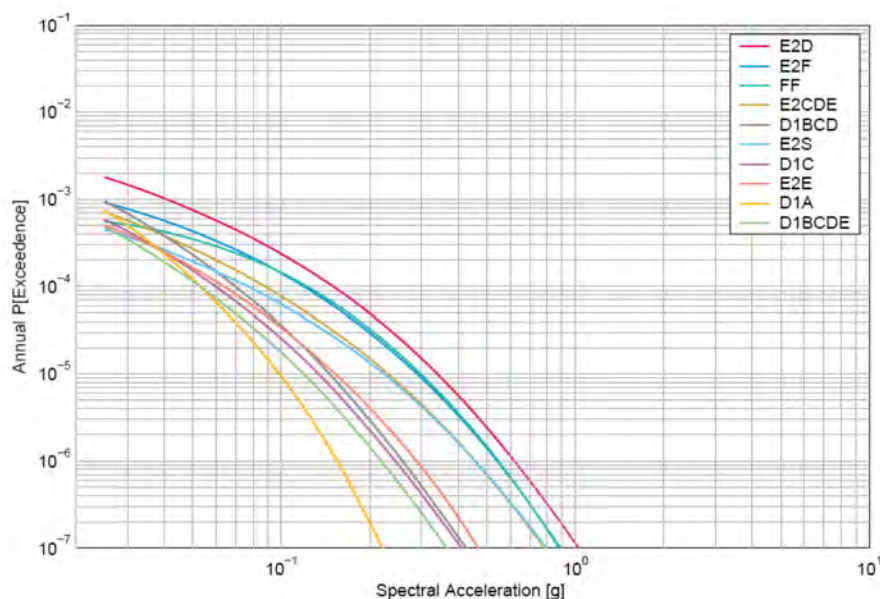


Sensitivity to EG1b's FRIB_BDRIES - PGA - Mühleberg



La zone a une largeur d'env. 8.3 km ; sa limite orientale est modélisée de façon « souple » pour tenir compte de l'incertitude quant à l'emplacement des épicentres. On y parvient en fixant une position centrale de la limite orientale, avec une pondération de 0.5, et deux positions alternatives avec chacune une pondération de 0.25. L'une se trouve à 2.5 km à l'ouest (c'est-à-dire en direction de l'intérieur de la structure de Fribourg) et l'autre à 5 km à l'est de la ligne centrale (donc déplacée vers l'extérieur). Selon la figure 28 de l'« elicitation summary » de PEGASOS ([127]), la région du site se trouve encore juste au-delà de la limite orientale extrême de la zone. Il est vrai qu'un positionnement plus précis à l'aide des coordonnées des sources ne confirme pas cela : Comme le montre la figure Figure 3.5-27, le site de l'EKKM se trouve en deçà de cette limite. Cependant, des calculs de sensibilité montrent que la position de la limite orientale de la FZ ne joue qu'un rôle très secondaire (voir figure Figure 3.5-27, en bas), même dans le cas extrême où le site de l'EKKM se trouve à l'intérieur de la zone source.

Figure 3.5-28 : Les dix principales contributions des diverses sources à la valeur moyenne de l'aléa dans la région du site de Mühleberg selon le modèle du groupe d'experts EG1a. (composantes horizontales, surface, roche, PGA). La faille-source FF (Fribourg Fault) ne fournit pas une contribution dominante.



Source : SwissNuclear

Qu'elle soit classée ou non parmi les failles actives et quelle que soit la manière dont elle est considérée dans les modèles des quatre groupes d'experts, la zone de Fribourg n'exerce donc pas une influence dominante sur l'aléa sismique de la région du site. Cette affirmation vaut pour l'évaluation des experts basée sur l'état des savoirs en 2003. Depuis lors, de nouvelles connaissances sur la FZ ont été apportées et l'on peut se demander si et comment elles modifient l'évaluation des experts susmentionnée.

3.5.3.7 Nouvelles connaissances sur la zone de Fribourg après PEGASOS

3.5.3.7.1 Répartition des profondeurs de foyer et nouveau concept de structure géologique

Ce sont principalement deux découvertes qui ont modifié la représentation de la FZ depuis 2003 : d'une part une nouvelle répartition des profondeurs de foyer et d'autre part un nouveau modèle conceptuel de la tectonique et des structures qui en résultent dans le bassin molassique.

Une nouvelle interprétation des profondeurs de foyer de l'essai de Fribourg (voir Figure 3.5-25), résultant d'une nouvelle approche méthodologique du Service sismologique suisse (SED), a indiqué des profondeurs de foyer plus faibles que ce qui avait été admis précédemment. Alors qu'au moment où PEGASOS avait procédé à la caractérisation des sources, on admettait encore que la distribution des profondeurs de foyer se situait pour l'essentiel à env. 7 km, la nouvelle interprétation a donné une profondeur moyenne de 2 km seulement. Les foyers se trouveraient ainsi clairement dans les sédiments tertiaires et mésozoïques, qui atteignent une épaisseur d'env. 3.5 km dans cette région. Le déplacement des profondeurs de foyer a été l'occasion de repenser aussi le concept du modèle géologique et structural.

Les idées actuelles sur la tectonique et la structure de la partie occidentale du bassin molassique ([68]) sont décrites au chapitre 3.5.1.2. Certaines conclusions tirées de ce nouveau modèle sont importantes pour l'évaluation du potentiel sismogène de la FZ. Si les surfaces de failles restent limitées aux sédiments et si la FZ, à savoir la partie sismiquement active de la structure de Fribourg (voir Figure 3.5-25), est une suite de petites failles « en échelons », non directement liées les unes aux autres, de direction NNE-SSO, il en résulte pour la FZ des magnitudes « maximales envisageables » plus faibles. Il existe un rapport empirique avéré (voir par ex. [65] et [69]), entre les dimensions de la surface de fracture (qui atteint au maximum la grandeur de la surface de faille) et la magnitude. Il est donc possible d'évaluer de manière fiable, pour les plus grandes surfaces de failles envisageables, les magnitudes maximales d'un séisme le long de ces failles¹.

Kastrup et al. [22] ont utilisé cette méthode. S'appuyant sur une interprétation de données de sismique réflexion de Berger & Gundlach 1990 (BuG 1990), ils ont posé comme base une seule faille de direction N-S, atteignant 30 km de long, et sont arrivés à la conclusion que dans ces conditions, un séisme de magnitude (M_w) 6.0 ne devrait pas être exclu dans la FZ. Mais ils ont indiqué en même temps que l'on ne pouvait pas prouver l'existence d'un rapport direct entre les séismes de l'essai de Fribourg proprement dit et les épicentres situés plus au nord (voir Figure 3.5-25).

¹ Pour déterminer le plus fort séisme que la FZ pourrait déclencher, on doit avoir recours à des relations théoriques qui mettent en rapport les paramètres importants des foyers (voir par ex. [22], [22] et [69] qui ont déjà utilisé un tel rapport pour les tremblements de terre de l'essai de Fribourg) :

$M_w = 2 \log L + 0.67 \log \Delta\sigma - 1.33 \log a - 0.67 \log C - 6$ (1) où M_w est la magnitude du moment, L la longueur de la fracture, $\Delta\sigma$ la chute de contrainte statique (stress drop), a le rapport longueur/largeur de la fracture et C une constante sans dimension. Le rapport longueur/largeur d'une fracture (son « aspect ratio ») est lui-même dépendant de la magnitude et peut être déduit des régressions de [65] pour la longueur de fracture L et la largeur W : $\log a = -0.81 + 0.17 M_w$ (2) Si l'on pose $a = L / W$, il résulte de (1) et (2) un nouveau rapport, qui ne représente la magnitude du moment maximale que comme fonction de la largeur de la fracture W , du stress-drop $\Delta\sigma$ et de la constante C : $M_w = 2.256 \log W + 0.752 \log (\Delta\sigma/C) - 7.376$ (3)

La nouvelle interprétation des lignes de sismique réflexion de l'industrie pétrolière a montré entretemps qu'il n'y a pas de lien entre d'une part la faille que l'on peut cartographier jusqu'à env. 6 km au sud-ouest de Mühleberg et qui fait partie de la structure de Fribourg et d'autre part le chevauchement à vergence ouest (« structure de Hermrigen ») qui se trouve à env. 4 km au nord de Mühleberg. On ne peut dès lors plus défendre l'idée d'une faille traversante de 30 km de long (voir chapitre 3.5.3.7.2).

Pour évaluer le plus fort séisme qui pourrait être déclenché dans la FZ, il faut donc déterminer la profondeur de la fracture et, s'il s'agit d'un décrochement, sa largeur. D'après [65], la magnitude M_w pour un séisme strike-slip atteint une valeur d'env. 4.8 pour une largeur de fracture de 3.3 km correspondant à l'épaisseur des sédiments. Ce chiffre est beaucoup moins élevé que les valeurs M_{max} établies pour la FZ par les experts de PEGASOS et se trouve au-dessous de la limite de ce que l'on considère généralement comme « significatif pour l'ingénierie des séismes »¹. Il y a donc une forte probabilité pour que la limitation des profondeurs pour les surfaces de fracture de la FZ conduise à un abaissement des magnitudes maximales (M_{max}) des sources et, du même coup, à la réduction de l'aléa sur le site.

Si l'on supprime la limitation des profondeurs, de très nombreuses surfaces de fractures avec potentiel de magnitude élevée sont bien entendu envisageables sur le site, comme partout ailleurs. La force de ces séismes est limitée par les répartitions des M_{max} de la zone hôte de Mühleberg (selon PEGASOS) ou par les répartitions M_{max} de zones sources de la FZ délimitées spécifiquement. Ces répartitions atteignent des valeurs maximales de $M_w = 8.0$ (avec une pondération inférieure à 1%) et des valeurs médianes de 6.1. Les scénarios de séismes présentant ces magnitudes – qu'ils soient liés ou non à la FZ – sont déjà inclus (avec leurs accélérations spécifiques modélisées) dans les résultats de l'aléa du site (voir chapitres 3.5.3.2.2 et 3.5.3.2.3).

Lors du premier atelier du projet PRP (voir chapitre 3.5.3.4) en septembre 2008, les nouvelles connaissances relatives à la zone de Fribourg ont été présentées aux groupes d'experts chargés de la caractérisation des sources. Conformément aux règles du SSHAC, on a demandé aux experts s'ils souhaitaient reconsidérer leur évaluation de la FZ sur la base des nouveaux résultats et, le cas échéant, réviser les caractéristiques liées à la FZ qu'ils avaient introduites dans leurs modèles de sources. Après en avoir discuté de façon approfondie, ils ont répondu par la négative : aucun des experts n'a exigé une nouvelle évaluation de la FZ, ni de nouvelles vérifications. La zone source la plus touchée par les nouvelles localisations (source « AE07 » dans le modèle EG1b) a cependant été analysée. Si l'on fait abstraction des chocs précurseurs et des répliques, la profondeur moyenne dans cette source passe de 11.1 km dans le modèle de PEGASOS (avec un écart-type de 6.1 km) à 10.5 km dans le nouveau calcul (avec un écart-type de 6.7 km). Dans les modèles des autres groupes d'experts, qui contiennent des sources plus grandes, plus régionales, la différence est encore plus faible. Cette analyse confirme ainsi l'évaluation faite par les experts, à savoir que la nouvelle détermination des profondeurs de foyer de la zone de Fribourg n'a que très peu d'effet.

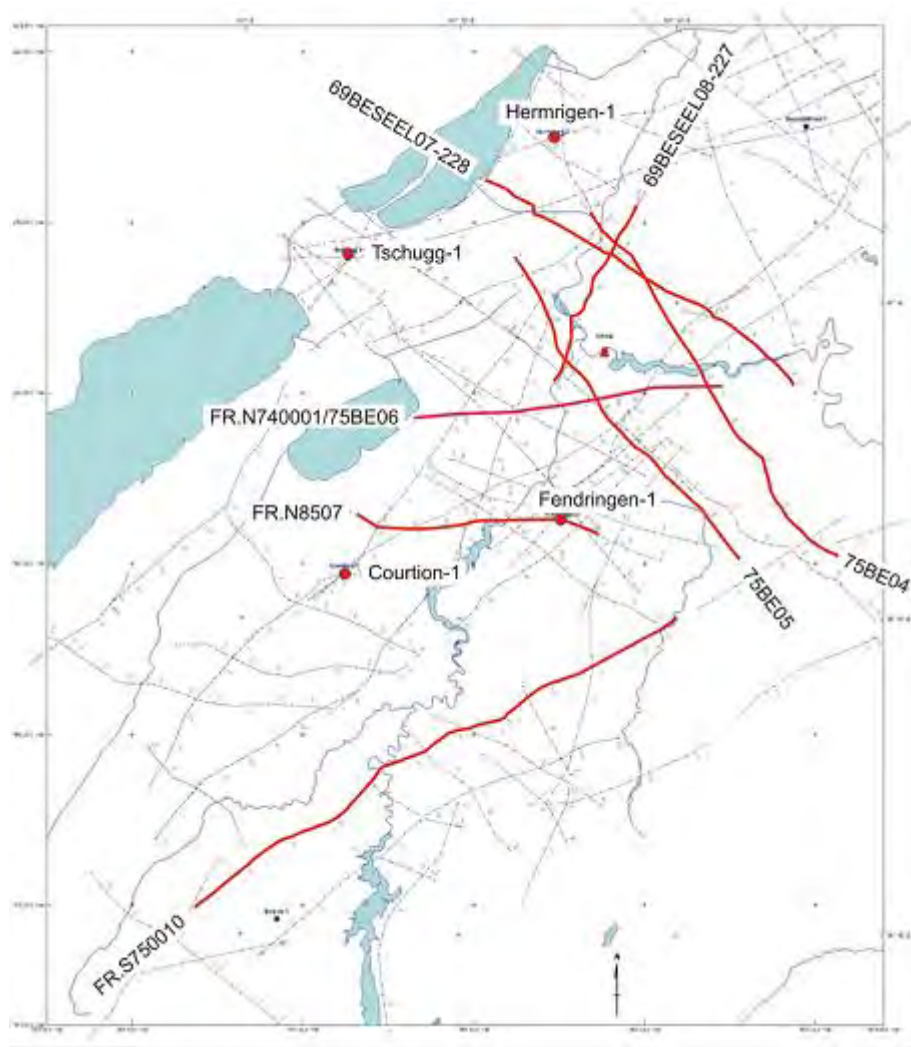
¹ Aux Etats-Unis, la limite inférieure admise pour un séisme avec potentiel de dommages (« of engineering relevance ») est une magnitude (M_w) de 5.0. Cette valeur a aussi été utilisée dans l'étude de l'aléa sismique de PEGASOS. Dans le projet Refinement de PEGASOS (PRP), il est prévu de faire calculer une série de résultats d'aléa avec une « lower bound magnitude » de 4.5, dans le but d'établir des comparaisons.

3.5.3.7.2 Nouvelle interprétation des données de la sismique réflexion

Comme il n'est pas possible de cartographier la FZ en surface, son contour et son étendue sont restés longtemps difficiles à connaître avec précision. Pour la localiser, on peut en principe s'appuyer soit sur les épicentres des essais de Fribourg eux-mêmes, soit sur le réseau des lignes de sismique réflexion établies par l'industrie d'exploration. En raison de l'absence de localisations, la délimitation à l'aide des épicentres est moins précise que la cartographie basée sur les données de la sismique réflexion. A l'époque du projet PEGASOS (2001), on connaissait deux interprétations – basées sur les données de la sismique réflexion – de la partie occidentale du bassin molassique : celle de la Nagra et celle de BuG 1990, mentionnée ci-dessus. Toutes deux sont citées dans [22]. Selon BuG1990, la bordure orientale de la FZ passe à env. 5.5 km à l'ouest de la région du site (voir Figure 3.5-33). Une appréciation des interprétations était alors impossible puisque ni les données de base, ni les documents de l'interprétation n'étaient disponibles.

Pour compléter la base de données permettant d'évaluer le site, la requérante a alors acquis les droits sur 444 km de données sismiques de l'industrie d'exploration, qui n'avaient pas encore été publiées. Cet ensemble de données comprend tout le réseau existant de lignes de sismique réflexion aux environs de l'EKKM, resp. de la FZ (voir Figure 3.5-29). Les dates d'établissement des lignes sont certes un peu anciennes (1969-1985), mais la qualité de la figure est suffisante pour une analyse structurale détaillée.

Figure 3.5-29 : Plan de situation des lignes de sismique réflexion dans la région étudiée. Toutes les lignes ont été incluses dans l'étude d'interprétation décrite dans ce paragraphe. Les lignes rouges correspondent aux exemples présentés dans ce paragraphe.



L'interprétation complète et fermée sur elle-même des données [122] permet pour la première fois de localiser précisément les systèmes de failles de direction N-S qui pourraient être liés à la FZ ou en être l'expression, y compris aux abords immédiats du site. Les résultats de cette nouvelle étude d'interprétation seront traités ci-dessous. Notons cependant que la sismique réflexion ne peut être évaluée avec précision que dans le Mésozoïque ; dans le socle et dans le Tertiaire, il existe bien des failles (voir par exemple [64]), mais l'ancienne sismique réflexion ne les reproduit que médiocrement. L'approche de la nouvelle interprétation est cependant suffisante pour donner une idée claire de l'extension de la zone de Fribourg.

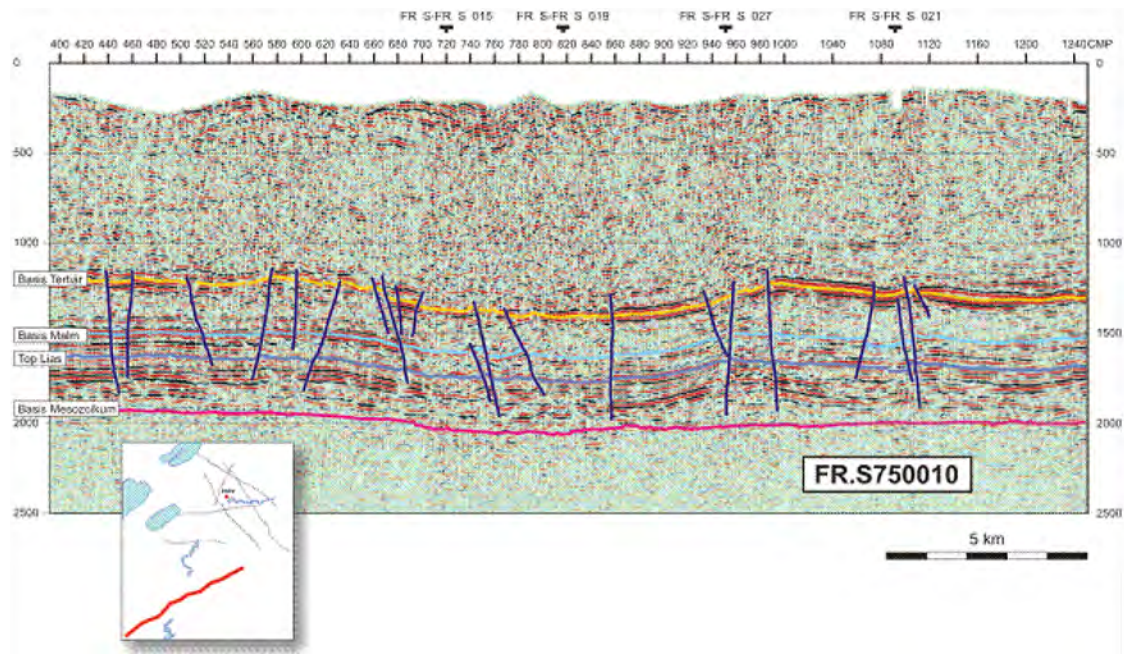
Pour étudier la nouvelle interprétation, on a choisi et cartographié quatre niveaux de repère sismiques (horizons marqueurs) :

- Base du Tertiaire (ocre)
- Base du Malm (bleu clair)
- Sommet du Lias (violet)
- Base du Mésozoïque (rouge).

Ces horizons sont signalés par des couleurs différentes dans les sections présentées (voir Figure 3.5-30 et Figure 3.5-37). Il est à noter que sur l'axe vertical, ce n'est pas la profondeur qui est indiquée, mais la durée de la réflexion (temps de trajet aller-retour, « two-way-traveltime », TWT). A la fin de l'interprétation, les cartes de temps ont été converties en cartes de profondeurs à l'aide de modèles spécifiques de vitesse d'intervalles à l'horizontale. Il est possible d'obtenir ainsi une précision de l'ordre de +/- 50 m.

Au niveau de la couverture sédimentaire mésozoïque, la structure de Fribourg apparaît généralement comme un synclinal orienté N-S, accompagné à l'est et à l'ouest par des zones de failles plus ou moins marquées, de direction principalement N-S également. Cette structure est interprétée essentiellement comme l'expression d'une tectonique de cisaillement et spécifique aux évaporites. Du côté oriental surtout, le synclinal est accompagné d'une structure qui ressemble à un anticlinal et qui a été formée par un bombement des évaporites. Les zones de failles latérales reposent sur ces bombements en forme de coussins et se terminent généralement au niveau du Trias moyen.

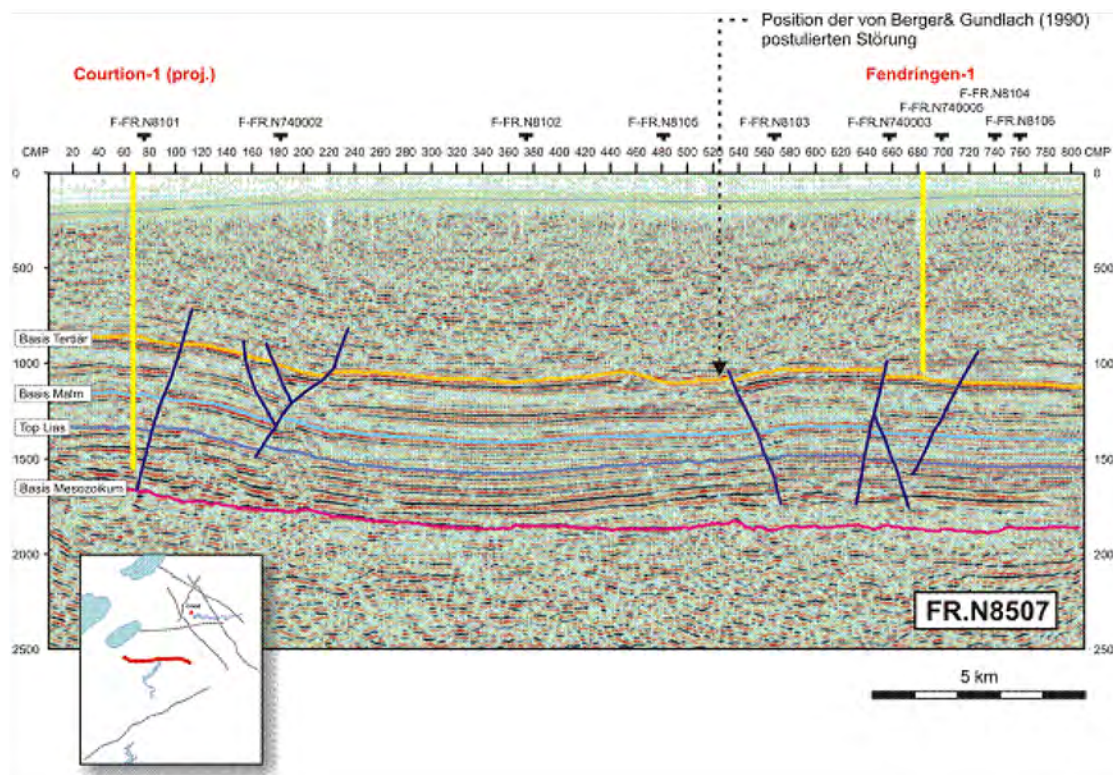
Figure 3.5-30 : La structure de Fribourg sur une ligne sismique représentative à env. 5 km au SE de Fribourg. La section montre les horizons stratigraphiques de référence cartographiés : base du Tertiaire, base du Malm, sommet du Lias et base du Mésozoïque. Du côté oriental du synclinal de Fribourg, la série de couches mésozoïques est bombée par un coussin d'évaporites du Trias moyen. (source : [122])



Dans la région de la ville de Fribourg, la FZ est marquée par la « structure de Fendringen » qui forme sa limite orientale (voir aussi Figure 3.5-31). Celle-ci est limitée à l'ouest par une faille à vergence est et à l'est par une faille à vergence ouest. Cette structure est interprétée comme une zone de transpression (senestre). La disposition des failles ressemble à une structure en fleur (« flower structure »), mais qui reste limitée aux sédiments mésozoïques. Les structures en fleur se forment à partir de failles présentant des déplacements aussi bien horizontaux que verticaux. La plus grande déformation verticale visible le long de la limite ouest se trouve directement au sud de la section FR.N8507 (Figure 3.5-31 et Figure 3.5-39).

Figure 3.5-31 : Section sismique au nord de la ville de Fribourg, entre les forages de Fendringen-1 et Courtion-1 (correspond au « profil B-B » de l'interprétation de BuG1990).

(source : [122])



Au nord de la ville de Fribourg (voir Figure 3.5-31), la limite ouest de la structure de Fendringen apparaît plus nettement comme pouvant être une faille normale réactivée par compression. Au niveau de la base du Tertiaire, ce sont encore les caractéristiques de failles normales qui prédominent, alors qu'aux niveaux de référence plus profonds, on trouve des failles inverses plus nettement dessinées, mais qui s'atténuent en direction du nord à tous les niveaux sismiques cartographiés (voir Figure 3.5-39, carte des isohypses de la base du Tertiaire).

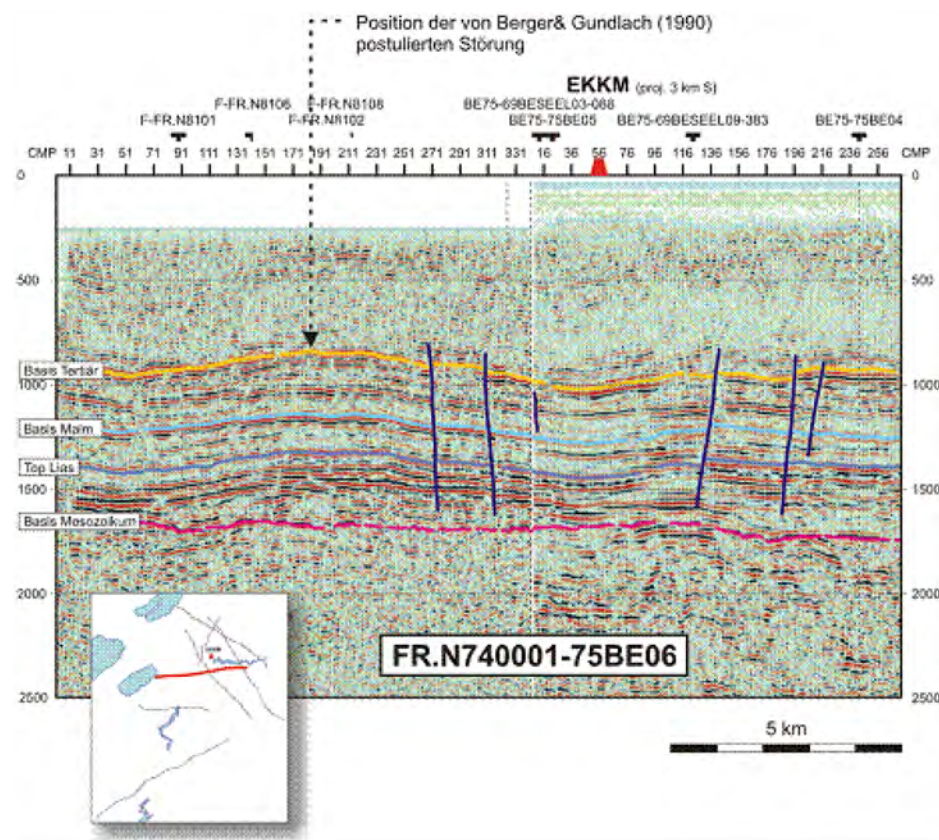
Dans le profil O-E juste au sud du site de l'EKKM (voir Figure 3.5-32), on n'observe plus les fractures du prolongement septentrional, qui auraient pu être considérées comme la limite orientale de la FZ. On remarque toujours un bombement en forme de coussin des évaporites du Trias, qui est cependant déplacé en direction de l'ouest. Il semble correspondre à un prolongement septentrional de la structure de Hermrigen. La faille postulée d'après BuG1990, à env. 5.5 km à l'ouest du site, n'est pas visible. On peut donc exclure son existence dans ce secteur (voir Figure 3.5-39).

Les autres failles situées au sud du site de l'EKKM (voir Figure 3.5-32) ne peuvent pas être clairement corrélées avec des failles qui se trouvent sur des lignes sismiques voisines et présentent de ce fait une faible extension latérale. C'est la raison pour laquelle elles ne sont représentées, sur les cartes structurales, que par des symboles de fractures perpendiculaires aux lignes (voir Figure 3.5-39 et Figure 3.5-40). Ces fractures présentent pour la plupart des caractéristiques de failles normales et pourraient donc avoir un tracé N-S à (S)SO-(N)NE ou une

orientation (O)SO-(E)NE. Cette dernière serait à attribuer à la tectonique de l'Oligocène du bassin molassique de l'avant-pays.

Au sud de la ligne FR.S750010 (voir Figure 3.5-30), la limite orientale de la FZ se divise en segments de fractures isolés (formations « en échelons ») présentant des caractéristiques de failles inverses, alors que les parties supérieures des coussins d'évaporites sont aussi déplacées latéralement et se détachent les unes des autres.

Figure 3.5-32 : Section sismique (regroupée) de direction E-W à env. 3 km au sud du site de l'EKKM. Dans cette section, la faille « régionale » figurée selon BuG1990 à env. 5.5 km à l'ouest du site n'est plus visible (voir Figure 3.5-33). On peut exclure qu'un lien existe entre le chevauchement à vergence est au nord (voir Figure 3.5-34) et la faille normale réactivée par compression au sud (Figure 3.5-31), notamment parce que la nature et le sens du déplacement des failles sont complètement différents. Les failles locales figurées à l'est et à l'ouest du site sont insignifiantes. Elles ne peuvent pas être corrélées sur plusieurs lignes et n'apparaissent ainsi que comme symboles dans les cartes des horizons sismiques (voir Figure 3.5-39). Aucune faille ni autre complication n'est repérable sous le site. (source : [122])



Il est possible que les structures situées à l'est et à l'ouest du site de l'EKKM doivent aussi être attribuées à la tectonique de cisaillement mentionnée ci-dessus (voir Figure 3.5-40), tout en sachant que la faille située à l'ouest et orientée O-E pourrait avoir connu une réactivation, comme faille transversale de la « structure de Hermrigen », durant la phase de plissement et de chevauchement du Jura.

Au nord-ouest, resp. au nord du site de l'EKKM (voir Figure 3.5-36 et Figure 3.5-34), se développe la « structure de Hermrigen », qui présente d'abord une orientation N-S avec faille inverse à vergence ouest. Vers le nord, la structure prend une direction SO-NE, là où la structure anticlinale de Hermrigen est la plus développée (voir Figure 3.5-39). Il s'agit ici de rampes frontales (orientées NE-SO), resp. latérales (orientées N-S), qui n'ont rien à voir avec la structure de Fribourg au sud.

Figure 3.5-33 : Interprétation des données de sismique réflexion de la partie occidentale du bassin molassique par BuG1990. La figure du bas est un extrait de la carte des lignes de profondeur au niveau du sommet du Jurassique (env. base du Tertiaire). Elle montre les intersections entre les sections sismiques et la faille N-S postulée selon BuG1990 à env. 6 km à l'ouest de l'EKKM. L'emplacement de la faille sur les sections sismiques est à chaque fois indiqué par un numéro CMP (Common-Mid-Point).

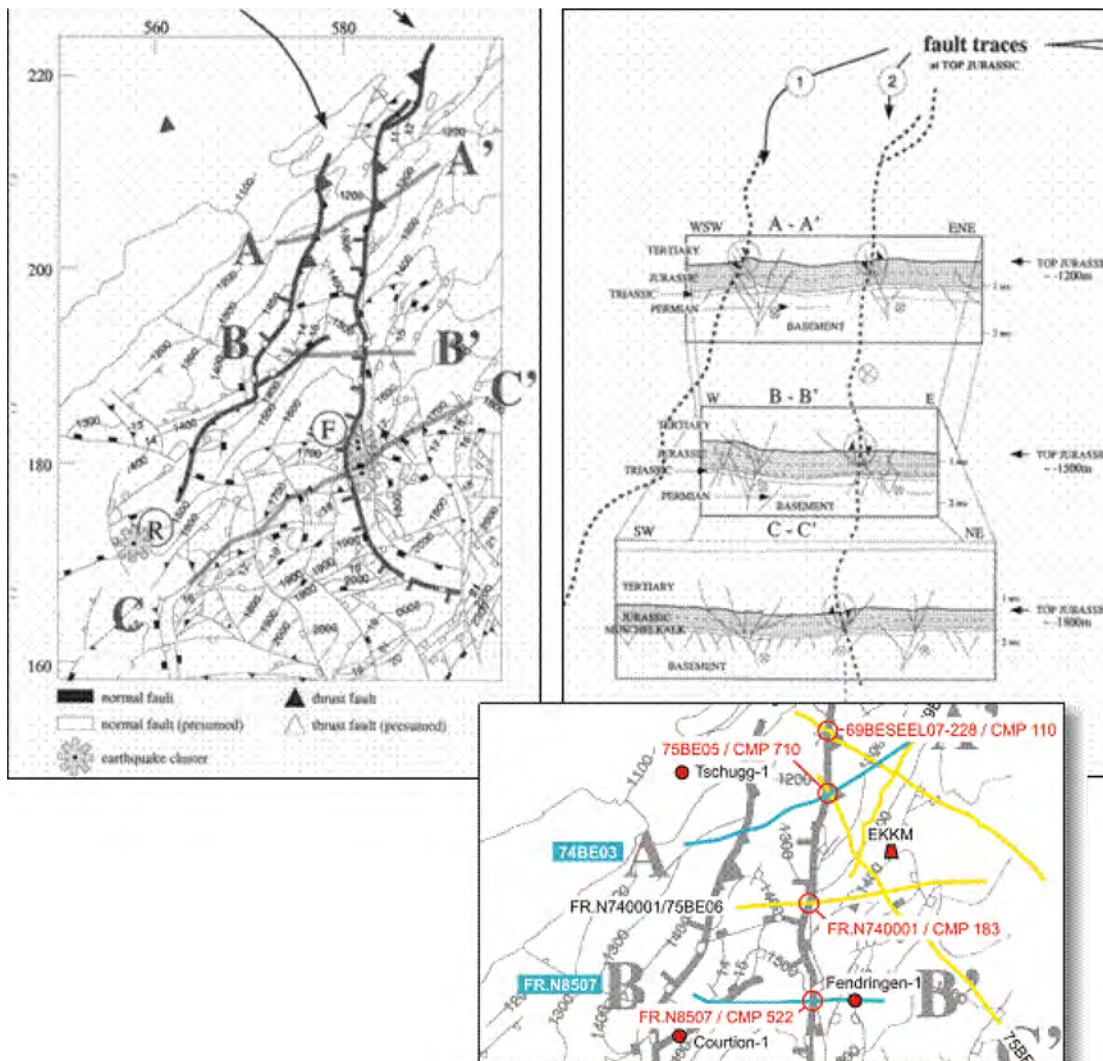


Figure 3.5-34 : Section à env. 5 km au nord-est du site de l'EKKM. La faille « régionale » selon BuG1990 est représentée ici comme faille inverse à vergence ouest.(source : [122])

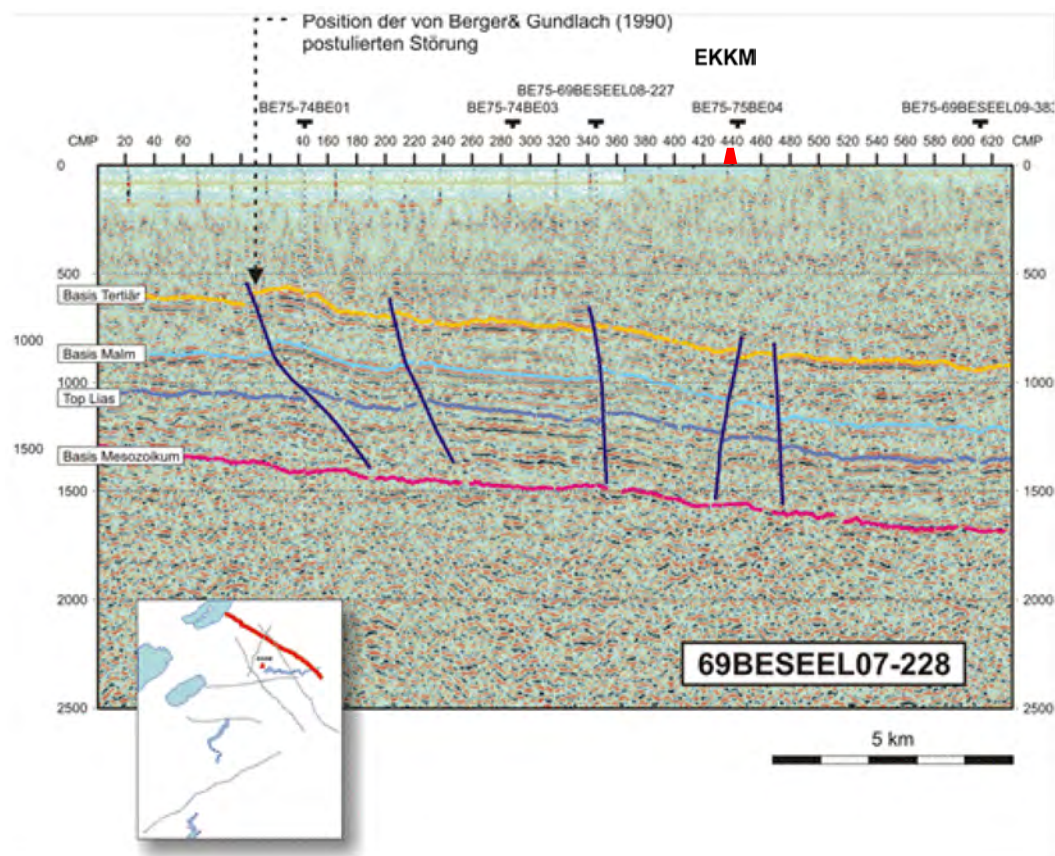


Figure 3.5-35 : Section sismique orientée NO-SE à env. 5 km au nord-est du site de l'EKKM
(source : [122])

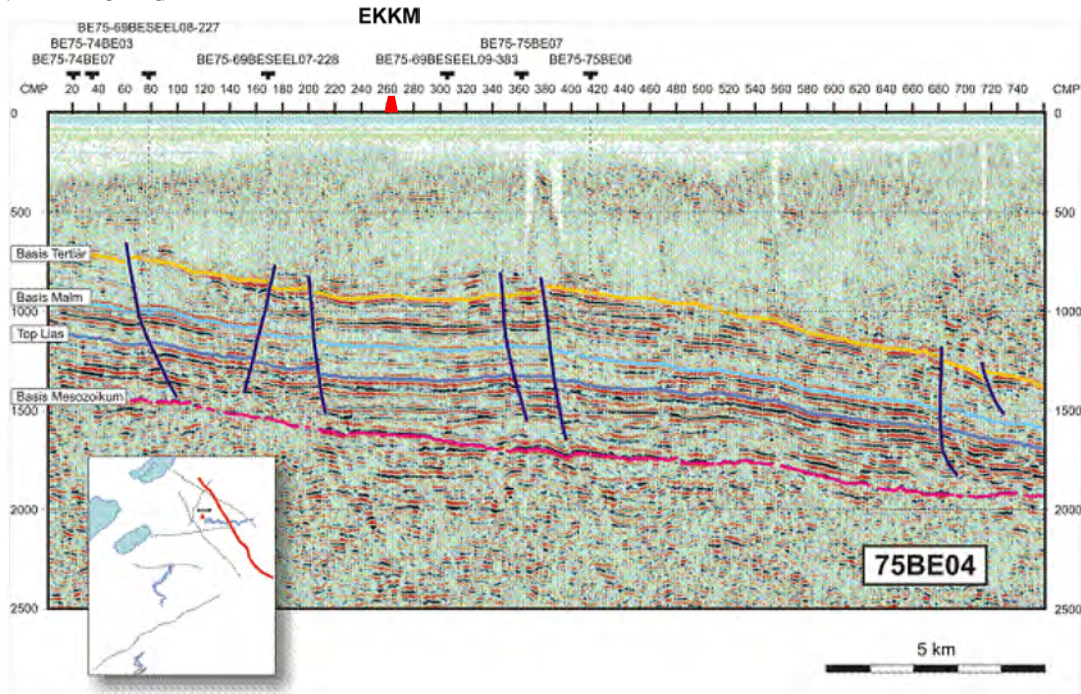


Figure 3.5-36 : Section sismique orientée SO-NE à env. 2 km au sud-ouest du site de l'EKKM
(source : [122])

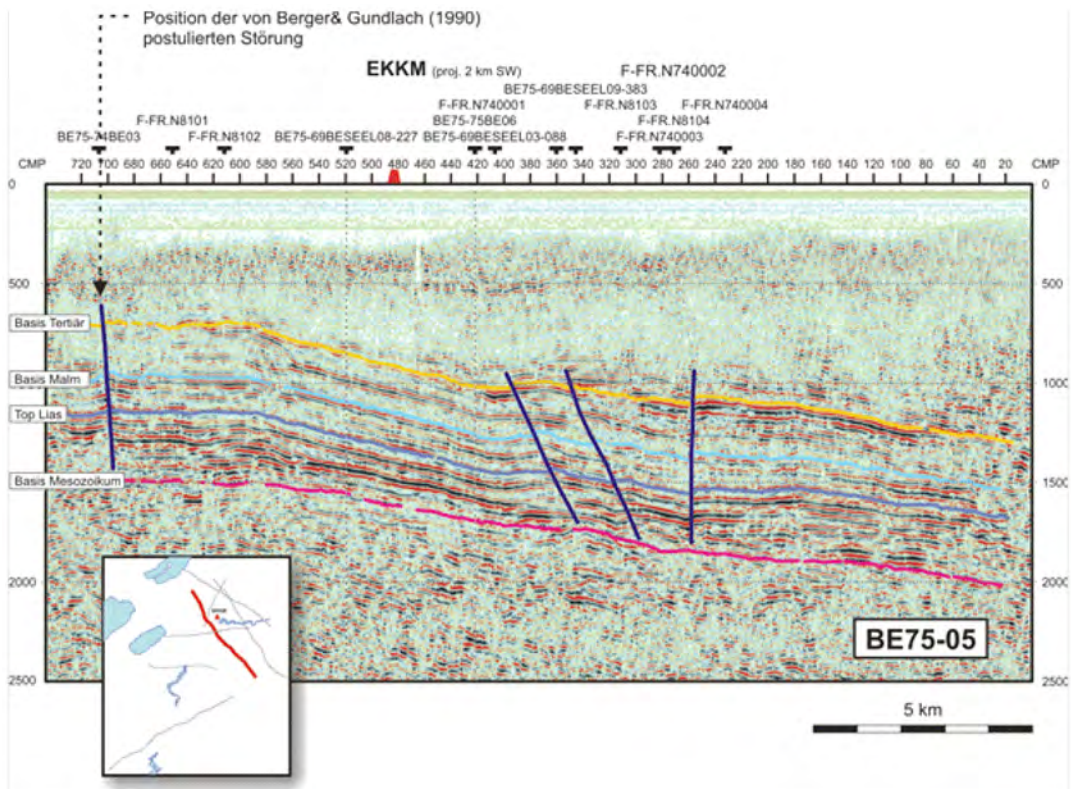
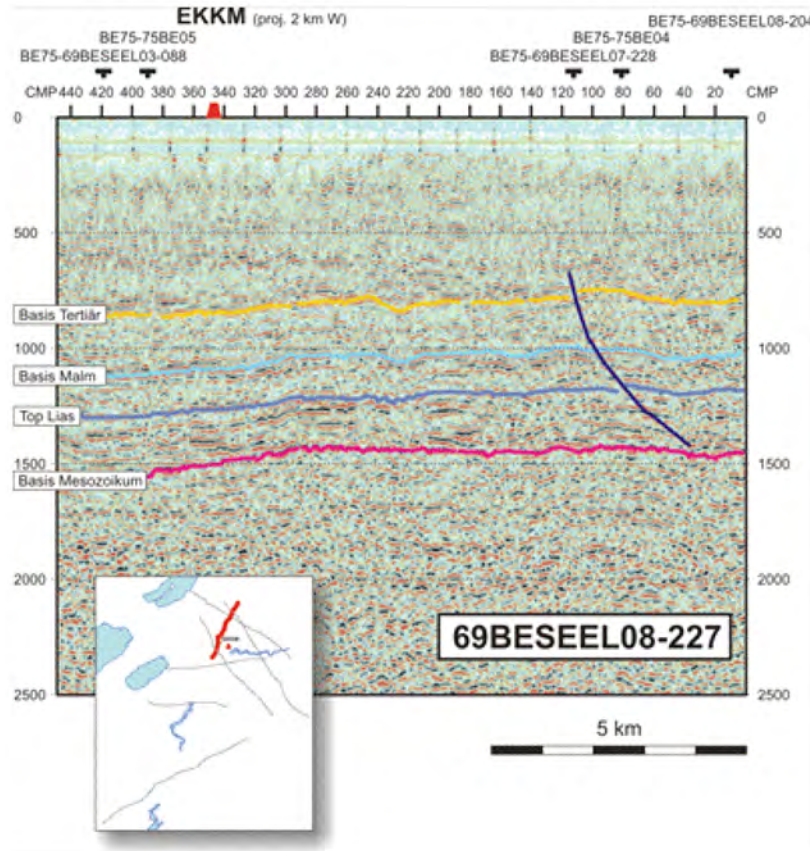
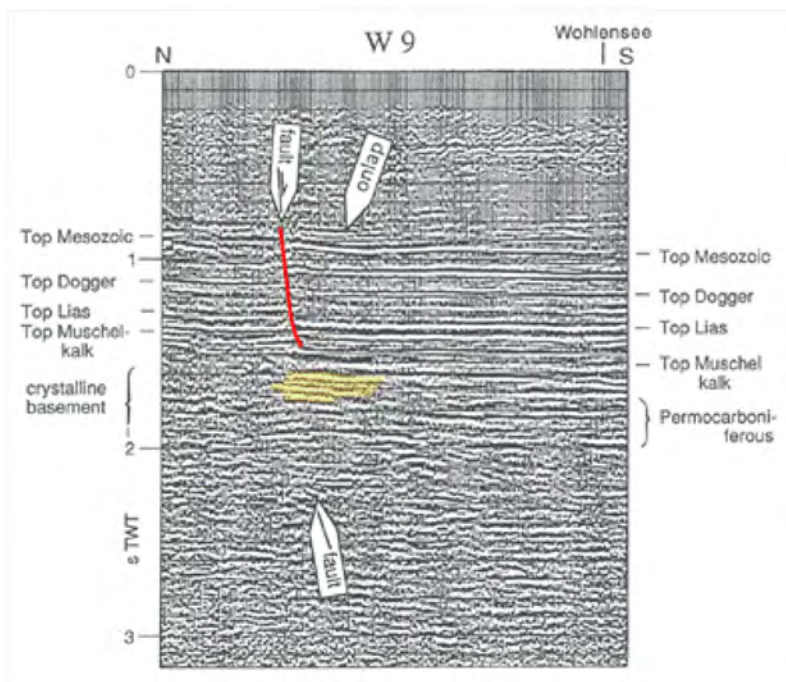


Figure 3.5-37 : Section sismique orientée NW-SE à env. 2 km au sud-ouest du site de l'EKKM
(source : [122])



Dans le périmètre étudié, on n'a aucune indication de failles qui s'enfonceraient jusque dans le soubassement rocheux (voir aussi Figure 3.5-38). Comme on ne constate généralement pas de lien direct entre les failles – raides – et des éléments de structure pré-mésozoïques, il semble que les mouvements N-S, avec transpression senestre, de la couverture sédimentaire ont été absorbés par les évaporites du Trias moyen et qu'ils sont de ce fait découplés de la tectonique du socle.

Figure 3.5-38 : Interprétation d'une section de la ligne 75BE04 (W9) (tiré de [121], page 70, fig. 8-11). Selon les auteurs, la faille normale limite un fossé permo-carbonifère (« halfgraben ») dans le soubassement rocheux¹. Une continuation *directe* (figurée en rouge) de la faille jusque dans le socle semble cependant problématique. Pour cela, elle devrait traverser les réflexions (figurées en jaune) du soubassement rocheux, ce qui peut être exclu.



¹ Citation tirée de [121] : « The Mesozoic succession is cut by a marked fault downthrowing the southern block within the northern half of line W9. Reflections from beneath the Triassic strata in the southern block at 1.8-2 sTWT are slightly oblique to the triassic strata and pinch out in the southern half of line W9. This is interpreted to represent a halfgraben containing Permo-Carboniferous strata bordered by the normal fault mentioned before. It is interesting to note that above this normal fault the upper-Jurassic sediments are overlain unconformably by younger sediments. The onlap is particularly well visible following the high-frequency reflections on the southern block. These reflections disappear southward into the « noisy » transparent looking Tertiary strata ; most probably they represent USM strata. It thus seems that this particular fault of Permo-Carboniferous age was reactivated during the Tertiary (Oligocene). »

Figure 3.5-39 : Carte des isohypses de la base du Tertiaire. Outre les lignes de profondeur, la carte montre le modèle de failles à la limite Mésozoïque/Tertiaire. On voit nettement que la structure de Fribourg, en forme de fossé, ne s'étend pas beaucoup plus au nord qu'une ligne allant de l'extrémité orientale du lac de Morat jusqu'à Laupen. Les failles locales que l'on discerne sur la ligne FR.N-74001 – BE7506 (voir Figure 3.5-32) au sud de la région du site, ne peuvent pas être corrélées sur plusieurs lignes et sont signalées par des symboles sur la carte.

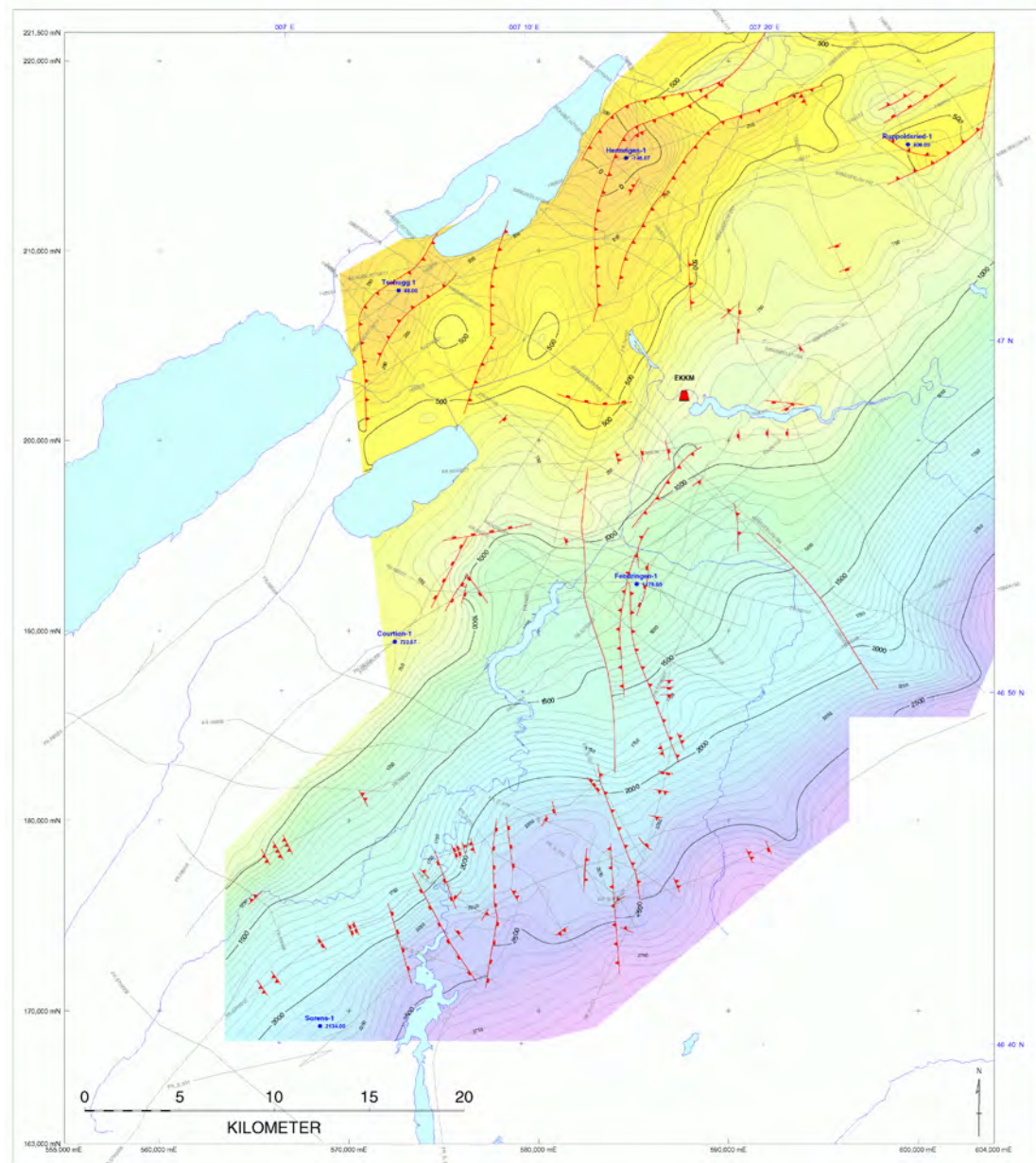
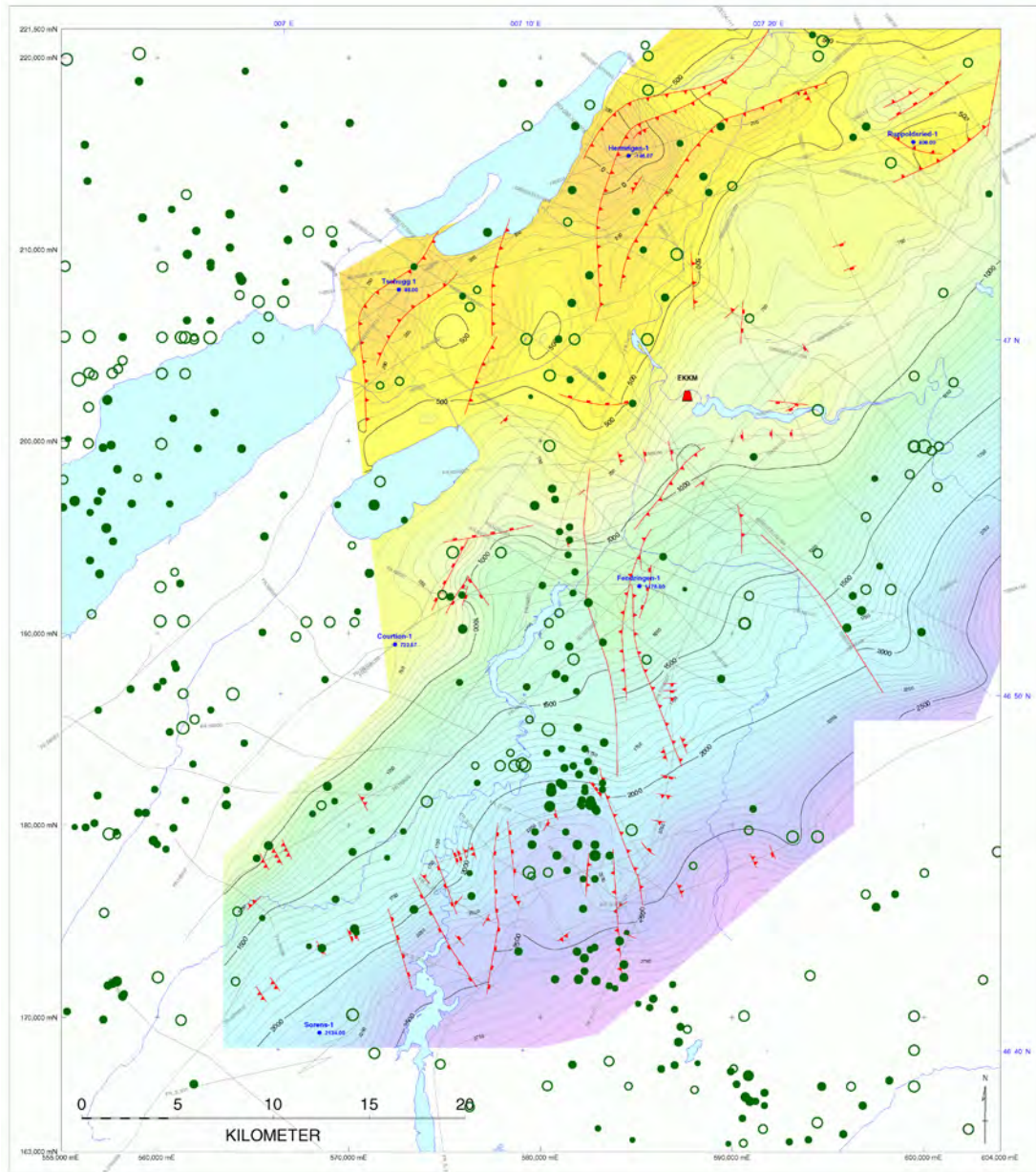


Figure 3.5-40 : Activité sismique dans la région de la zone de Fribourg. Les épicentres du catalogue des séismes sont représentés par des cercles dont la surface correspond à la magnitude M_w . Le catalogue comprend les données instrumentales (cercles pleins) et historiques (cercles vides).



3.5.3.7.3 Impacts de la FZ sur le potentiel de risque

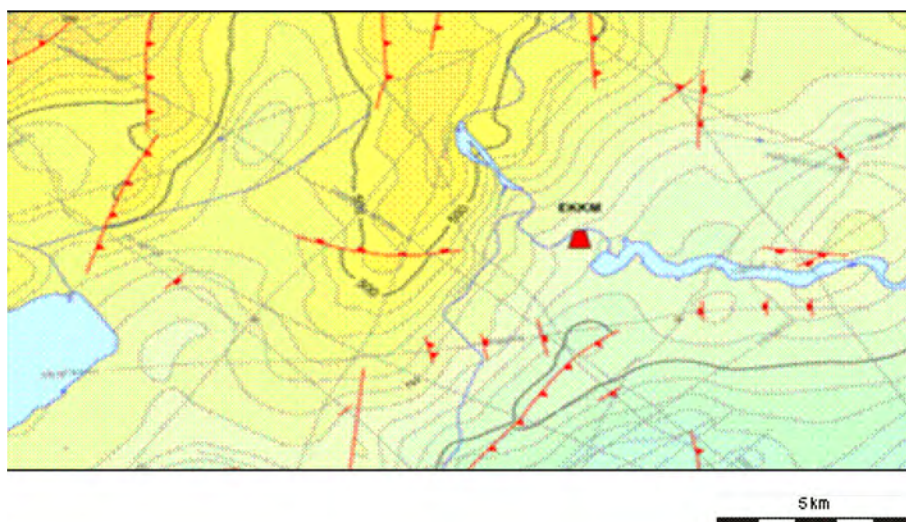
Malgré la place à part de la zone de Fribourg, qui est l'un des rares systèmes de failles potentiellement actifs au niveau sismique en Suisse et pouvant être représentés par la sismique d'exploration ou d'autres méthodes, son influence sur le risque sismique pour le site de l'EKKM reste limitée. Ceci correspond à l'évaluation des groupes d'experts de PEGASOS, dont deux d'entre eux seulement ont explicitement modélisé la FZ comme source de failles ou zone source spécialement formée et l'ayant reprise comme alternative dans leur modèle de sources. Des calculs de sensibilité montrent que l'effet de ces alternatives sur le risque reste très faible. On peut en déduire que les experts, même s'ils ont choisi des sources spéciales pour représenter la FZ, ont caractérisé ces sources de telle manière que leurs paramètres ne se distinguent que faiblement du contexte ou des zones sources voisines.

Les nouvelles découvertes relatives à la FZ pendant les années qui ont suivi PEGASOS parlent en faveur d'une réduction de la contribution au risque. Des profondeurs de foyer plus faibles, alliées au modèle tectonique « thin skin », et un nouveau concept des structures géologiques se basant sur l'hypothèse de failles relativement petites « en échelon » limitent les magnitudes que l'on peut attendre à la bordure orientale, séismogène, de la structure de Fribourg. Le concept s'appuie sur la réinterprétation des données de sismique réflexion. Il montre que la structure de Fribourg ne peut plus être mise en évidence au nord d'une ligne qui va de la limite orientale du lac de Morat à Laupen et que le site se trouve en dehors de cette structure. Il résulte de ces interprétations qu'il n'existe pas de faille passant directement sous l'installation planifiée.

3.5.3.7.4 Le risque de décrochement à travers la FZ

Les lignes de sismique réflexion montrent une stratification quasiment non perturbée sous le site. En l'absence de faille au-dessous de l'installation planifiée, il est possible d'exclure avec une grande certitude tout risque de décrochement.

Figure 3.5-41 : Détails du modèle de faille au niveau de la base du Tertiaire dans les environs immédiats du site de l'EKKM



3.5.4 Evaluation de l'adéquation du site

Comme pour d'autres sites accueillant des centrales nucléaires, on dispose pour le site de Mühleberg d'une excellente base de données géologiques et géotechniques, complétée et élargie pendant des décennies depuis la construction de l'installation, et pour la dernière fois lors de la campagne d'étude du terrain au printemps et à l'été 2008. L'analyse des structures géologiques dans les environs plus lointains et à des profondeurs plus importantes peut s'appuyer sur les lignes de sismique réflexion disponibles. Grâce à cette base de données, les affirmations relatives au terrain et à l'adéquation du site d'un point de vue géologique sont bien étayées et fiables. La même chose s'applique au risque sismique. L'évaluation s'appuie ici sur l'une des analyses les plus poussées et les plus avancées techniquement qui aient été réalisées à travers le monde (étude PEGASOS).

Mühleberg se situe dans le bassin molassique du Plateau, dans une zone relativement calme au niveau tectonique et sans complication structurale. La structure tectonique potentiellement active la plus proche est la zone de Fribourg, à la limite orientale d'une dépression synclinale d'axe NS de sédiments mésozoïques et tertiaires près de la ville de Fribourg, qui se termine au sud de Mühleberg et n'a aucune influence sur le site. Une réinterprétation de plus de 500 km de lignes sismiques menée par l'industrie pétrolière montre qu'il n'existe pas de faille d'importance régionale à proximité du site. Les failles locales peuvent également être exclues dans un rayon d'au moins 2.5 km sur la base des données de sismique réflexion présentées dans ce chapitre.

Le site lui-même se trouve sur des strates quasiment non perturbées. Comme les fondations de l'installation planifiée ne sont en contact avec aucune faille, il est possible d'exclure avec une grande certitude tout risque de décrochement. La roche peu profonde et la stratification horizontale permettent au sol de fondation de porter des charges verticales importantes. Il est peu propice aux tassements. Les couches de roches meubles résistantes ne présentent aucun potentiel de liquéfaction. Le site se trouve dans la zone B de protection des eaux, c'est-à-dire une zone où la nappe phréatique est moins importante. Le projet de construction ne pose donc pas de problème d'un point de vue hydrogéologique. Les éventuels glissements de terrain n'ont aucun impact direct sur le site de la centrale. Des éboulements dans le lac de Wohlén ou dans l'Aar peuvent se produire, mais leur impact (inondation du site ou perte du refroidissement par les eaux fluviales) est maîtrisable.

Les cartes de l'aléa sismique du Service sismologique suisse montrent que le site de Mühleberg se trouve dans une zone sismique relativement calme en Suisse¹. Les accélérations (de roches) spécifiques au site enregistrées par les experts de PEGASOS sont comparables au risque que connaissent d'autres zones à activité sismique faible à modérée, comme la partie orientale et centrale des Etats-Unis. Selon les experts de PEGASOS, l'influence de la zone de Fribourg potentiellement active au niveau sismique sur le site de Mühleberg est faible. Comme le montrent les calculs de sensibilité, le fait que la zone de Fribourg soit prise en compte dans les modèles de caractérisation de sources de faille, c'est-à-dire comme source de faille spécialement formée, ou implicitement comme partie d'une source de faille plus importante, ne joue aucun rôle. Cette

¹ Des instruments d'enregistrement des événements sismiques ont été installés sur le site de la KKM existante depuis 1982 en 5 endroits différents. Depuis, trois légers tremblements de terre ont été enregistrés, le 14 février 1999, le 22 février 2003 et le 23 février 2004. Même le tremblement de terre ayant la plus forte intensité (en 2003, de force 5.5) n'a eu aucune conséquence pour l'exploitation normale de la KKM.

estimation des experts s'appuie sur la base de données et l'état des connaissances en 2003. Les nouvelles découvertes faites entre temps, notamment les faibles profondeurs de foyer, limitées aux sédiments, et le modèle tectonique de J. Mosar, indiquent une diminution de la contribution au risque de la zone de Fribourg. Les données de sismique réflexion et de gravimétrie montrent que la structure de Fribourg et la zone de Fribourg qui lui est associée ne dépassent pas au nord une ligne reliant l'extrémité orientale du lac de Morat et Laupen. L'idée qui a été publiée entre temps que la zone de Fribourg pourrait être une faille unique, longue de 30 km et allant jusqu'au socle, peut être réfutée à partir de la réinterprétation des données de sismique réflexion. Le réseau existant de stations d'enregistrement sera densifié et étendu afin d'assurer une surveillance permanente de l'activité sismique de la zone de Fribourg au sud du site et de localiser précisément les épicentres. En outre, des études microsismiques de la zone de Fribourg sont planifiées dans les environs de Mühleberg.

Les courbes de risque PEGASOS pour le site de Mühleberg (composante horizontale ; roche) indiquent une « peak ground acceleration » de 0.2 g, avec une valeur de référence de 10^{-4} pour la probabilité de dépassement annuelle. Ceci est la valeur médiane d'une distribution d'incertitude qui peut par exemple être représentée par la fourchette située entre les 16^e et 84^e fractiles (0.12-0.3 g). L'effet de site, c'est-à-dire le renforcement du signal sismique dépendant de la fréquence par les couches géologiques proches de la surface, augmente la valeur médiane de l'accélération des roches à 0.4 g avec une fourchette d'incertitude située dans la zone de fractiles de 0.23-0.68 g.

L'étude PEGASOS a déterminé le risque sismique pour la KKM existante. Ses résultats s'appliquent cependant aussi au nouveau site de l'EKKM qui n'est distant que de 500 m car les propriétés du terrain sont très similaires. Après évaluation des études de terrain mentionnées ci-dessus et des études ultérieures telles que le PEGASOS Refinement Project (PRP), la base de données concernant le risque sur le site pourra continuer à être améliorée. S'il est possible de réduire les incertitudes des données pour l'effet de site, ceci pourrait se traduire par une réduction du risque pronostiqué. Les principales affirmations sur l'adéquation du site resteront cependant valables ; il n'est pas envisageable que les résultats escomptés donnent lieu à des corrections majeures. La nouvelle installation peut être conçue en fonction des accélérations de PEGASOS.

Les résultats de PEGASOS sont déterminants pour la définition obligatoire du risque sismique sur le site. La conception de base des systèmes, structures (y compris constructions) et composantes sera définie en fonction de ce risque pendant l'étude de projet de la nouvelle installation. Ceci inclut également la détermination d'une part du niveau de risque pour un séisme d'exploitation (OBE) pour lequel les structures/composantes qui assurent la sécurité de l'exploitation de l'installation nucléaire doivent rester opérationnelles et d'autre part du niveau de risque d'un séisme de sécurité (SSE), pour lequel seules certaines structures/composantes doivent rester fonctionnelles pour que l'installation puisse être sécurisée (arrêtée). Une analyse déterministe des accidents de ce type sera réalisée dans le cadre de la conception et ne sera fournie que dans le cadre de l'autorisation de construire. Au vu des risques sismiques actuellement connus sur le site, les critères de sécurité, liés à la maîtrise de ces défaillances, sont respectés.

L'ensemble de ces réflexions conduisent à une évaluation positive de l'adéquation du site en ce qui concerne la géologie, les propriétés du sol de fondation et le risque sismique.

3.6 Potentiel de risque

Les propriétés du site peuvent jouer un rôle quant à la fréquence d'occurrence d'événements externes ou à leur impact et sont donc étudiées afin d'évaluer le risque et l'adéquation du site. Ces études sont l'objet de ce chapitre. Conformément à l'ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu, les spécifications détaillées du risque ne devront être analysées et documentées que dans la demande d'autorisation de construire, dans le cadre du projet de l'installation globale. Pour la demande d'autorisation générale, l'examen de l'éventualité et de l'impact des événements se limite donc aux aspects généraux ou aux événements externes liés au site.

3.6.1 Événements déclenchés au sein de l'installation

Au moment de la demande d'autorisation générale, seules les grandes lignes de l'installation à construire sont fixées, la conception définitive sera déterminée ultérieurement et documentée dans la demande d'autorisation de construire. La définition des événements internes à l'installation est liée à sa conception et ne peut donc pas avoir lieu à ce stade. La demande d'autorisation générale ne comporte donc pas d'étude correspondante ; la définition et l'analyse détaillée des événements internes et des accidents qui pourraient en résulter seront documentés dans la demande d'autorisation de construire.

3.6.2 Evaluation des éventuels événements externes

Tous les événements externes potentiels sont étudiés dans le cadre des évaluations de la sécurité pour la KKM. Les sites de la KKM et de Niederruntigen étant à proximité directe, on peut s'attendre à ce que les événements externes soient pour l'essentiel identiques pour les deux sites. Les études d'événements déclencheurs pour le site de l'EKKM se sont donc basées sur les analyses de sécurité existantes pour le site de la KKM et ont été adaptées là où c'était nécessaire au site de l'EKKM. Nous étudierons ci-après les événements externes potentiels et leurs conséquences envisageables.

Sélection des événements externes potentiels

L'ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu² comporte une indication relative aux événements externes ; elle est cependant incomplète et il faut développer une liste des événements potentiels à considérer spécifiquement pour le site.

Les événements déclencheurs sont sélectionnés sur la base du « PRA Procedures Guide » NUREG/CR-2300 [27] et du « Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities » NUREG-1407 [29]. Le « PRA Procedures Guide » fournit une liste générique des éventuels événements déclencheurs (les termes anglais du rapport original sont indiqués entre parenthèses) :

¹ Annexe 4 (art. 24, 26, 28, 29, 40) OENu [2]

² Art. 8 al. 3 OENu [2]

- chute d'avion (aircraft impact) ;
- avalanches (avalanche) ;
- érosion côtière (coastal erosion) ;
- sécheresse (drought) ;
- inondation externe (external flooding) ;
- vents extrêmes et tornades (extreme winds and tornadoes) ;
- brouillard (fog) ;
- feux de forêt (forest fire) ;
- gel (frost) ;
- grêle (hail) ;
- crue (high tide, high lake) ;
- températures estivales élevées (high summer temperature) ;
- cyclones tropicaux (hurricane) ;
- formation de glace (ice cover) ;
- accidents d'installations industrielles ou militaires (industrial or military facility accident) ;
- mouvements de terrain : glissement de terrain (landslide), chute de roches (rockslide) ;
- foudre (lightning) ;
- étiage (low lake or river water level) ;
- températures hivernales basses (low winter temperature) ;
- impact de météorite (meteorite) ;
- accident d'oléoduc (pipeline accident) ;
- précipitations extrêmes (intense precipitation) ;
- dégagement de produits chimiques stockés sur le site (release of chemicals in onsite storage) ;
- déplacement du lit d'une rivière (river diversion) ;
- tempête de sable (sand storm) ;
- seiche (= mouvement ondulatoire périodique) ;
- séisme (seismic activity) ;
- neige (snow) ;
- stabilisation du sol liée aux rétractions et aux gonflements (soil shrink-swell consolidation) ;
- déferlement de vagues (storm surge) ;
- transport (transportation) ;
- tsunami ;
- gaz toxiques (toxic gas) ;
- fragments de turbine (turbine-generated missiles) ;
- activité volcanique (volcanic activity) ;
- vagues (waves).

Cette liste est générique, tous les événements qu'elle mentionne n'ont pas la même pertinence pour chaque site. Par exemple, les événements qui ne peuvent survenir qu'à proximité des côtes ne concernent pas le site de Niederruntigen.

Nous avons en outre recherché dans les documents suivants des mentions d'événements extrêmes qui ne seraient pas repris dans la liste ci-dessus et devraient également être pris en compte : IAEA Safety Guide NS-R-3 [110], ANSI/ANS-58.21 [109] et une étude de l'impact environnemental de l'équipement ultérieur d'une centrale nucléaire récente en Europe de l'Est. Ces documents ont permis d'identifier les événements déclencheurs suivants, dont il faut également tenir compte :

- événements biologiques (biological events)
- chutes de satellites (satellite strike) ;
- activités de glaciers (glacial activity) ;
- affaissements de terrain et effondrements (sinkholes and collapse) ;
- interférences électromagnétiques et à hautes fréquences (electromagnetic and radiofrequency interference).

La liste ainsi complétée des éventuels événements externes (voir Tableau 3.6-1) couvre tous les événements concernant le site ; elle comporte en outre les événements mentionnés par l'ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu¹ relative à la perte de l'alimentation externe en électricité ou à l'alimentation externe en eau de refroidissement.

¹ Art. 8 al.3 OENu [2]

Tableau 3.6-1 : Événements externes potentiels accompagnés de la référence aux paragraphes qui les décrivent

Événement	Paragraphe	Événement	Paragraphe
Sécheresse	3.6.2.1	Séismes	3.6.2.22
Erosion	3.6.2.2	Vents extrêmes, tornades	3.6.2.22.1
Feux de forêt	3.6.2.3	Inondation	3.6.2.24
Températures estivales élevées	3.6.2.4	Chute accidentelle d'avion	3.6.2.25
Formation de glace	3.6.2.5	Tsunami	3.6.2.26
Accidents d'installations industrielles ou militaires	3.6.2.6	Gaz toxiques	3.6.2.27
Mouvements de terrain	3.6.2.7	Fragments de turbine	3.6.2.28
Foudre	3.6.2.8	Activité volcanique	3.6.2.29
Etiage	3.6.2.9	Vagues	3.6.2.30
Températures hivernales basses	3.6.2.10	Impact de météorite	3.6.2.31
Accident d'oléoduc (onde de choc)	3.6.2.11	Activités de glaciers	3.6.2.32
Dégagement de produits chimiques stockés sur le site	3.6.2.12	Affaissements de terrain et effondrements	3.6.2.33
Déplacement du lit d'une rivière	3.6.2.13	Seiches	3.6.2.34
Événements biologiques	3.6.2.14	Tempêtes de sable	3.6.2.35
Neige (congrère)	3.6.2.15	Précipitations extrêmes	3.6.2.36
Stabilisation du sol	3.6.2.16	Chute de satellite	3.6.2.37
Accidents des transports	3.6.2.17	Avalanches	3.6.2.38
Déferlement de vagues	3.6.2.18	Brouillard	3.6.2.39
Grêle	3.6.2.19	Gel	3.6.2.40
Crues	3.6.2.20	Perte de l'alimentation externe en électricité	3.6.2.41
Cyclones tropicaux	3.6.2.21	Perte de l'alimentation externe en eau de refroidissement	3.6.2.42
		Interférences électromagnétiques et à haute fréquence	3.6.2.43

Chacun des événements répertoriés fera l'objet d'une discussion séparée. La fréquence d'occurrence et les conséquences des événements externes ne sont pas déterminées que par des facteurs non spécifiques au site, mais aussi par des facteurs propres à l'installation ; les études mentionnées ici ne se rapportent qu'au site et sont donc plus qualitatives que quantitatives. Une analyse quantitative détaillée de ces événements sera réalisée avec l'analyse des événements internes à l'installation, sous forme de PSA dans le cadre de la demande d'autorisation de construire ou d'exploiter.

3.6.2.1 Sécheresse

Les éventuelles conséquences d'une sécheresse sévissant aux environs du site seraient une baisse du niveau de l'eau de l'Aar ou une augmentation du risque de feux de forêts à proximité de l'installation. Ces effets feront l'objet de discussions distinctes (feux de forêt, voir chap. 3.6.2.3 et étiage, chap. 3.6.2.9).

La nouvelle installation disposera de plusieurs sources froides redondantes, comme toute installation de conception moderne. D'autres alternatives au refroidissement de secours (eau de la nappe phréatique, réservoir, voir chap. 2.4.4) seront également touchées par une sécheresse durable. Du fait qu'il s'agit d'un processus lent, il est possible de trouver une solution à temps, p. ex. en lâchant de l'eau du lac de Wohlen, au cas où cette alternative devrait être envisagée.

Pour les raisons évoquées, nous n'étudierons pas cet événement plus avant.

3.6.2.2 Erosion

En raison de sa situation géographique, il est inutile de tenir compte de l'érosion côtière pour la KKM.

Une éventuelle érosion des berges de l'Aar est un processus lent qui serait repéré à temps avant qu'il n'entraîne un risque pour le site de la centrale ou de la source froide (ouvrage de prise d'eau de refroidissement). On réalise régulièrement des profils transversaux de l'Aar. Les derniers relevés ont eu lieu en 2006 et n'ont apporté aucune nouvelle information sur le site par rapport aux investigations précédentes. Le relevé de ce profil a permis de prouver que l'Aar ne présentait aucune tendance significative à s'éroder entre la centrale hydroélectrique de Mühleberg et l'embouchure de la Sarine, même lors de la plus grande crue mesurée en août 2005.

Les érosions qui conduisent à des glissements de terrain sur des berges concaves situées en amont ou en aval du site peuvent rendre les eaux si boueuses que cela pourrait perturber l'alimentation en eau de refroidissement. Les études menées dans le passé ont montré qu'on pouvait exclure tout blocage complet de l'Aar (voir chap. 3.6.2.7). On tiendra cependant compte de ces circonstances en utilisant des sources froides redondantes et diversifiées, de manière à ce que la sécurité nucléaire soit assurée à tout moment et en tout état de cause.

On peut donc exclure le risque que présente l'érosion pour le site.

3.6.2.3 Feux de forêt

Lors de la conception de la nouvelle installation, une distance adéquate jusqu'à la forêt la plus proche sera respectée. En outre, les zones proches de la clôture extérieure seront débroussaillées, afin d'éviter qu'un feu n'atteigne le site. La conception de l'installation et les dispositifs de protection incendie sont implicitement dimensionnés de manière à ce que les feux de forêt ne puissent pas se propager à l'installation.

On pourrait envisager un risque potentiel d'aspiration de fumée dans les installations d'aération ou dans les groupes électrogènes de secours. L'alimentation en air frais sera cependant conçue de manière à ce que l'aspiration de fumée soit détectée et à ce que des contremesures adaptées soient mises en œuvre.

Il est donc possible d'exclure qu'un feu de forêt ne mette le site en danger.

3.6.2.4 Températures estivales élevées

La conception des installations nucléaires, notamment celle de la nouvelle installation sur le site, prévoit que les sources froides primaires permettent une exploitation pendant au minimum 30 jours¹ en tenant compte de pertes d'eau majeures.

L'impact potentiel de températures estivales élevées est une modification du niveau d'eau de l'Aar ou des conséquences sur la fiabilité des systèmes de l'installation. La conception du système de refroidissement principal avec une tour de refroidissement hybride lui permet de fonctionner avec un niveau d'eau très bas dans l'Aar (voir chap. 2.4), l'événement externe que constitue la sécheresse fait l'objet d'une description séparée au chapitre 3.6.2.1.

Les températures des différents systèmes situées en dehors des spécifications autorisées sont en général consignées et entraînent la mise en œuvre de contremesures avant que ne survienne un incident. En outre, les salles où se trouvent des composants sensibles à la chaleur sont en principe équipées d'un système de refroidissement, de sorte que des températures estivales élevées ne posent pas de problème pour ces systèmes.

Globalement, la conception de la nouvelle installation assure une alimentation suffisante en eau de refroidissement, même dans des conditions défavorables ; le risque que présentent des températures estivales élevées peut donc être négligé.

¹ U.S.NRC NUREG/CR-2300 [27]

3.6.2.5 Formation de glace

On peut exclure tout risque de blocage de l'Aar lié à la glace en raison de la faible distance qui sépare l'installation du barrage de Mühleberg (voir aussi chap. 3.4.4.4). L'exploitation de la centrale hydroélectrique évitera que la rivière ne gèle ou que la température ne s'abaisse à un niveau où la rivière gèlerait.

Le gel sur les rives de l'Aar, dans les zones où se trouve de l'eau stagnante, ne pose pas de problème ; la future arrivée d'eau de refroidissement de l'EKKM est située dans une zone où le courant est continu, la formation de la glace est donc tardive à cet endroit. Une perte totale d'eau ne serait possible qu'au cas où l'ensemble de la rivière gèlerait jusqu'à son lit. En raison des propriétés de l'eau, une telle hypothèse n'est cependant pas plausible. Même si la surface du fleuve gèle, il reste suffisamment d'eau de refroidissement disponible tant que la saisie est construite à une profondeur suffisante.

Après un gel important des eaux courantes, des événements importants liés à de la glace à la dérive peuvent se produire pendant la phase de dégel, ils peuvent provoquer des blocages et des retenues, notamment dans les zones étroites. Dans ce cas, le barrage de Mühleberg retiendra une grande partie des blocs de glace, de sorte que peu de glace devrait dériver vers l'aval. En outre, il n'est pas plausible que la formation de murs de glace permette d'atteindre des niveaux d'eau plus élevés que ceux liés aux événements décrits au chapitre 3.4.3.

La formation de cristaux de glace en forme d'aiguilles (« frazil ice ») se produit dans des eaux turbulentes et refroidies et peut provoquer des problèmes dans les composantes d'aspiration de l'installation. Ce phénomène ne se produit cependant que dans les eaux de mer et peut être exclu pour la nouvelle installation. La formation de glace de fond est également exclue dans les saisies d'eau de refroidissement.

Le gel de la source froide primaire (alimentation en eau de refroidissement du condenseur) peut également être exclu, puisque l'eau de refroidissement a toujours une température largement supérieure à 0°C. Le gel dans le circuit d'eau brute auxiliaire peut être évité par une conception appropriée (préchauffage de l'eau de l'Aar amenée avec une partie du retour d'eau). Le gel des amenées d'eau et des saisies d'eau peut également être évité grâce à un chauffage électrique.

La formation de glace sur des composants du réseau électrique (câbles, transformateurs) est parfois observée en hiver et peut provoquer une perte de l'alimentation externe en électricité. L'installation est capable de maîtriser une perte d'alimentation externe en électricité (voir chapitre 3.6.2.41).

Le gel des entrées d'air des systèmes d'aération ou auxiliaires liés à la sécurité peut être évité grâce à une conception appropriée, p. ex. en chauffant les caches ou les grilles qui sont placées sur les ouvertures pour éviter l'entrée de corps étrangers ou d'insectes. On peut globalement exclure le fait que le gel ne présente un risque pour l'installation. Les mesures techniques et de construction permettant d'éviter le gel seront décrites en détail ultérieurement dans la demande d'autorisation de construire.

3.6.2.6 Accidents d'installations industrielles ou militaires

On peut exclure tout risque lié à des installations industrielles ou militaires à proximité immédiate du site (voir chap. 3.2). Les conséquences potentielles de l'interaction entre l'EKKM et la KKM sont décrites au chapitre 3.6.3.3.

3.6.2.7 Mouvements de terrain

3.6.2.7.1 Glissements de terrain

L'éventualité de glissements de terrain dans les environs du site de Niederruntigen, et en particulier la possibilité qu'un glissement de terrain n'interrompe l'alimentation en eau de la KKM existante, ont fait l'objet d'études détaillées par le passé. On a constaté que les conditions géographiques et géologiques étaient telles que tout blocage complet de l'Aar était impossible. Les saisies d'eau de refroidissement peuvent cependant être obstruées par de la boue. Une diversification appropriée et la redondance des sources froides offrent une protection suffisante contre cet effet. Les glissements de terrain ne menacent donc pas une alimentation suffisante en eau de refroidissement des systèmes liés à la sécurité.

3.6.2.7.2 Eboulements

Les processus d'éboulement sont des mouvements de terrain lors desquels des matériaux qui se détachent de la montagne font la majeure partie du chemin en l'air. En cas d'éboulement, une grande masse se détache en bloc de la paroi. Pendant la chute ou lors de l'impact, la masse se subdivise en blocs et en pierres.

Des éboulements peuvent se produire en aval du fleuve dans les environs proches de la centrale. Pour déterminer l'impact de cet événement, on a examiné dans l'étude du risque d'inondation pour la KKM [8] le risque que présentaient les éboulements et la retenue d'eau qui s'ensuivrait au niveau de la berge concave de Runtigenflue, située à l'est de l'embouchure de la Sarine et ayant le potentiel le plus important de provoquer une retenue. L'objectif de cette étude était d'évaluer dans quelle mesure un éboulement influencerait le niveau de l'eau. On a constaté que le versant était stable et que même un éboulement de 4500 m³ de pierres n'aurait aucun impact notable sur le risque de crue.

Il n'existe pas de falaise sur la rive gauche de l'Aar près de l'EKKM, la vallée est très plate et est recouverte de forêts. Il est donc possible d'exclure tout éboulement à cet endroit.

Une paroi rocheuse verticale de presque 50 m se trouve sur la rive droite de l'Aar en face du site de l'EKKM. Les analyses réalisées dans le cadre des études sismiques du site de la KKM existante ont montré que ce versant était généralement stable. Il ne présente aucun signe de mouvement ni aucun point de cassure net ni d'amas qui laisserait supposer une possibilité de glissement. La roche est de manière générale massive et il y a peu d'éboulis qui pourraient contribuer à des chutes de roches. Le terrain plat au pied de la falaise est exempt de chutes de pierres, ce qui indique que la situation est relativement stable. Dans le cas improbable où des roches tomberaient, elles aboutiraient dans l'Aar large de 80 m.

Un éboulement ne représente donc pas un risque notable pour le site de l'EKKM.

3.6.2.8 Foudre

L'installation, telle qu'elle est conçue, protégera suffisamment les bâtiments et systèmes liés à la sécurité des éventuelles conséquences de la foudre, en fonction de la fréquence de survenue escomptée pour cet événement telle que la présente le chapitre 3.3.9. Les analyses de sécurité déterministes sont l'une des bases du concept de protection contre la foudre. Les conséquences d'un impact de foudre sur l'installation et ses composants sont évaluées à la fois dans les analyses de sécurité déterministes et dans les analyses de risque (PSA) à partir de ce concept et des mesures prévues de protection contre la foudre ; les justificatifs correspondants seront documentés dans les demandes d'autorisation de construire et d'exploiter. Le concept de protection de l'ensemble de l'installation sera remis avec la demande d'autorisation de construire, conformément aux exigences légales et émanant des autorités¹.

On prendra en compte l'impact de la foudre en dehors de l'installation en abordant les événements correspondants, p. ex. la perte de l'alimentation externe en électricité (voir chap. 3.6.2.41).

3.6.2.9 Etiage

Cet événement est traité au chapitre 2.4 : même dans les conditions les plus défavorables, une alimentation suffisante en eau de la nouvelle installation est assurée.

3.6.2.10 Températures hivernales basses

Conformément au PRA Procedures Guide [27] les contraintes thermiques et la fragilisation liées aux températures hivernales basses sont minimales et seront prises en compte lors de la conception de l'installation. L'EKKM est conçue pour les conditions climatiques spécifiques au site. Les bases correspondantes (analyses des valeurs extrêmes de températures) sont reprises au chapitre 3.3.5.

Les effets potentiels du gel sont décrits au chapitre 3.6.2.5.

3.6.2.11 Accident d'oléoduc

On peut exclure tout risque pour le site lié à des accidents d'oléoduc, voir chapitre 3.2.

3.6.2.12 Dégagement de produits chimiques stockés sur le site

Le stockage des produits chimiques nécessaires à l'exploitation s'effectuera dans des installations conçues pour les quantités stockées et dotées de systèmes de retenue en cas de fuite de produits chimiques. En outre, les procédures d'exploitation permettront d'assurer que les éventuels produits chimiques nécessaires ne soient conservés que dans les entrepôts prévus à cet effet, et notamment pas à proximité des systèmes liés à la sécurité.

Le dégagement de produits chimiques pourrait endommager des constructions ou des composants, p. ex. en renforçant la corrosion. En outre, les produits chimiques libérés pourraient être aspirés par les bouches d'aspiration d'air frais des systèmes d'aération ou des groupes électrogènes de secours, et diffusés au sein de l'installation. L'organisation spatiale mentionnée,

¹ Annexe 4, (hiérarchie G1) OENu [2] et directive DSN-R-30 [108]

ainsi que la conception des systèmes d'aspiration d'air frais, permettront d'éviter des dégâts de ce type dans les systèmes liés à la sécurité. Les dommages surviendraient en outre suffisamment lentement pour qu'il soit possible de prendre des contre-mesures.

Les éventuelles conséquences d'un dégagement de produits chimiques ou le risque engendré par la livraison et le stockage de matières dangereuses nécessaires à l'exploitation sont examinés dans l'étude de projet de l'EKKM et l'installation sera conçue en conséquence. Ceci est documenté dans le dossier de demande d'autorisation de construire. Ainsi, la nouvelle installation ne sera pas mise en danger par le dégagement de produits chimiques sur le site. L'éventuel effet lié à la formation de gaz toxiques à partir des produits chimiques qui se seraient dégagés est traité au chapitre 3.6.2.27.

3.6.2.13 Déplacement du lit d'une rivière

Cet événement est traité au chapitre 3.4.4.2.2. La situation géologique du site exclut tout déplacement du lit de la rivière qui provoquerait une perte de l'alimentation en eau des systèmes et composantes liés à la sécurité des installations.

3.6.2.14 Événements biologiques

On entend par exemple par événements biologiques la colonisation de canalisations par des moules zébrées, l'obstruction de saignées d'eau de refroidissement par des quantités importantes de poissons, de méduses, d'algues, etc. ou le risque engendré par des quantités importantes de plantes marines après une violente tempête.

Pour le site, les situations suivantes sont envisageables :

- Obstruction d'une arrivée d'eau de refroidissement par des bancs de poissons ou des algues : pour qu'il y ait risque, il faudrait que la population de poissons de l'Aar augmente fortement en peu de temps. La rivière étant intensivement utilisée pour la pêche sportive, aucune augmentation de la population de poissons sur une période importante ne peut passer inaperçue. On pourrait également envisager la migration d'un banc de poissons venant d'une autre zone. L'Aar étant cloisonnée par de nombreuses retenues d'eau, cette possibilité d'augmentation rapide de la population de poissons peut également être exclue. Le risque que présentent les bancs de poissons peut donc être écarté. Dans des conditions climatiques favorables, les algues peuvent se multiplier de manière à perturber l'approvisionnement en eau de refroidissement. Une disposition diversifiée et redondante des saignées d'eau de refroidissement permet cependant d'exclure tout risque pour la sécurité nucléaire.
- Obstruction d'une arrivée d'eau de refroidissement par la zostère : la zostère apparaît régulièrement à la centrale hydroélectrique de Mühleberg. L'élodée du Canada (ou peste des eaux) pousse dans le lac de Wohlén où elle forme de grands herbiers, meurt, et est en général emportée vers l'aval en décembre/janvier. Cet événement survenant de manière saisonnière, il est très peu probable qu'il coïncide avec une crue importante. La zostère est retenue par les grilles des prises d'eau de la centrale hydroélectrique où elle est régulièrement ramassée, de sorte qu'elle ne peut pas arriver plus en aval. Des événements plus importants liés à la zostère surviennent avec une fréquence pluriannuelle et du personnel supplémentaire est alors employé pour la ramasser. La zostère n'a donc aucun impact sur les

saisies d'eau de l'EKKM. Ces événements peuvent également être contrôlés grâce à des opérations de fauchage.

- Obstruction d'une arrivée d'eau de refroidissement par du bois flotté : l'expérience des dernières crues en Suisse montre que ces événements produisent une quantité importante de bois flotté. A différents étages de retenue, ce bois flotté a provoqué une aggravation de la situation de hautes eaux. Pour que le bois flotté mette l'installation en danger, il doit arriver sur le site. Le bois flotté que l'Aar entraîne avec elle à travers le lac de Wohlen est en grande partie bloqué à la centrale hydroélectrique de Mühleberg. Il peut y obstruer les prises d'eau du barrage et renforcer la retenue dans le lac de Wohlen. Ceci n'a cependant pas d'influence directe sur le site situé en aval de la centrale. De la même manière, le bois flotté apporté par la Sarine est bloqué par les retenues de cette rivière. Aucune quantité notable de bois flotté ne peut être générée dans l'environnement direct du site car la distance jusqu'à la centrale hydroélectrique est faible. La disposition des saisies d'eau de refroidissement et leur taille rendent tout blocage complet par du bois flotté impossible.

On empêchera tout blocage complet lors de l'étude du projet, notamment lors du choix des emplacements et de la taille des saisies d'eau de refroidissement. Les événements biologiques ne présentent donc aucun risque pour la nouvelle installation.

Pour la discussion relative aux accumulations liées aux événements sur le barrage, voir chap. 3.4.4.2.3.

3.6.2.15 Neige/congères

La neige et les congères peuvent représenter des charges importantes pour les bâtiments. Lors de la conception de la nouvelle installation, on prend en compte une charge attendue de neige de 149 cm ou 4.5 kN/m², qui correspond à un événement enregistré tous les 10 000 ans, voir chap. 3.3.8).

Une inondation due à la fonte de la neige est également possible. En raison des spécificités locales, on peut partir du principe que l'effet de crues ou de précipitations extrêmes incluent l'impact de la fonte de neige (voir chap. 3.4.2).

3.6.2.16 Stabilisation du sol

Les fondations des bâtiments liés à la sécurité sont construites dans la molasse d'eau douce inférieure (USM). Les conditions d'humidité de la molasse restent identiques par rapport à l'état initial lors de la construction et de l'exploitation ultérieure. Les retraits et les gonflements au sein de la molasse sont négligeables en raison de la faible proportion d'argile. Les (petits) affaissements initiaux seront comblés avant l'aménagement des environs et tout risque les concernant peut être exclu.

Il est donc inutile d'étudier plus avant la stabilité du sol quant aux risques qu'elle présente pour le site. Lors du remblayage de la terrasse, on veillera tout particulièrement au fait que le terrain soit préparé de manière à ce que les effets de la compaction du sol ne présentent aucun risque pour les futurs bâtiments.

3.6.2.17 Accidents des transports

On peut exclure tout risque pour le site lié à des accidents des transports (voir chap. 3.2).

3.6.2.18 Déferlement de vagues

Les effets d'un déferlement de vagues sont comparables à ceux d'une inondation externe ; en raison de la situation géographique du site, il n'existe pas de risque de ce type. Il est donc possible d'exclure ce risque.

3.6.2.19 Grêle

Le chapitre 3.3.10 présente la fréquence des événements de grêle dans les environs de Mühleberg. En cas de grêle, il faut envisager les risques que présentent les grêlons. Cet événement peut être négligé par rapport à d'autres projectiles ayant une masse, une énergie et un potentiel de dégradation plus élevés. La preuve en sera apportée pour tous les bâtiments concernés dans le cadre de la demande d'autorisation de construire.

Il existe en principe un risque pour ce qu'on appelle les « toits nus » (feuille de plastique sans couche de protection) ou les toits constitués de panneaux fins. Ces toits ne sont cependant pas utilisés pour les bâtiments qualifiés.

On peut donc exclure les risques liés à la grêle grâce à une conception adaptée de l'installation.

3.6.2.20 Crues

Les crues et leurs conséquences pour la conception de l'installation sont traitées au chapitre 3.4.2.

3.6.2.21 Cyclones tropicaux

Les typhons, les tornades et les ouragans sont des cyclones tropicaux qui se forment au-dessus de la mer. Une fois que ces cyclones arrivent sur un continent, ils s'affaiblissent rapidement. Dans l'Atlantique, les cyclones se forment principalement dans la mer des Caraïbes et dans le Golfe du Mexique. Il est possible qu'un cyclone s'affaiblisse en arrivant sur les côtes des Etats-Unis et traverse l'Atlantique vers le nord-est en direction de l'Europe sous forme de zone de basses pressions. La formation d'un cyclone atteignant directement la Suisse est cependant impossible.

Tout risque lié aux cyclones tropicaux est donc exclu pour la nouvelle installation.

3.6.2.22 Séismes

3.6.2.22.1 Généralités

Cet événement et ses conséquences pour la conception de l'installation sont décrits aux chapitres 3.5.2.5 et 3.5.4. Une analyse des séquences d'accidents pouvant être déclenchées par un séisme (incendies, explosions, inondations, perte de l'alimentation externe en électricité) et des événements pouvant être déclenchés indirectement par une activité sismique (p. ex. rupture de barrage, accidents industriels) sera réalisée ultérieurement dans le cadre d'analyses déterministes et probabilistes des accidents destinées à obtenir l'autorisation de construire et d'exploiter.

Le comportement du sol en cas de séisme, notamment en ce qui concerne le potentiel de liquéfaction, est décrit en détail au chapitre 3.5.2.4.3. Le chapitre 3.5.2.4.2. fournit l'évaluation

des couches géologiques adaptées aux fondations. Ces explications montrent que les sols pouvant potentiellement se liquéfier ne sont de toute manière pas adaptés comme couche de fondation. Ceci permet de conclure qu'il est possible d'exclure les dégâts pour les parties de l'installation liées à la sécurité, même en cas d'accélération importantes induites par des séismes.

Le chapitre 3.5.2.4.5 fournit une description détaillée sur le thème des éboulements spontanés. Leur étendue est très limitée et n'a aucun impact sur le site. En cas de séisme, il est possible que des limons de pente se détachent au sud. Mais le volume des roches meubles reste limité en raison des roches qui apparaissent très rapidement au sud (voir emplacement des roches lors du forage RB9/08, voir figure Figure 3.5-11) La stratification horizontale de la roche molassique est très favorable de ce point de vue et le volume de roches détachées en cas de séisme est réduit au minimum. Une analyse détaillée des tracés d'éboulement et des éventuelles mesures de protection sera effectuée dans le cadre de l'autorisation de construire ou d'exploiter.

3.6.2.22.2 Séisme à la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa [66]

En 2007, à la suite d'un séisme important sur le site de Kashiwazaki-Kariwa (Japon), on a enregistré des amplitudes de séisme (valeurs PGA situées entre 0.37 et 0.90 g) qui dépassaient largement les accélérations prévues à la conception (valeurs PGA de 0.2 à 0.3 g). Les accélérations mesurées ont montré une variation importante dans le domaine des sept blocs de cette installation nucléaire, ce qui s'explique par des effets liés au site (qualités diverses des roches meubles) et aux techniques de mesure (effets locaux d'interférences et de propagation des ondes en 3D). Malgré les amplitudes d'accélération élevées, les structures liées à la sécurité ont subi peu de dommages. Seuls les systèmes et composants n'assurant pas la sécurité ont été pour certains fortement endommagés, principalement en raison d'affaissements de terrain et de tassements différentiels ; l'incendie d'un transformateur et l'inondation du bâtiment d'un réacteur ont été causés par des déplacements ou des tassements pouvant atteindre environ 1.5 m.

Les analyses réalisées dans le cadre des études sismiques du site de la KKM existante ont montré qu'une accélération du sol de 1.0 g pouvait entraîner des déplacements et des tassements de 12 cm au maximum. Pour la conception de l'EKKM, il est prévu de réaliser des études géotechniques des déplacements et tassements spécifiques au site ; les mouvements différenciés des bâtiments, structures et composantes en cas de séisme peuvent être pris en compte lors de la conception.

Lors de l'événement de la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa, de la radioactivité a été émise depuis une piscine de stockage d'éléments combustibles en raison de la défaillance de l'alimentation électrique de deux bâtiments du réacteur. Une conception appropriée de l'EKKM peut permettre d'éviter une défaillance de ce type ainsi que l'affouillement des alimentations électriques souterraines des différents bâtiments.

3.6.2.23 Vents extrêmes, tornades

Les vents extrêmes (bourrasques) et les tornades peuvent mettre l'intégrité des bâtiments en danger sur le site si elles dépassent la capacité portante des structures. Cela pourrait provoquer l'effondrement de murs ou le basculement de bâtiments par l'action directe ou indirecte du vent, à la suite de projection d'objets agissant comme des projectiles et pouvant endommager ou détruire des structures de l'installation. En outre, les expériences internationales existantes montrent qu'en cas de vents violents, ce sont les installations du réseau de transmission qui sont le plus fréquemment touchées par les vents violents. Pour l'installation nucléaire, cela aurait pour conséquence qu'il faudrait compter sur une perte de l'alimentation externe en électricité en cas de vents extrêmes ou de tornades.

Grâce à la conception de l'installation nucléaire selon les normes de construction en vigueur et les exigences de l'ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2], qui prescrit une conception permettant de résister à l'impact de tremblements de terre importants et de chutes accidentelles d'avions, les bâtiments liés à la sécurité sont très bien protégés de l'impact des vents extrêmes et des tornades. Conformément à l'ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2], la perte d'alimentation externe en électricité est également maîtrisée sans conséquence sur la sécurité nucléaire.

Fréquence des vents extrêmes

L'analyse détaillée des données (voir chap. 3.3.3) montre que sur le site de Niederruntigen, où la KKM exploite une station météo depuis sa mise en exploitation (mât météo de Mühleberg), la bourrasque la plus forte a été enregistrée pendant la tempête « Lothar » en décembre 1999. A 10 m au-dessus du sol, on a enregistré une vitesse maximale du vent de 102 km/h. Lors de la même tempête, des rafales ayant des vitesses de pointe allant jusqu'à 158 km/h ont été mesurées en plaine. Le site de Niederruntigen se caractérise donc par le fait que les collines avoisinantes le protègent et atténuent nettement la force du vent par rapport au reste du Plateau et à la plaine. Pour déterminer le risque, il convient de déterminer la probabilité d'occurrence de vents nettement plus importants à l'aide d'une analyse statistique des valeurs extrêmes.

L'analyse des valeurs extrêmes (voir chap. 3.3.4) qui a permis d'étudier les vitesses de pointe maximales de rafales des années 1987 à 2007 donne les forces de vent suivantes pour le site de Niederruntigen (vitesses de pointe de rafale), Tableau 3.6-2 :

Tableau 3.6-2 : Vitesse de pointe des rafales sur le site (10 m au-dessus du sol conformément à l'analyse des valeurs extrêmes du chapitre 3.3.4)

Période de retour	Force du vent (km/h)	Intervalle de confiance (km/h)
50 ans	93.6	[84.2 ; 105.1]
100 ans	96.1	[86.0 ; 108.7]
200 ans	98.3	[87.5 ; 112.3]
1 000 ans	102.2	[89.6 ; 119.2]
10 000 ans	106.6	[92.2 ; 127.1]

Il est possible de respecter les normes de construction même pour les forces de vent ayant une période de retour de 10 000 ans (pour l'impact sur les structures portantes de Mühleberg, la norme SIA 261 prescrit par exemple une valeur de 0.9 kN/m² à une hauteur de 10 m au-dessus du sol, ce qui correspond, converti en vitesse du vent, à environ 135 km/h).

Fréquence des tornades

On observe deux à trois tornades chaque année en Suisse (voir chap. 3.3.4). Aucun phénomène météorologique de ce type n'est cependant survenu dans les environs proches de Niederruntigen. Depuis 1983, les météorologues enregistrent systématiquement les tornades. L'analyse de ces données indique les fréquences suivantes des tornades en Suisse (voir Tableau 3.6-3) :

Tableau 3.6-3 : Fréquence des tornades en Suisse

Echelle de Fujita	Fréquence en Suisse (par an)
F0	1.58
F1	7.08E-01
F2	2.24E-01
F3	5.23E-02
F4	9.24E-03
F5	1.40E-03

Ce risque se rapporte cependant à toute la superficie de la Suisse. En tenant compte de la surface où la tornade provoque des dégâts et en se basant sur l'hypothèse que l'occurrence des tornades est distribuée de manière uniforme en Suisse et que le périmètre de la centrale a des dimensions d'environ 400 m x 400 m, le risque est le suivant pour le site de Niederruntigen, Tableau 3.6-4 :

Tableau 3.6-4 : fréquence des tornades sur le site

Echelle de Fujita	Fréquence à Niederruntigen (par an)
F0	9.2945 E-5
F1	4.1529 E-5
F2	1.9261 E-5
F3	1.1349 E-5
F4	3.4014 E-6
F5	5.1513 E-7
Total	1.6960 E-4

Risque indirect potentiel lié aux vents extrêmes et aux tornades

On peut identifier les scénarios suivants comme risques indirects ou événements consécutifs à des vents extrêmes ou à des tornades :

- a) Perte de l'alimentation externe en électricité en raison du dépassement de la limite de charge des lignes du réseau d'électricité ;
- b) Pénétration d'eau, onde de pression pendant le passage d'un vent extrême ou d'une tornade, bris des vitrages ;
- c) Dégâts causés par le choc d'objets entraînés par le vent ou la tornade (similaires à des projectiles avec les tornades).

A propos de a) : les analyses de risque se basent sur une perte totale de l'alimentation externe en électricité à la suite de tornades. On fait de même pour les vents extrêmes ayant une vitesse de plus de 180 km/h, car de telles vitesses correspondent à la fourchette inférieure de vitesses des tornades de force F2.

A propos de b) : la partie nucléaire (nuclear island) des nouvelles conceptions d'installations ne comportent pas de vitrages, de sorte que ce risque peut être exclu.

A propos de c) : l'impact de ces risques est couvert par les études relatives aux chutes d'avions (voir chap. 3.6.2.25) et aux séismes (voir chap. 3.6.2.22).

Résumé

Les données météorologiques montrent clairement que le site de Niederruntigen est bien protégé des vents forts de par sa position repliée dans la vallée de l'Aar. Les fortes tornades sont en outre peu fréquentes (bien que cette affirmation ne soit pas spécifique au site). Les exigences de l'ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2] concernant la conception d'une nouvelle installation couvrent les directives en matière de dimensionnement pour les charges de vent, de sorte que les vents extrêmes et les tornades ne représentent qu'une part très faible du risque pour les installations en raison de leur faible fréquence d'occurrence et du dimensionnement des bâtiments.

Les risques (directs et indirects) résultant des vents extrêmes et des tornades seront examinés en détail lors de l'étude de projet de la nouvelle installation, en tenant compte des exigences des autorités.

3.6.2.24 Inondation

Le chapitre 3.4.3 présente les événements d'inondation et leurs conséquences pour le site de Niederruntigen. Le dimensionnement de la terrasse et la conception de l'installation assureront une protection suffisante contre l'impact d'inondations (crues, rupture de barrage).

3.6.2.25 Chute accidentelle d'avion

La chute d'un avion peut menacer une installation nucléaire sur le site de Niederruntigen. Selon les exigences des autorités de surveillance relatives à sa conception, la sécurité nucléaire doit pouvoir être assurée même en cas de chute d'avion. Les ouvrages liés à la sécurité doivent donc être dimensionnés en conséquence.

On détermine la fréquence d'une chute accidentelle d'avion à l'aide de modèles de calcul basés sur la topologie de l'espace aérien, le nombre de mouvements d'avions et l'expérience internationale en la matière. Les modèles de calcul se basent sur la considération que la fréquence F' d'une chute accidentelle d'avion dépend de manière linéaire des trois facteurs que sont le « nombre de mouvements d'avions » N , la « probabilité de chute par mouvement d'avion » C et la « probabilité conditionnelle de chute dans une surface carrée (1 km^2) au point x, y » $f(x, y)$:

$$F' = N \cdot C \cdot f(x, y)$$

Si l'on multiplie cette valeur F' par la « surface virtuelle des bâtiments » A spécifique à l'installation ou aux bâtiments ($F = F' \times A$), on obtient la fréquence spécifique à l'installation ou aux bâtiments de chute accidentelle d'avion F pour le site (x, y) . Cette dernière ne sera calculée que lorsque la phase de construction de la nouvelle centrale nucléaire se concrétisera car il faut pour cela connaître les dimensions des bâtiments et du site. Indépendamment de cela, il est d'ores et déjà possible de calculer la fréquence d'une chute accidentelle d'avion par kilomètre carré F' .

La topologie de l'espace aérien dans un environnement de 50 km autour de Niederruntigen comprend :

- 4 aéroports régionaux (Berne-Belp, Ecuwillens, Granges/Grenchen, Les Eplatures)
- 11 aérodromes (Bellechasse, Bienne-Kappelen, Courtelary, Delémont [Corroux], Gruyères, Langenthal, Môtiers, Neuchâtel, Reichenbach, Thoun, Zweisimmen)
- 1 aérodrome militaire (Payerne).

Les corridors aériens reliant Zurich à Genève et les corridors d'accès de l'aérodrome militaire de Payerne vers les zones d'exercice de l'Oberland bernois et du Jura concernent également le site de Niederruntigen.

L'expérience internationale en matière de chute d'avion montre qu'il est utile, pour analyser les données disponibles, de regrouper les fréquences de chute par catégorie de poids et éventuellement par phase de vol :

- gros porteurs (poids supérieur à 20 t), subdivisés par phase de vol :
vol de croisière, décollage/atterrissage ;

- avions (poids situé entre 5.7 et 20 t), subdivisés par phase de vol : vol de croisière, décollage/atterrissage
- avions légers (poids inférieur à 5.7 t), subdivisés par phase de vol : vol de croisière, décollage/atterrissage ;
- avions militaires (poids situé entre 5.7 et 20 t et poids inférieur à 5.7 t), subdivisés par phase de vol : vol de croisière, décollage/atterrissage.

Fréquence de chute des gros porteurs

Les gros porteurs de plus de 20 t ne décollent et n'atterrissent que des aéroports de Berne-Belp et de Payerne, et la proportion d'appareils de ce type est faible sur ces deux sites par rapport au nombre total de mouvements annuels.

A Berne-Belp, ce sont en moyenne $N = 5000$ avions de plus de 20 t qui décollent et atterrissent chaque année. Ce nombre de mouvements est tiré des calculs de données de l'Office fédéral de la statistique OFS pour la période 1995–2007 [97]. Pour calculer N , les chiffres concernant tous les types d'avions ont été répartis par catégorie de poids à partir des données de l'aéroport de Berne-Belp pour l'année 2005. Selon les données de cet aéroport, le nombre de mouvements a eu tendance à baisser depuis 1980 et s'est stabilisé au cours des dernières années. On peut supposer que cela correspondra également aux futurs mouvements d'avions car aucune évolution de l'importance de l'aéroport de Berne-Belp en matière de transports aériens ne semble prévisible malgré la récente prolongation des pistes. Une étude de l'Office fédéral de l'aviation civile OFAC [96] se base également sur cette hypothèse, en prévoyant une hausse moyenne des mouvements d'avions de 2000 à 2020 dans les aéroports régionaux de seulement 0.1% par an.

A Payerne, on a $N < 30$ par an. Ce chiffre se base sur les années de référence 2006 et 2007 à partir d'un calcul de tous les mouvements d'avions de l'aéroport de Payerne sur la période allant de 1999 à 2007. Le risque que présentent les décollages et les atterrissages d'avions de plus de 20 t à Payerne est en raison de ce petit nombre d'un ordre de grandeur plus faible (env. 10^{-10}) que les deux autres chiffres, il est donc négligeable pour le calcul.

Différentes sources de données génériques ont été utilisées pour déterminer la probabilité de chute par mouvement d'avion : les statistiques de Boeing [98], du ministère américain de l'énergie USDOE [99], une étude réalisée pour l'aéroport de Zurich [100], ainsi que les valeurs proposées par l'autorité de surveillance [93] et une analyse de l'historique des chutes d'avion en Suisse [101], [97]. Cette dernière étude montre qu'entre 1960 et 2007, pour 12.3 millions de mouvements d'avions ayant un poids > 20 t en Suisse, seuls 6 chutes se sont produites au décollage ou à l'atterrissage.

La probabilité de chute par décollage et atterrissage (C) est calculée à l'aide d'un arbre logique avec pondération des différentes méthodes. La prise en compte de différentes sources de données réduit l'incertitude inhérente au modèle. Les données des statistiques des accidents ont une pondération élevée de 0.5 car elles se basent exclusivement sur des données suisses et des avions de la catégorie de poids > 20 t. Toutes les autres méthodes prennent en compte des avions des catégories de poids 1 et 2 (avions > 5.7 t). La méthode proposée par les autorités [93] reçoit une pondération de 0.2 car il s'agit d'une procédure plus récente. L'étude de l'aéroport de Zurich reçoit une pondération de 0.15. Les statistiques de l'USDOE ont une précision statistique certes plus élevée que les données suisses en raison de la plus grande quantité de données sur

laquelle elles se basent, mais ces valeurs ne concernent que les Etats-Unis jusqu'en 1996. C'est pourquoi cette méthode reçoit une pondération de 0.12. Les statistiques de Boeing utilisent des données du monde entier et constituent une valeur « upper bound » pour la Suisse car elles comportent des données de compagnies de charters de toutes origines. Elles reçoivent donc une pondération faible de 0.03. Les chiffres des dix dernières années reçoivent une pondération plus forte car ils offrent une meilleure image de la sécurité aérienne actuelle à la suite de l'évolution technique des transports aériens. Le Tableau 3.6-5 illustre la probabilité de chute de gros avions au décollage et à l'atterrissage.

Tableau 3.6-5 : Calcul de C, gros porteurs, décollage et atterrissage, Berne-Belp

Calcul de C, le taux de chute par mouvement d'avion en phase de décollage et d'atterrissage	C	Berne-Belp	> 20 t	Décollage & atterrissage	Moyenne	5.3E-07
					σ	2.39E-07
	Modèle	Pondération	Paramètre	Pondération	C	Pondération finale
	Statistiques des accidents	0.5	95° percentile	0.05	6.33E-07	0.025
			Best estimate	0.9	4.87E-07	0.450
			5° percentile	0.05	3.64E-07	0.025
	Réf. [93]	0.2	95° percentile	0.05	1.68E-06	0.010
			Mean	0.9	7.80E-07	0.180
			5° percentile	0.05	1.86E-07	0.010
	Boeing (commercial > 5.7 t)	0.03	1993 à 2003	0.6	7.20E-07	0.018
			1959 à 2003	0.4	1.24E-06	0.012
	USDOE (commercial > 5.7 t)	0.12	N.A.	--	4.80E-07	0.120
	Aéroport de Zurich (commercial > 5.7 t)	0.15	N.A.	--	3.10E-07	0.150

La prise en compte des différentes sources de données conduit à une probabilité de chute par décollage ou atterrissage de gros porteurs > 20 t de C = 5.4E-07.

La prise en compte de la situation géographique et de l'expérience internationale qui montre que la probabilité conditionnelle de chute est d'autant plus grande que l'événement se situe près de la piste et dans son axe s'effectue grâce au facteur $f(x, y)$.

Le modèle proposé par les autorités [93] et la procédure standard américaine selon l'USDOE sont intégrés au calcul. Le modèle des autorités se voit affecter une pondération faible de 0.1 car il n'inclut pas explicitement la distance par rapport à l'aéroport ni l'orientation des pistes. En outre, l'altitude de vol des avions à une distance de 50 km de l'aéroport varie fortement.

Selon les calculs des paramètres pondérés du modèle conformément au Tableau 3.6-6, ce facteur est de $f(x, y) = 1.2E-05$ par kilomètre carré pour le site de Niederruntigen pour les décollages et les atterrissages à Berne-Belp.

Tableau 3.6-6 : Calcul de $f(x, y)$, gros porteurs, décollage et atterrissage, Berne-Belp

Calcul de $f(x, y)$, probabilité conditionnelle de chute d'avion par kilomètre carré	f	Berne-Belp	> 20 t	Décollage & atterrissage	Moyenne	1.23E-05
					σ	2.51E-05
	Modèle	Pondération	Paramètre	Pondération	F	Pondération finale
	Réf. [93]	0.1	Lower bound	0.10	1.01E-05	0.01000
			Best estimate	0.85	6.88E-05	0.08500
			Upper bound	0.05	1.28E-04	0.00500
	USDOE	0.9	Lower bound	0.10	3.49E-07	0.09000
			Best estimate Takeoff	0.40	3.36E-06	0.36000
			Best estimate Landing	0.40	3.63E-06	0.36000
			Upper bound	0.10	3.49E-05	0.09000

La multiplication des trois facteurs ci-dessus, en tenant compte des incertitudes, donne un risque pour le site de Niederruntigen lié au décollage et à l'atterrissage d'avions de plus de 20 t à Berne-Belp de $F' = 3.9E-08$ par an et par kilomètre carré.

De nombreux gros porteurs ayant un poids de plus de 20 t utilisent le corridor de transit au-dessus du site de Niederruntigen. Les estimations et les simulations de l'espace aérien basées sur les données de l'IFR annual flights de skyguide ([102] à [104]) sur la période de 1999 à 2006 permettent de conclure qu'il y a près de $N = 266\,000$ gros porteurs chaque année dans ce corridor aérien. La tendance des dernières années montre que le nombre de mouvements d'avions a augmenté de manière continue depuis le fort recul enregistré après le 11 septembre 2001. Il est donc possible de partir du principe que le trafic aérien et notamment le corridor Zurich-Genève prendra de l'importance à l'avenir. Une étude de l'OFAC [96] table sur une hausse moyenne des mouvements d'avions de 2.9% par an. La hausse des mouvements d'avions N se traduit également par une hausse de la probabilité de chute accidentelle d'avion sur le site de Niederruntigen.

L'analyse des statistiques d'accidents aériens de Boeing montre clairement que la probabilité de chute pendant un vol de croisière est nettement plus faible qu'au décollage et plus particulièrement qu'à l'atterrissage. Ces statistiques indiquent que 18.5% des accidents ont lieu pendant la phase de vol de croisière. En tenant compte des données spécifiques à la Suisse, on obtient une probabilité de chute de $C = 9.0E-08$ par mouvement d'avion pendant la phase de vol de croisière.

Pour déterminer la probabilité conditionnelle que la chute d'un avion situé dans le corridor au-dessus de Niederruntigen touche le site, des considérations d'ordre géométrique s'imposent. On suppose pour cela que cette probabilité est inversement proportionnelle au produit de la largeur du corridor et de la longueur moyenne de la distance du vol de croisière. Les statistiques de Boeing montrent que la durée moyenne d'un vol est de 1.5h ; multipliée par une vitesse moyenne pondérée, cela donne une distance de vol moyenne de 1105 km. La largeur pondérée des deux corridors aériens au-dessus du site de Niederruntigen peut être estimée à environ 20 km à partir des images des voies aériennes et des indications de l'agence de surveillance de l'espace aérien. Ceci donne une probabilité conditionnelle de chute pendant la phase de vol de croisière sur le site de Niederruntigen de $f(x, y) = 4.9E-05$ par kilomètre carré.

Selon la même approche que lors des chutes survenant lors des décollages et atterrissages, c'est-à-dire en multipliant les trois facteurs, on obtient une fréquence des chutes sur le site de Niederruntigen pour les gros porteurs (> 20 t) en phase de vol de croisière de $F' = 1.3E-06$ par an et par kilomètre carré. Les autorités de surveillance et l'USDOE utilisent d'autres modèles de détermination de la fréquence des chutes d'avions qui aboutissent cependant à des valeurs nettement inférieures. Pour intégrer l'incertitude épistémique inhérente à ces modèles, ils sont également pris en compte dans un calcul pondéré. Pour le modèle de [93] le calcul a été effectué avec un facteur de lissage de $g = 17$, une distance horizontale de $b = 0$, un taux de chute prédéfini $P = 5.8E-11$ et une altitude de vol de $= 9$ km.

Ceci donne finalement une fréquence de chute pour les gros porteurs en vol de croisière de $F' = 7.0E-07$ par an et par kilomètre carré sur le site de Niederruntigen, voir Tableau 3.6-7.

Tableau 3.6-7 : Calcul de $F' = N^* - C \cdot f(x, y)$, gros porteurs, vol de croisière, Zurich-Genève

Calcul de F' , probabilité de chute sur le site en vol de croisière	F'	Zurich-Genève	> 20 t	Vol de croisière	Moyenne	6.98E-07
					StdDev	8.68E-07
	Modèle	Pondération	Paramètre	Pondération	NPf	Pondération finale
	Statistiques des accidents	0.45	Upper bound (95° quantile)	0.05	2.83E-06	0.023
			Best estimate (mean)	0.9	1.25E-06	0.405
			Lower bound (5° quantile)	0.05	3.80E-07	0.023
	Réf. [93]	0.45	Upper bound (95° quantile)	0.05	1.46E-07	0.023
			Best estimate (mean)	0.9	6.74E-08	0.405
			Lower bound (5° quantile)	0.05	*2.25E-08	0.023
	USDOE	0.1	Maximum	0.05	5.00E-06	0.005
			Average Conus	0.9	7.00E-07	0.09
			Minimum	0.05	2.35E-07	0.005

Le risque global sur le site de Niederruntigen lié aux chutes accidentelles d'avions d'un poids de plus de 20 t pendant les deux phases de vol est donc au total de $F' = 7.4E-07$ par an et kilomètre carré.

Fréquence de chute des aéronefs de taille moyenne

Ce sont les décollages et les atterrissages dans les aéroports régionaux de Berne-Belp, Grenchen, Ecuwillens et Les Eplatures qui sont déterminants pour les avions de la catégorie de poids de 5.7 à 20 t.

D'après les données de l'exploitant de l'aéroport de Berne-Belp, à partir des chiffres de 2005, on estime en moyenne à près de $N = 6900$ le nombre d'avions de cette catégorie de poids qui ont décollé et atterri à Berne-Belp pendant la période allant de 1997 à 2007. Selon les données de l'aéroport de Grenchen, de 2005 à 2007, ce sont en moyenne $N = 3300$ décollages et atterrissages d'avions de cette catégorie de poids qui ont lieu chaque année. A partir des données de l'aéroport d'Ecuwillens de 2005 à 2007, on enregistre en moyenne $N = 400$ décollages et atterrissages d'avions de cette catégorie de poids. Selon les données de l'aéroport des Eplatures, de 2005 à 2007, on enregistre en moyenne $N = 300$ décollages et atterrissages d'avions de cette catégorie de poids chaque année.

Depuis 1980, le nombre de mouvements d'avions de taille moyenne a toujours eu tendance à diminuer à Berne-Belp. On peut donc supposer que le nombre de mouvements correspondra aussi au nombre futur de vols, car aucune modification dans l'importance de l'aéroport régional de Berne-Belp en termes de transports n'est à prévoir. Pour les trois aéroports régionaux de Grenchen, Ecuwillens et Les Eplatures, les mouvements sont restés stables sur la période de trois ans observée. La courte période sur laquelle les données ont été relevées ne permet cependant pas de se prononcer sur l'état du trafic à l'avenir. On peut cependant supposer qu'aucun changement n'est à attendre quant à l'importance des aéroports régionaux en termes de transports et que le nombre de mouvements d'avions ne va pas croître de manière supérieure à la moyenne. Une étude de l'OFAC [96] pose les mêmes hypothèses, en prévoyant une hausse de 0.1% par an des mouvements d'avions entre 2000 et 2020.

Pour déterminer la fréquence des chutes sur le site de Niederruntigen, on choisit pour cette catégorie de poids la même méthode aussi bien pour la probabilité de chute que pour la probabilité conditionnelle de chute sur le site de Niederruntigen.

La prise en compte des différentes sources de données donne une probabilité de chute par décollage ou atterrissage d'avion ayant un poids entre 5.7 et 20 t de $C = 6.6E-07$, voir Tableau 3.6-9.

Tableau 3.6-8 : Calcul de C, avions moyens, décollage et atterrissage, aéroports régionaux

Calcul de C, le taux de chute par mouvement d'avion en phase de décollage et d'atterrissage	C	Aéroports régionaux	5.7 t < x < 20 t	Décollage & atterrissage	Mean	6.57E-07
					σ	2.52E-07
	Modèle	Pondération	Paramètre	Pondération	P	Pondération finale
	Statistiques des accidents	0.5	95° percentile	0.05	9.50E-07	0.025
			Best estimate	0.9	7.31E-07	0.450
			5° percentile	0.05	5.47E-07	0.025
	Réf. [93]	0.2	95° percentile	0.05	1.68E-06	0.010
			Mean	0.9	7.80E-07	0.180
			5° percentile	0.05	1.86E-07	0.010
	Boeing (commercial > 5.7 t)	0.03	1993 à 2003	0.6	7.20E-07	0.018
			1959 à 2003	0.4	1.24E-06	0.012
	USDOE (Commercial > 5.7 t)	0.12	N.A.	--	4.80E-07	0.120
	Aéroport de Zurich (commercial > 5.7 t)	0.15	N.A.	--	3.10E-07	0.150

La probabilité conditionnelle d'une chute d'avion sur le site de Niederruntigen lors d'un décollage ou d'un atterrissage dans les différents aéroports régionaux est calculée de la même manière que pour les gros porteurs (> 20 t), sous forme de moyenne pondérée selon le modèle proposé par les autorités et selon la méthode de l'USDOE. On obtient une valeur pour la probabilité conditionnelle de chute d'avion sur le site de Niederruntigen de $f(x, y) = 1.8E-05$ par kilomètre carré pour Berne-Belp, $8.2E-06$ par kilomètre carré pour Grenchen, $9.1E-06$ par kilomètre carré pour Ecuwillens et $8.2E-06$ par kilomètre carré pour Les Eplatures.

La multiplication des trois facteurs et la prise en compte des incertitudes donne un risque pour le site de Niederruntigen de $F' = 8.9E-08$ par an et par kilomètre carré pour les décollages et atterrissages à Berne-Belp. De la même manière, on obtient $F' = 2.0E-08$ par an et par kilomètre carré pour les décollages et atterrissages à Grenchen, et pour Ecuwillens et Les Eplatures $F' = 3.2E-09$ et $F' = 2.1E-09$ par an et par kilomètre carré.

Selon les chiffres de Skyguide de 1999 à 2006, ce sont chaque année en moyenne près de $N = 29\,500$ avions civils de la catégorie de poids 5.7-20 t qui passent en vol de croisière au-dessus du site de Niederruntigen. Selon la même méthode que pour les gros porteurs, il en résulte un risque pour les avions de ce type en vol de croisière de $F' = 2.0E-07$ par an et par kilomètre carré.

Il en résulte un risque total pour le site de Niederruntigen lié aux chutes d'avions de taille moyenne ayant un poids situé entre 5.7 et 20 t pendant les deux phases de vol de $F' = 3.1E-07$ par an et par kilomètre carré.

Fréquence de chute d'avions légers

Les chutes d'avions légers, c'est-à-dire ayant un poids inférieur à 5.7 t, constituent un autre potentiel de risque pour le site de Niederruntigen.

Outre l'aéroport de Berne-Belp et les aéroports régionaux de Grenchen, Ecuwillens et Les Eplatures, les décollages et atterrissages sur les aérodromes environnants sont eux aussi déterminants pour cette catégorie de poids. Il s'agit des aérodromes de Bellechasse, Bienne-Kappelen, Courtelary, Delémont [Corroux], Gruyères, Langenthal, Môtiers, Neuchâtel, Reichenbach, Thoun et Zweisimmen.

En raison du manque de données sur les différents mouvements d'avions enregistrés sur tous les aérodromes, on utilise une méthode adaptée pour les avions légers. Le taux de chute est donc calculé par an et pas par mouvement d'avion par an. Selon les données de l'OFAC, 64 avions de la catégorie de poids 3 ont chuté pendant la phase de décollage et d'atterrissage entre 1980 et 2006. Il existe en Suisse 68 aéroports et aérodromes permettant aux avions légers d'atterrir. Seize d'entre eux se trouvent à proximité de Niederruntigen, c'est-à-dire à une distance inférieure à 50 km. Si l'on considère la chute d'un avion léger, la probabilité qu'il ait lieu sur un aérodrome proche de Niederruntigen est de $P = 0.235$. En tenant compte de toutes les chutes depuis 1980, la probabilité de chute est de $P = 0.56$ par an pour les avions légers.

Pour déterminer la probabilité conditionnelle qu'une chute liée au décollage ou à l'atterrissage d'un avion léger à proximité touche le site de Niederruntigen, des considérations d'ordre géométrique s'imposent. Selon l'approche standard de l'USDOE, chaque aéroport se voit attribuer une probabilité en fonction de sa distance et de sa situation par rapport au site de Niederruntigen. Les différents aéroports n'ayant pas la même importance quant au nombre de mouvements d'avions, ils ont reçu une pondération conformément aux données liées aux mouvements de 2007.

Le calcul donne une probabilité conditionnelle de chute en phase de décollage et d'atterrissage d'avions légers sur le site de Niederruntigen de $f(x, y) = 2.9E-06$ par kilomètre carré, voir Tableau 3.6-9

Tableau 3.6-9 : Calcul de $f(x, y)$, avions légers, décollage et atterrissage, aéroports et champs d'aviation

Calcul de $f(x,y)$, probabilité conditionnelle de chute d'avion par kilomètre carré, en cas de chute	f	< 5.7 t	Décollage & atterrissage				Moyenne	2.90E-06
							σ	1.65E-05
	Aéroport	Coord.	Distance [km]	Phase	f par phase	f par aéroport	Mouvements 2007	Pondération
	Bellechasse	x	10.0	Atterrissage	1.93E-04	1.10E-04	4 612	0.01969
		y	2.5	Décollage	2.72E-05			
	Bienne- Kappel.	x	10.5	Atterrissage	2.12E-05	1.11E-05	7 097	0.03030
		y	8.5	Décollage	1.00E-06			
	Berne-Belp	x	15.6	Atterrissage	4.66E-06	2.38E-06	42 825	0.18284
		y	9.0	Décollage	1.00E-07			
	Grenchen	x	19.5	Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	64 930	0.27722
		y	17.0	Décollage	1.00E-07			
	Ecuvillens	x	11.0	Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	22 732	0.09706
		y	24.0	Décollage	1.00E-07			
	Courtelary	x	27.5	Atterrissage	3.86E-06	1.98E-06	8 445	0.03606
		y	0.0	Décollage	1.00E-07			
	Eplatures	x	>>	Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	10 921	0.04663
		y		Décollage	1.00E-07			
	Delemont	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	N.A.	N.A.
		y		Décollage	1.00E-07			
	Gruyères	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	17 282	0.07379
		y		Décollage	1.00E-07			

Calcul de $f(x,y)$, probabilité conditionnelle de chute d'avion par kilomètre carré, en cas de chute	f	< 5.7 t	Décollage & atterrissage				Moyenne	2.90E-06
							σ	1.65E-05
	Aéroport	Coord.	Distance [km]	Phase	f par phase	f par aéroport	Mouvements 2007	Pondération
	Langenthal	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	15 461	0.06601
		y		Décollage	1.00E-07			
	Môtiers	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	2 253	0.00962
		y		Décollage	1.00E-07			
	Neuchâtel	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	14 711	0.06281
		y		Décollage	1.00E-07			
	Reichenbach	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	5 662	0.02417
		y		Décollage	1.00E-07			
	Thoune	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	10 865	0.04639
		y		Décollage	1.00E-07			
	Zweisimmen	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	6 263	0.02674
		y		Décollage	1.00E-07			
	Payerne	x		Atterrissage	1.00E-07	1.00E-07	159	0.00068
		y		Décollage	1.00E-07			

La multiplication des deux facteurs P et $f(x, y)$, en tenant compte des incertitudes, donne une fréquence des chutes liées aux décollages et atterrissages d'avions légers (< 5.7 t) sur le site de Niederruntigen de $F' = 1.8E-06$ par an et par kilomètre carré.

A cela s'ajoutent les chutes potentielles d'avions légers en phase de vol de croisière. On ne peut calculer le taux de chute que par an, comme pour la phase de décollage et d'atterrissage. Selon les données de l'OFAC, on a enregistré au total 165 chutes d'avions légers (hélicoptères inclus) entre 1980 et 2006. Ceci donne une probabilité de chute de $P = 6.1$ par an pour l'ensemble de la Suisse. Les avions légers ne volant pas dans des corridors aériens donnés, un accident peut survenir en tout endroit de la Suisse. C'est pourquoi la probabilité de chute est divisée par la superficie totale de la Suisse ($41\,285\text{ km}^2$) pour calculer la probabilité de chute conditionnelle sur le site de Niederruntigen pour les avions légers en vol de croisière. Ceci donne une probabilité conditionnelle de chute pendant la phase de vol de croisière sur le site de Niederruntigen de $f(x, y) = 2.4\text{E-}05$ par kilomètre carré.

On obtient, en multipliant les deux facteurs P et $f(x, y)$ et en tenant compte des incertitudes, une fréquence de chute sur le site de Niederruntigen pour les avions légers ($< 5.7\text{ t}$) en phase de vol de croisière de $F' = 1.6\text{E-}04$

On obtient ainsi un risque global pour le site de Niederruntigen lié aux chutes d'avions légers pendant les deux phases de vol de $F' = 1.7\text{E-}04$ par an et par kilomètre carré au total.

Le nombre de vols privés est resté constant en Suisse ces dernières années, il dépend principalement de la météo. L'étude de l'OFAC [96] s'appuie également sur ce constat : elle prévoit que le trafic aérien privé restera constant en Suisse jusqu'en 2030.

Fréquence de chute des avions militaires

Les chutes d'aéronefs militaires constituent un autre potentiel de risque pour le site de Niederruntigen. On distingue les aéronefs par catégorie de poids, de 5.7 à 20 t et inférieurs à 5.7 t . On a $N = 5\,200$ mouvements d'aéronefs militaires de taille moyenne qui concernent le site de Niederruntigen chaque année selon les données de l'aéroport de Payerne.

L'analyse des statistiques d'accidents militaires suisses [105] sur la période allant de 1985 à 2006 donne un taux de chute par mouvement d'avion de $C = 1.3\text{E-}06$ en phase de décollage et d'atterrissage pour les avions militaires de la catégorie de poids moyenne. Les types d'avions réformés ou n'étant encore que très rarement utilisés ont reçu une pondération plus faible lors de l'analyse.

La méthode basée sur des enquêtes statistiques effectives de l'USDOE et la méthode prescrite par les autorités ont été utilisées et pondérées pour calculer la probabilité conditionnelle d'une chute sur le site de Niederruntigen, avec un facteur de lissage de $g = 8$ et une altitude de vol moyenne de $h = 3$.

Ceci donne une valeur de $f(x, y) = 5.7\text{E-}05$ pour les décollages et atterrissages d'aéronefs militaires de taille moyenne sur le site de Niederruntigen, voir Tableau 3.6-10.

Tableau 3.6-10 : Calcul de $f(x, y)$, avions militaires de taille moyenne, décollage et atterrissage, Payerne

Calcul de $f(x, y)$, probabilité conditionnelle de chute d'avion par kilomètre carré	f	Payerne	5.7 t < m < 20 t	Décollage & atterrissage	Moyenne	5.70E-05
					σ	2.04E-04
	Modèle	Pondération	Paramètre	Pondération	f	Pondération finale
	Réf. [93]	0.1	Lower bound	0.10	5.53E-05	0.010
			Best estimate	0.85	5.53E-04	0.085
			Upper bound	0.05	1.20E-03	0.005
	USDOE	0.9	Lower bound	0.10	2.17E-07	0.090
			Best estimate (takeoff)	0.40	1.00E-06	0.360
			Best estimate (landing)	0.40	3.33E-06	0.360
			Upper bound	0.10	2.17E-05	0.090

En tenant compte des incertitudes, le risque qui en résulte pour le site de Niederruntigen est de $F' = 4.5E-07$ par an et par kilomètre carré pour les chutes d'aéronefs militaires de taille moyenne arrivant à Payerne ou en partant.

Le nombre de mouvements d'avions par an en phase de vol de croisière peut également être calculé à partir des données [105] relatives aux décollages et atterrissages d'avions militaires. Seules les années 1998 à 2007 ont été prises en compte en raison de la forte baisse du nombre de mouvements d'avions militaires. Le nombre total de mouvements d'aéronefs militaires de taille moyenne est estimé à la moitié des décollages et atterrissages pendant la période allant de 1998 à 2007, soit 163 000 mouvements.

Cela donne environ 16 300 mouvements d'aéronefs militaires de taille moyenne en Suisse par an. Cette valeur est cependant trop prudente car cela suppose que chaque avion militaire puisse survoler le site de Niederruntigen. Ce n'est pas le cas en réalité car les avions militaires se déplacent principalement d'aéroport en aéroport ou dans les corridors d'accès à leurs zones d'exercice. Les accès aux zones d'exercice du Jura et des Alpes passent à une certaine distance du site de Niederruntigen. C'est pourquoi les 16 300 mouvements pour le site de Niederruntigen sont une valeur « upper bound », considérée comme le 95^e quantile d'une distribution logarithmico-normale avec un facteur d'erreur = 5. Ceci donne une moyenne de près de $N = 5\,300$ mouvements d'avions militaires de taille moyenne qui croisent à proximité directe du site de Niederruntigen.

L'analyse des statistiques suisses des accidents militaires [105] survenus entre 1985 et 2007 indique que pendant cette période, 4 chutes d'aéronefs militaires se sont produites pendant la phase de vol de croisière dans l'ensemble de la Suisse. Les types d'avions réformés ou n'étant encore que très rarement utilisés ont reçu une pondération plus faible lors de l'analyse. Ceci donne un taux de chute par mouvement d'avion en Suisse pour les avions militaires de catégorie de poids moyenne de $C = 4.2E-06$ pour la phase de vol. Les jets militaires ne respectant en général pas de corridors aériens et survolant l'ensemble de la Suisse, on peut partir du principe que les chutes font l'objet d'une distribution uniforme sur l'ensemble du pays. C'est pourquoi la valeur de $1/\text{la superficie de la Suisse}$, c'est-à-dire $f = 2.4E-5$ par kilomètre carré, a été utilisée pour déterminer la probabilité conditionnelle de chute en phase de vol de croisière sur un site précis.

La multiplication de ces trois facteurs donne donc le risque pour le site de Niederruntigen. En tenant compte des incertitudes, il est égal à $F' = 5.3E-07$ par an et par kilomètre carré pour les chutes d'aéronefs militaires ayant un poids situé entre 5.7 et 20 t en phase de vol.

Le risque qui en résulte pour le site de Niederruntigen lié aux chutes d'aéronefs militaires de la catégorie de poids de 5.7 à 20 t pendant les deux phases de vol s'élève donc à $F' = 9.8E-07$ par an et par kilomètre carré.

Le site est également concerné par les aéronefs militaires légers (< 5.7 t) qui décollent et atterrissent à Payerne. Selon les données de l'aéroport de Payerne, ce sont en moyenne $N = 3700$ avions de cette catégorie de poids qui atterrissent et décollent à Payerne chaque année. Les hélicoptères ne sont pas pris en compte pour les décollages et les atterrissages car l'aéroport de Payerne est distant de près de 30 km du site de Niederruntigen et que les hélicoptères, de par la verticalité de leurs décollages et atterrissages, ont besoin d'une zone nettement plus réduite que les avions.

Pour calculer la probabilité de chute, on a considéré tous les mouvements d'avions militaires légers et les chutes ayant eu lieu en Suisse. On a enregistré entre 1985 et 2006 1 901 018 mouvements d'avions au total, 1 140 594 pour des avions légers et 820 052 pour des hélicoptères. La probabilité de chute liée à des manœuvres militaires étant beaucoup plus importante, et celles-ci étant exclusivement réalisées dans des zones d'exercice bien définies, ces chutes ne sont pas prises en compte pour le site de Niederruntigen. Selon les données [105], il faut prendre en compte 3 chutes ayant eu lieu lors de décollages et d'atterrissages d'avions militaires légers pendant cette période. Ceci donne une probabilité de chute de $2.6E-06$ pour les avions militaires légers.

Pour déterminer la probabilité conditionnelle qu'une chute liée au décollage ou à l'atterrissage d'un avion militaire léger à Payerne touche le site de Niederruntigen, des considérations d'ordre géométrique s'imposent. On applique une fois encore les calculs selon l'approche standard de l'USDOE. Ceci donne une probabilité conditionnelle pendant la phase de décollage et d'atterrissage d'avions militaires légers de chute sur le site de Niederruntigen de $f(x, y) = 8.4E-05$ par kilomètre carré.

En tenant compte des incertitudes, on obtient une probabilité de chute pendant la phase de décollage et d'atterrissage d'avions militaires légers sur le site de Niederruntigen de $F' = 9.8E-08$ par an et par kilomètre carré.

On ignore le nombre de vols de croisière d'avions militaires légers à proximité du site de Niederruntigen, c'est pourquoi le taux de chute est calculé par an et pas par mouvement d'avion et par an. Selon les statistiques militaires suisses relatives aux chutes, 13 chutes d'avions militaires légers à prendre en compte ont eu lieu pendant la phase de vol entre 1985 et 2006. Ceci donne une probabilité de chute de 0.6 par an.

Il n'existe pas de corridors de vol fixes pour les avions militaires. La détermination de la probabilité conditionnelle qu'une chute d'avion militaire léger en vol de croisière à proximité du site de Niederruntigen touche le site s'effectue de la même manière que pour les avions civils légers. On suppose que les chutes ont une distribution uniforme sur l'ensemble de la superficie de la Suisse. Ceci donne une valeur de $2.4E-05$ par kilomètre carré pour la probabilité de chute conditionnelle sur le site de Niederruntigen.

La multiplication des deux valeurs mentionnées donne, en tenant compte des incertitudes, une probabilité de chute en phase de vol de croisière d'avions militaires légers sur le site de Niederruntigen de $F' = 1.7E-05$ par an et par kilomètre carré.

Le risque global pour le site de Niederruntigen lié aux avions militaires pour toutes les catégories de poids et pour toutes les phases de vol est de $F' = 1.8E-05$ par an et par kilomètre carré.

Evaluation récapitulative

Les analyses mentionnées ci-dessus de chutes accidentelles d'avions donnent les résultats suivants quant au risque pour le site de Niederruntigen :

- le risque est de $7.4E-07$ par an et par kilomètre carré pour les chutes accidentelles de gros porteurs
- le risque est de $3.2E-07$ par an et par kilomètre carré pour les chutes accidentelles d'avions de taille moyenne
- le risque est de $1.7E-04$ par an et par kilomètre carré pour les chutes accidentelles d'avions légers
- le risque est de $1.8E-05$ par an et par kilomètre carré pour les chutes accidentelles d'avions militaires.

Il faut cependant tenir compte du fait que ces chiffres se rapportent à une superficie d'un kilomètre carré alors que la surface nécessaire à la nouvelle installation n'est que d'environ 0.16 km^2 , de sorte que le risque que le périmètre soit touché par une chute d'avion est inférieur.

Le risque pour le périmètre de l'installation sur le site de Niederruntigen lié à la chute accidentelle

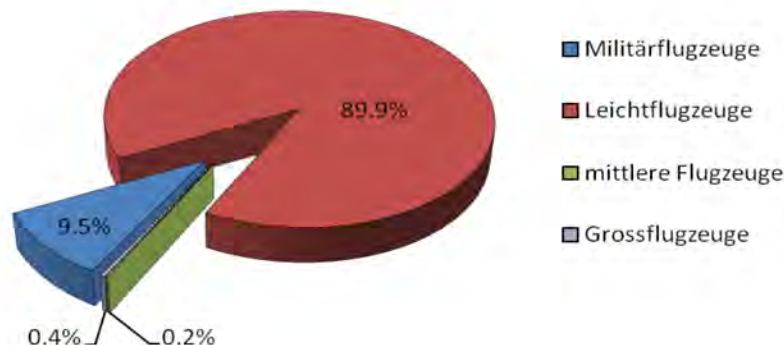
- de gros porteurs est de $F = 1.2E-07$ par an
- d'avions de taille moyenne est de $F = 5.1E-08$ par an
- d'avions légers est de $F = 2.6E-05$ par an
- d'avions militaires est de $F = 2.9E-06$ par an.

Le modèle appliqué s'appuie sur l'hypothèse que le risque dépend de manière linéaire du nombre de mouvements d'avions. Une augmentation de la densité du trafic aérien entraînerait une augmentation du risque. Grâce à une conception adaptée de la construction des bâtiments liés à la sécurité et des systèmes qu'ils abritent conformément aux exigences des autorités de surveillance, le risque que présente une chute d'avion accidentelle restera faible même en cas d'augmentation significative de la densité du trafic aérien.

Si l'on considère le taux de chute global sur le site de Niederruntigen par an et par catégorie de poids, c'est la catégorie des avions légers (< 5.7 t) qui contribue le plus au risque, comme le montre la Figure 3.6-1 avec une proportion de presque 90%. Le trafic aérien militaire y contribue au total pour 9.5%.

Figure 3.6-1 : Proportion par rapport au taux de chute total, en fonction des catégories de poids

Anteil gesamte Absturzrate nach Gewichtsklassen

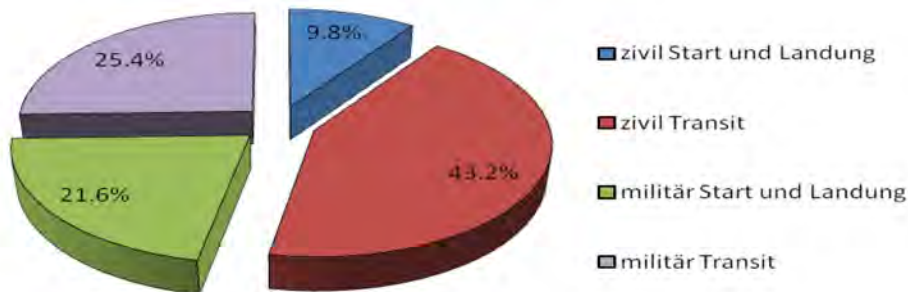


Il faut cependant savoir que les avions légers causent potentiellement beaucoup moins de dégâts que les avions des catégories de poids supérieures. C'est important lorsqu'on sait que c'est un avion de type gros porteur (> 20t) qui est utilisé pour dimensionner les éléments liés à la sécurité contre l'impact d'une chute d'avion ; en outre, le dimensionnement tient également compte de la vitesse et de la densité de masse plus importantes des aéronefs militaires.

Si l'on considère les avions de taille moyenne et les gros porteurs (> 5.7 t), comme le montre la Figure 3.6-2, on constate que les vols de croisière civils, avec une proportion de 43.%, constituent la plus grosse partie du taux de chutes total. Ceci s'explique principalement par l'importance des vols de croisière internationaux dans le corridor aérien Zurich-Genève. Les vols de croisière militaires sont à l'origine de 25% des chutes, les décollages et atterrissages d'avions militaires de 22% d'entre elles. Ce sont les décollages et atterrissages civils qui représentent la part la plus faible avec 10%.

Figure 3.6-2 : Proportion par rapport au taux de chute total, avions de la catégorie de poids > 5.7t

Anteil gesamte Absturzrate Flugzeuge > 5.7 t



Ces chiffres ne tiennent pas compte des protections dues à la topographie sur le périmètre de l'installation car ils ne pourront être définis qu'une fois la situation précise des bâtiments connue. On escompte donc un risque lié aux chutes d'avions encore plus faible.

L'impact d'une chute d'avion sur les différents bâtiments (impact mécanique, décombres et incendie/effets d'explosion) ne pourra être étudié que plus tard ; dès que le projet de conception de la nouvelle installation sera défini, ces études seront réalisées dans le cadre des analyses destinées à l'autorisation de construire et d'exploiter. De manière générale, on tient compte des exigences des autorités pour la protection contre les chutes d'avions pour la conception de la nouvelle installation (voir p. ex. [39]). Les différents bâtiments sont conçus de manière à apporter une protection suffisante contre les impacts mécaniques directs (p. ex. basculements et déplacements) ou indirects (p. ex. action des décombres et incendie).

Les analyses de risque partent du principe que l'alimentation externe en électricité est interrompue en cas de chute accidentelle d'avion.

3.6.2.26 Tsunami

Le risque de voir survenir des vagues provoquées par des séismes sous-marins ou des impacts de météorites est exclu sur le site de la KKM car il n'existe pas de réservoir d'eau suffisamment important dans les environs. Les risques liés aux barrages situés en amont et en aval de la centrale sont pris en compte dans le cadre des risques d'inondations externes (voir chap. 3.4.3) ou de séismes (voir chap. 3.5.3).

3.6.2.27 Gaz toxiques

Les gaz toxiques peuvent présenter un risque s'ils sont aspirés par les systèmes d'aération des salles de commande ou des bâtiments abritant des systèmes de sécurité.

Les produits chimiques nécessaires à l'exploitation de l'installation ne sont pas stockés à proximité des orifices d'aspiration des installations d'aération. Ceci est garanti par des procédures ad hoc. En cas de libération de produits chimiques dans l'air, on peut donc compter sur une dilution des substances émises avant qu'elles n'arrivent à proximité des orifices d'aspiration.

Il n'existe pas de source plausible de gaz toxiques dans l'environnement de la nouvelle installation nucléaire. En cas de nuages de gaz externes, on peut également supposer que les substances toxiques seront diluées avant d'atteindre les orifices d'aspiration.

En outre, l'air aspiré est tout d'abord filtré dans la nouvelle installation, comme cela se fait habituellement, et peut être épuré grâce à un filtre au charbon actif (il est possible d'activer ces filtres lorsqu'un risque se dessine). Des équipements de protection du personnel avec une protection respiratoire seront disponibles dans les parties de l'installation liées à la sécurité.

En résumé, le risque que présentent les gaz toxiques concerne principalement le personnel, et non la sécurité de l'installation ; les moyens disponibles pour répondre à ce risque sont suffisants.

3.6.2.28 Fragments de turbine

Le risque que présentent des parties de turbines qui pourraient être éjectées en cas de dommage sur une turbine est déterminé par la conception de ce composant et l'expérience du fabricant. Les turbines modernes disposent d'une protection de survitesse efficace et fiable afin d'éviter qu'elles ne se fragmentent. Les paramètres exacts de la turbine ne pourront être indiqués qu'avec la demande d'autorisation de construire. Cet événement ne présente aucun risque pour la sécurité nucléaire car il est possible d'en limiter l'impact à la partie non nucléaire de l'installation grâce au fait que les bâtiments liés à la sécurité sont protégés, de par leur conception, contre les chutes d'avion.

3.6.2.29 Activité volcanique

Il n'existe aucun signe d'activité volcanique sur le site ou dans les environs. Il est donc possible d'exclure tout risque d'origine volcanique.

3.6.2.30 Vagues

L'impact de vagues est pris en compte dans la partie sur les inondations externes (voir chap. 3.4.3).

3.6.2.31 Impact de météorite

Plus les météorites sont de taille importante, plus leurs effets sont importants, mais en même temps leur fréquence est moins élevée. Dans le cadre de la surveillance des objets proches de la Terre (Near Earth Objects – NEO), le Spaceguard Survey Report de la NASA indique les fréquences d'impacts de météorites que l'on peut attendre en fonction de leur taille [31]. Selon ces données, seuls les météorites ayant un diamètre supérieur à environ 10 m atteignent la surface de la Terre. La probabilité d'impact d'un météorite de cette taille est d'environ 2 événements en 10 ans. Ces météorites atteignent le sol mais n'ont qu'un impact local. Le météorite qui a frappé Tunguska (Sibérie) en 1908 avait un diamètre d'environ 60 m et a détruit une surface de forêt d'environ 2000 km², ce qui correspond à une zone ayant un rayon de 25 km. L'étude mentionnée estime la probabilité d'un tel météorite à environ 2E-03 par an.

En supposant par précaution que les météorites dangereux surviennent avec une fréquence de 0.1 par an en n'importe quel endroit de la surface de la terre, et que leur impact entraîne un risque important dans un rayon de 10 km autour du point d'impact et en supposant également que les impacts sont distribués de manière uniforme sur l'ensemble de la superficie de la terre (510 millions de km²), on obtient une fréquence de risque pour le site de Niederruntigen d'environ 6E-08 par an.

Cette valeur très faible, même si l'on admet des hypothèses très prudentes, permet d'exclure ce risque des considérations ultérieures.

3.6.2.32 Activités de glaciers

Il n'existe pas de glacier pouvant présenter un risque à proximité du site. Nous n'étudierons donc pas cet événement plus avant.

3.6.2.33 Subsidences et effondrements

Les subsidences naturelles surviennent dans les zones où le sous-sol est composé de roches solubles dans l'eau (calcaire, carbonate ou dômes de sel). Au fil du temps, des cavités peuvent se former dans ces roches, pouvant entraîner des effondrements ou des subsidences en surface. De par la situation géologique du site (voir chap. 3.5), il est certain que toute subsidence est impossible dans la zone de la nouvelle installation. Des activités minières peuvent également être à l'origine de subsidences. Il n'en existe pas à proximité du site.

On peut donc exclure le risque de subsidence, qui ne sera pas étudié plus avant.

3.6.2.34 Seiches

Les seiches (mouvement ondulatoire périodique dans les lacs) n'ont aucun impact sur le site car l'EKKM n'est pas directement située au bord d'un lac. Les seiches ne peuvent pas engendrer d'états critiques dans les lacs de retenue situés dans le bassin versant. Le lac de Wohlen est trop petit et trop peu profond pour qu'une seiche de surface notable se forme. Le risque que présentent les seiches pour la nouvelle installation ne sera donc pas étudié plus avant.

3.6.2.35 Tempête de sable

Les tempêtes de sable ne peuvent se produire qu'à proximité des déserts, elles ne sont donc pas envisageables pour le site de Niederruntigen. Il est donc possible d'exclure le risque de tempête de sable des considérations ultérieures.

Les charges que représentent les flux d'air sont prises en compte dans l'étude des vents extrêmes (voir chap. 3.6.2.22). Un éventuel blocage des orifices d'aspiration par des matières solides sera pris en compte dans la conception de l'installation.

3.6.2.36 Précipitations extrêmes

Cet événement est traité au chapitre 3.4.2. Les maxima de débit et les niveaux atteints en cas de scénario de rupture de barrage dépassent nettement les événements de crue hydrométéorologiques.

3.6.2.37 Chute de satellite

La chute d'un satellite peut être évaluée de manière similaire à l'impact d'un météorite. Mais la taille des satellites est limitée. La zone subissant des dommages en cas de chute de satellite serait nettement plus faible que la zone prise en compte au chapitre 3.6.2.31.

Comme tous les autres objets proches de la Terre, les satellites font l'objet d'une surveillance. Une chute menaçante serait donc prévisible et il serait possible de prendre des mesures de précaution adaptées en cas de chute imminente présentant un risque accru pour le site.

Le risque que présentent les chutes de satellites pour la nouvelle installation ne sera donc pas étudié plus avant.

3.6.2.38 Avalanches

Le risque que présente une avalanche dépend de l'inclinaison du versant et de sa taille. Les surfaces situées à proximité directe du site sont soit trop plates, soit trop petites pour présenter un risque pour la nouvelle installation.

Le risque d'avalanche peut donc être exclu en raison de la situation géographique du site.

3.6.2.39 Brouillard

Le brouillard peut avoir une influence sur la fréquence des risques que présentent les véhicules terrestres, maritimes ou aériens. Cet effet est pris en compte dans les statistiques des accidents. Le trafic fluvial étant quasiment nul sur l'Aar et la construction n'étant pas à proximité directe des grands axes routiers (voir chap. 3.6.2.17), le brouillard ne peut influencer que le trafic aérien pour le site de Niederruntigen. Les chutes d'avion accidentelles sont traitées au chapitre 3.6.2.25). Les données statistiques relatives aux chutes d'avions ne distinguent pas les différentes sources d'accident, l'influence du brouillard est donc déjà incluse dans ces données.

Le brouillard ne joue donc aucun rôle pour le site en tant qu'événement externe supplémentaire et ne sera pas étudié plus avant.

3.6.2.40 Gel

Selon le PRA Procedures Guide [27], cet événement est dominé par les événements de neige et de congères (chap. 3.6.2.15 et 3.6.2.5). Il n'existe pas de risque supplémentaire lié au gel ; le gel ne sera donc pas étudié comme un événement externe supplémentaire.

La conception de la nouvelle installation sera adaptée aux conditions climatiques attendues pour le site. Le gel d'aménages et des saisies d'eau sera évité lors de la conception grâce à des mesures techniques de construction (p. ex. chauffage électrique). La demande d'autorisation de construire décrira les détails correspondants.

3.6.2.41 Perte de l'alimentation externe en électricité

Il existe divers événements externes pouvant entraîner la perte de l'alimentation externe en électricité :

- Perturbations du réseau d'alimentation ou du poste de commutation
- Conséquence d'un événement externe, p. ex. chute d'avion, inondation, vents extrêmes ou tornades, séismes, foudre, perturbations géomagnétiques (tempêtes solaires), gel, qui se traduisent par une défaillance du réseau haute tension et/ou du poste de commutation.

La fréquence de perte de l'alimentation externe en électricité peut être déduite pour le site de Niederruntigen de l'expérience acquise lors de l'exploitation de la KKM existante car l'installation nucléaire en projet doit être raccordée au réseau de transmission au même endroit. Pendant les 36 ans d'exploitation de la KKM, on a enregistré trois événements se traduisant par une perte de l'alimentation 220 kV. Ceci donne une fréquence de $8.3 \cdot 10^{-2}$ par an. En tenant compte des statistiques nationales et internationales destinées à condenser les données, les autorités de surveillance obtiennent également une fréquence similaire de perte de l'alimentation externe en électricité de $1.0 \cdot 10^{-1}$ par an¹. La fiabilité du réseau de transmission et donc la fréquence de perte de l'alimentation externe en électricité sera cependant déterminée par la topologie et l'utilisation du réseau à venir.

Conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu², une nouvelle installation nucléaire doit permettre de maîtriser une perte de l'alimentation externe en électricité, ce qui signifie que les systèmes de l'EKKM seront conçus de manière à ce que la sécurité nucléaire soit assurée à tout moment, même en l'absence de raccordement au réseau.

¹ DSN-AN-6132, l'accident du 25 juillet 2006 dans la centrale nucléaire suédoise de Formark 1 et les conséquences sur les centrales nucléaires en Suisse, février 2007

² Art. 8 al. 3 OENu [2]

3.6.2.42 Perte de l'alimentation externe en eau de refroidissement

Une perte de l'approvisionnement externe en eau de refroidissement peut survenir à la suite d'une perturbation interne à l'installation (p. ex. incident sur un composant ou panne) ou d'un événement externe (p. ex. séisme, obstruction de l'arrivée d'eau de refroidissement, notamment à la suite d'éboulements spontanés). C'est pourquoi l'installation est conçue de manière à maîtriser ce type d'accident ; la source froide destinée à l'extraction de la chaleur résiduelle est notamment conçue de manière redondante et diversifiée, selon les principes de technique nucléaire. Cette conception permet également de protéger l'installation de toute perte de l'alimentation en eau froide à la suite d'événements externes.

Le chapitre 3.6.2.14 traite des causes possibles pouvant entraîner une obstruction de la saisie d'eau.

3.6.2.43 Interférences électromagnétiques

Les lignes haute tension et les lignes électriques sont à l'origine d'émissions à basse fréquence pouvant avoir un impact sur la fonctionnalité de systèmes et de composants. Il en va de même pour les champs électromagnétiques à haute fréquence, p. ex. créés par les antennes de téléphonie mobile et la radio.

Les systèmes et composants d'une installation nucléaire peuvent être protégés contre les interférences de ce type par une qualification correspondante, mise en œuvre lors de sa construction et des tests de réception consécutifs. Cette qualification sera prise en compte lors de la conception de l'EKKM. Il est également possible de prendre des mesures administratives visant à éviter les interférences d'origine locale (téléphones mobiles/appareils électroniques).

Le personnel et les particuliers situés en dehors de l'installation sont protégés des effets des champs électromagnétiques et haute fréquence par des mesures s'appuyant sur l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant ORNI [58]. Ceci est traité dans le rapport de demande d'autorisation générale dans le cadre du contrôle de compatibilité environnementale [33].

3.6.3 Combinaison de risques

Au niveau mondial, l'occurrence de combinaisons de risques est très faible ; ainsi, le rapport U.S.NRC relatif à l'évaluation des événements externes pour 70 centrales nucléaires des Etats-Unis [12] n'évoque pas une seule combinaison de risques. Les combinaisons de risques simultanés, comme les avalanches et les chutes de satellites, ne sont pas prises en compte, mais les combinaisons au sens d'événements consécutifs aux séismes, aux vents extrêmes et aux tornades, aux inondations et aux chutes accidentelles d'avions servent de base aux analyses.

Les impacts d'un risque (p. ex. panne de composants, incendie, dégât dans les bâtiments) sont ensuite identifiés et analysés lorsqu'ils peuvent avoir des conséquences pour la sécurité nucléaire.

Nous allons évoquer ci-après deux combinaisons de risques spécifiques, à savoir des conditions hivernales et estivales exceptionnelles.

3.6.3.1 Conditions hivernales exceptionnelles

Le risque que présentent des conditions hivernales exceptionnelles avec une combinaison de neige ou de congères, de températures basses et de gel est très rarement pris en compte à travers le monde. Par exemple, le rapport U.S.NRC d'évaluation des événements externes pour les centrales nucléaires aux Etats-Unis [12] ne prévoit pas cette combinaison d'événements. La longue expérience recueillie lors de l'exploitation de la centrale nucléaire de Mühleberg, située à proximité directe du site, n'indique pas non plus de combinaison de ce type.

La combinaison citée pourrait conduire à une perte de l'alimentation externe en eau ou à la perte de l'alimentation externe en électricité ; de par sa conception, l'installation sera cependant protégée contre ces événements (voir chap. 3.6.2.41 et 3.6.2.42). On peut ainsi supposer que cette combinaison de risques est négligeable pour la CDF (fréquence totale d'endommagement grave du cœur du réacteur).

3.6.3.2 Conditions estivales exceptionnelles

Il s'agit ici d'une combinaison de températures élevées, de sécheresse, de feux de forêt et d'un faible niveau d'eau dans la rivière. Cette combinaison de risques est également considérée comme très rare au niveau mondial et n'apparaît pas dans le rapport U.S.NRC d'évaluation des événements externes mentionné ci-dessus. L'expérience recueillie lors de l'exploitation de la KKM existante ne révèle aucune combinaison d'événements de ce type ; aucun feu de forêt ne s'est produit lors de l'été 2003 aux environs du site.

La combinaison de températures élevées, de sécheresse et de faible niveau d'eau dans la rivière pourrait engendrer un risque pour l'alimentation en eau ; comme l'illustre le chapitre 3.6.2.4 une alimentation suffisante en eau de refroidissement est assurée même dans des conditions défavorables. De plus, un feu de forêt, même combiné à d'autres phénomènes, est de par la conception de l'installation un événement négligeable quant aux risques qu'il pourrait engendrer pour le site. On peut en outre supposer que le bassin d'alimentation glaciaire de l'Aar fournira suffisamment d'eau de refroidissement, même pendant des périodes de chaleur extrême.

On peut ainsi supposer que ces conditions estivales exceptionnelles auraient une contribution négligeable à la fréquence des dommages au cœur.

3.6.3.3 Inondation liée à une rupture de barrage à la suite d'un séisme et répliques

Comme nous l'expliquons aux chapitres 3.4.3.9 et 3.4.5 la nouvelle installation sera conçue de manière à ce qu'un arrêt du réacteur ait lieu lors des événements de crue menaçant la sécurité, même si les événements entraînaient une inondation du périmètre supérieur au niveau zéro de l'installation. La conception garantira également qu'une telle inondation ne mette pas en danger l'intégrité des structures et des composants.

De plus, la conception de l'installation assurera une protection contre les séismes, de sorte que la base de risque sismique sera respectée (voir chap. 3.5.2.5). Ainsi, les répliques (qui sont, lorsqu'elles se produisent, en général moins fortes que le séisme initial) peuvent également être maîtrisées dans la conception sismique de base.

Pour ces raisons, on peut supposer que cette combinaison de risques ne contribuera pas de manière accrue à la fréquence des dommages au cœur.

3.6.4 Interaction entre l'EKKM et la KKM

Il est possible que la KKM existante soit encore en exploitation¹ pendant la construction ou l'exploitation de la nouvelle installation EKKM. Citons quelques interactions possibles :

- dégagement de produits chimiques
- émission de radioactivité
- délestage de la KKM pendant la phase de la construction de l'EKKM ou délestage de l'EKKM pendant la phase de désaffectation de la KKM
- blocage des voies d'accès
- situation d'urgence liée à la construction de l'EKKM
- perturbation de l'arrivée d'eau à la KKM par des matériaux pendant la phase de construction de l'EKKM.

Ces risques et tous ceux que la construction de l'EKKM pourrait engendrer pour la KKM sont étudiés dans le cadre de la planification de la phase de construction². On s'assurera aussi que les matières combustibles et explosives seront bien stockées à un endroit adapté sur le chantier. La KKM répondant aux exigences de sécurité en vigueur pour les installations nucléaires, on peut s'attendre à ce que la conception de la KKM contrebalance les effets de beaucoup de risques de ce type ; si ce n'était pas le cas, des mesures appropriées seraient prises.

Les risques pour l'EKKM pendant une éventuelle exploitation en parallèle des deux installations seront examinés dans le cadre de l'étude de projet et pris en compte lors de la conception de la nouvelle installation. On peut ici aussi s'attendre à ce que la base de conception liée aux événements externes soit suffisante pour contrebalancer les effets de nombreux risques de ce type. Par exemple, une potentielle émission de radioactivité à la suite d'un accident à la KKM est prise en compte dans la conception de l'EKKM. Le résultat de ces études sera documenté dans le cadre de la demande d'autorisation de construire.

Aucun risque n'apparaît pour l'EKKM pendant la phase de désaffectation de la KKM qui ne soit pas couvert par la base de conception de l'EKKM relative aux événements externes ou qui ne puisse pas être exclu dans le cadre de la planification du démantèlement de la KKM. Par exemple, les vibrations qui pourraient se produire lors de la démolition de la KKM sont couvertes par la conception de l'EKKM pour résister aux conséquences d'un séisme.

En résumé, l'interaction entre la KKM et l'EKKM ne présente aucun risque qui remettrait en question l'adéquation du site.

¹ FMB souhaite arrêter d'exploiter la KKM existante aussi rapidement que possible après la mise en service de l'EKKM. Une exploitation des deux installations en parallèle semble cependant nécessaire en l'état actuel des choses afin d'assurer l'approvisionnement pour FMB et les partenaires impliqués dans l'EKKM pendant la première phase qui suivra la mise en service de l'EKKM.

² Art. 33 OENu [2]

3.6.5 Risques liés aux incendies

Un incendie peut être considéré comme un accident d'origine interne ou externe à l'installation¹. La chute accidentelle d'un avion ou la foudre peuvent également déclencher des incendies. Dans le cadre du traitement de la procédure d'autorisation de construire et du permis d'exécution, les exigences sont définies pour la protection contre les incendies et la foudre selon l'OENu, annexe 4 : ces exigences tiennent compte des incendies d'origine interne et externe à l'installation. Conformément à la directive des autorités [108], un concept de protection incendie fait partie des documents remis lors de la demande d'autorisation de construire.

Des sapeurs-pompiers entièrement équipés seront présents sur le site de l'EKKM. En cas d'incendie, en fonction de la taille de l'événement, il est également possible d'appeler les sapeurs-pompiers professionnels de Berne en renfort ; ce soutien externe sur le site de la KKM existante est réglementé par contrat et peut être transféré ultérieurement à l'EKKM. Le temps nécessaire pour atteindre le site est aujourd'hui d'environ 12 minutes ; la caserne des sapeurs-pompiers bernois sera prochainement déplacée en périphérie de la ville, ce qui réduira ce délai de moitié environ. D'autres centres d'incendie des environs du site pourront être appelés en renfort, comme les sapeurs-pompiers de Mühleberg (situés à env. 2.5 km) et Ferenbalm/Wallenbuch (situés à env. 6 km) ; le soutien des sapeurs-pompiers de Mühleberg en cas d'incendie en dehors du site de la KKM est également réglé par contrat.

Le concept de protection incendie mis en œuvre lors de la conception de l'installation peut assurer une protection suffisante contre la propagation des incendies : les recours aux sapeurs-pompiers internes et externes assurent l'efficacité dans la lutte contre l'incendie.

3.6.6 Evaluation globale des événements externes

L'estimation ci-dessus du risque que présentent les événements externes montre qu'il est possible de prendre suffisamment de mesures de protection contre les événements menaçant la sécurité du site, pour autant qu'ils surviennent. Dans la plupart des cas, la conception de l'installation permet de maîtriser ces événements ; de manière générale, la conception permet de limiter à un bas niveau la contribution au risque des événements augmentant la fréquence des dommages au cœur, afin de respecter le principal critère pour la construction de nouvelles installations nucléaires – CDF de 1^e-05 au maximum pour tous les accidents, c'est-à-dire pour les événements internes et externes² – avec une marge appropriée. Les différentes contributions au risque seront quantifiées dans la PSA qui sera réalisée ultérieurement ; ces analyses PSA qui doivent être menées pour la première fois dans le cadre de la demande d'autorisation de construire tiennent compte des exigences en vigueur des autorités.

3.6.7 Protection contre les actes de tiers non autorisés

L'installation doit être protégée³ des actes de tiers non autorisés, éventuellement violents, par des mesures de sûreté adaptées. Celles-ci sont décrites dans le rapport de sûreté de l'EKKM [42].

¹ Art. 8 OENu [2]

² Art. 24 al. 1 let. B OENu [2]

³ Art. 5 al. 3 LENu [1] et art. 9 par. 1 OENu [2]

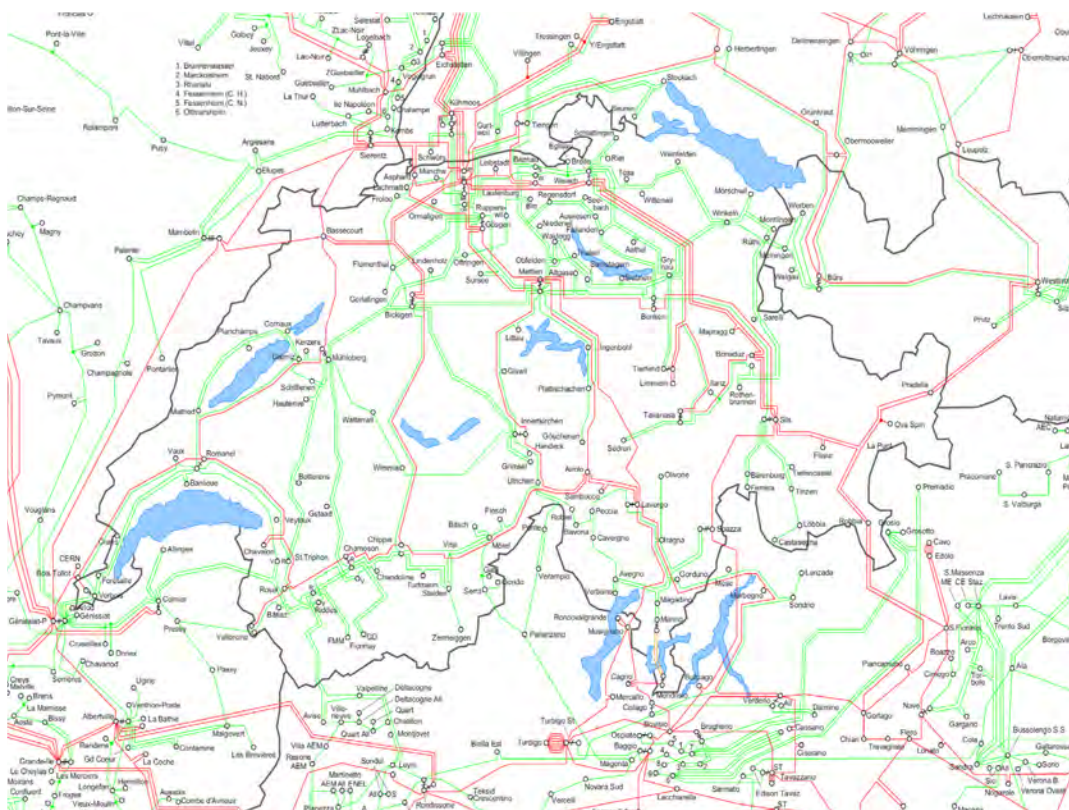
3.7 Raccordement au réseau électrique

3.7.1 Topologie du réseau/sous-station de Mühleberg Est

Aujourd'hui déjà, le site de Mühleberg est l'un des principaux points nodaux du réseau haute tension suisse. Le réseau de transport autour de Mühleberg sera complété lors du projet planifié de plan sectoriel des lignes de transport d'électricité (PSE, [18]) Ces mesures doivent être prises de toute urgence pour assurer la stabilité du réseau (tenue de la tension). Les conditions nécessaires à l'acheminement de la puissance électrique fournie par une nouvelle installation seront ainsi réunies.

La topologie du réseau (voir Figure 3.7-1) avec les lignes 380 kV Mühleberg-Bassecourt et Mühleberg-Romanel ainsi que diverses lignes 220 kV partant de Mühleberg garantit la sécurité du transport de l'énergie à partir de l'EKKM. La planification actuelle prévoit que les mesures liées au réseau, ainsi que les extensions nécessaires à l'amélioration de la stabilité du réseau dans l'Espace Mittelland interviendront avant 2015. Le 6 mars 2009, le Conseil fédéral a approuvé les plans d'extension stratégique du réseau de transmission conformément au PSE.

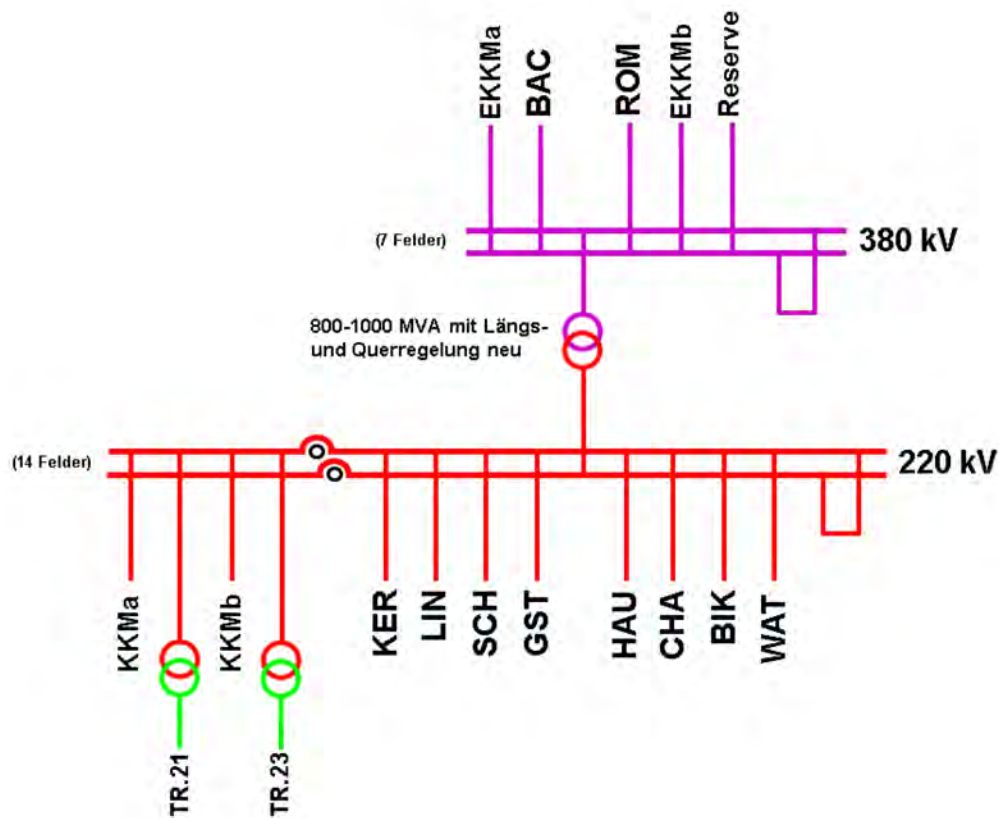
Figure 3.7-1 : Topologie du réseau en 2015 représentant les lignes 380 kV (en rouge) et 220 kV (en vert) partant de Mühleberg



3.7.2 Transport de l'énergie électrique depuis la centrale EKKM

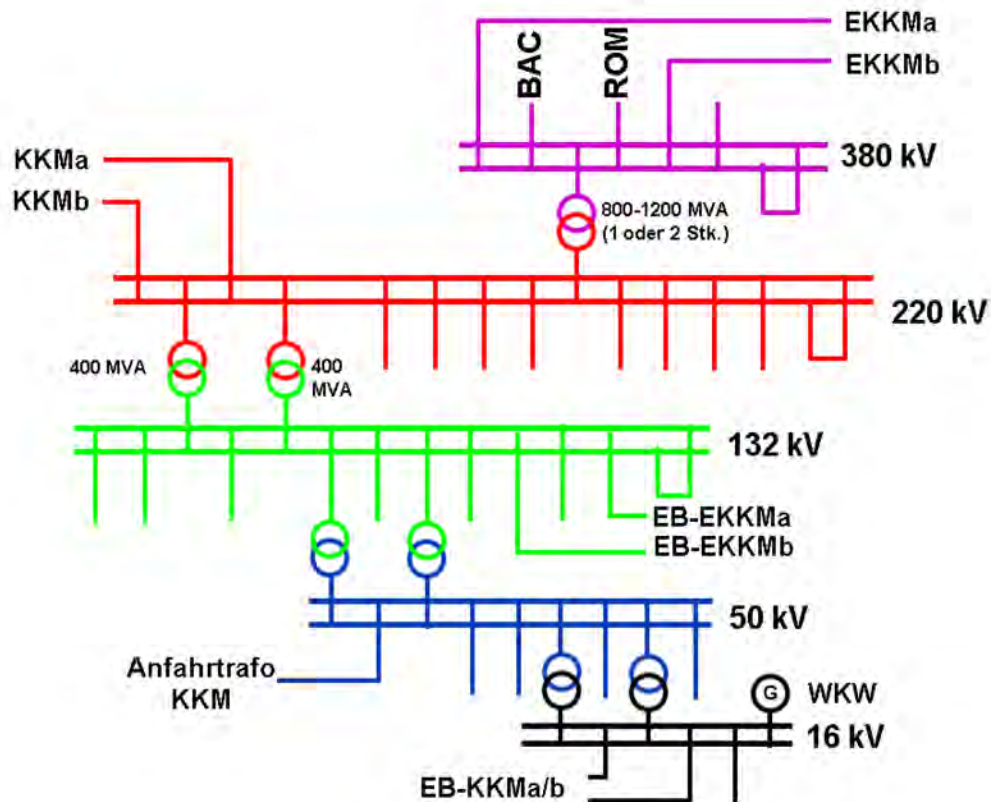
L'énergie électrique est principalement transportée depuis la centrale EKKM au niveau 380 kV et selon le plus court chemin via des lignes isolées au gaz (GIL) ou des câbles à haute tension souterrains vers la sous-station Est (SSt Est) (voir aussi chapitre 2.3.2). Les Figure 3.7-2 et Figure 3.7-3 présentent un schéma de la distribution. Les câbles souterrains prévus aujourd'hui seront posés dans une conduite de câbles ou des galeries de câbles, qui devront être créés. La SSt Est transportera en principe l'énergie via le réseau 380 kV.

Figure 3.7-2 : Schéma de la sous-station de Mühleberg Est (SSt Est) planifiée, des barres 380 et 220 kV et du transformateur intermédiaire. Il est possible d'installer un deuxième transformateur



Lors de l'évaluation d'un cas critique N-1 pour la sécurité du transport de l'énergie, on se base sur la défaillance d'une ligne 380 kV. Si l'une des deux lignes 380 kV en direction de Bassecourt ou de Romanel subit une défaillance, l'énergie est transportée via la ligne 380 kV restante et les six lignes 220 kV, Galmiz et Kerzers n'étant pas impliqués. Comme le montre l'analyse des réseaux FMB, le réseau 220 kV permet de transporter jusqu'à 1 800 MW si un deuxième transformateur 380/220 kV avec 800-1 200 MW est installé à la SSt Est (voir Figure 3.7-3). L'espace et les sorties nécessaires sont prévus.

Figure 3.7-3 : Schéma de distribution de la SSt Est planifiée à partir de la topologie du réseau en 2015, tous niveaux de tension représentés. Sont indiquées les lignes d'alimentation de la centrale hydroélectrique existante destinées à répondre aux besoins propres (BP KKM A/B) de la centrale KKM existante¹ ainsi que son alimentation (KKM a/b) et l'alimentation pour besoins propres (BP KKM a/b). Deux travées 380 kV sont réservées à l'évacuation de l'énergie produite par la centrale EKKM (EKKMa et EKKMb). Deux travées de 132 kV ont été prévues pour l'alimentation électrique de la centrale EKKM destinée à couvrir ses besoins propres (BP EKKMa, BP EKKMb). La place nécessaire et les sorties sont prévues. Les autres cas de défaillance d'une ligne 220 kV s'avèrent non critiques puisque les lignes 380 kV fonctionnent.

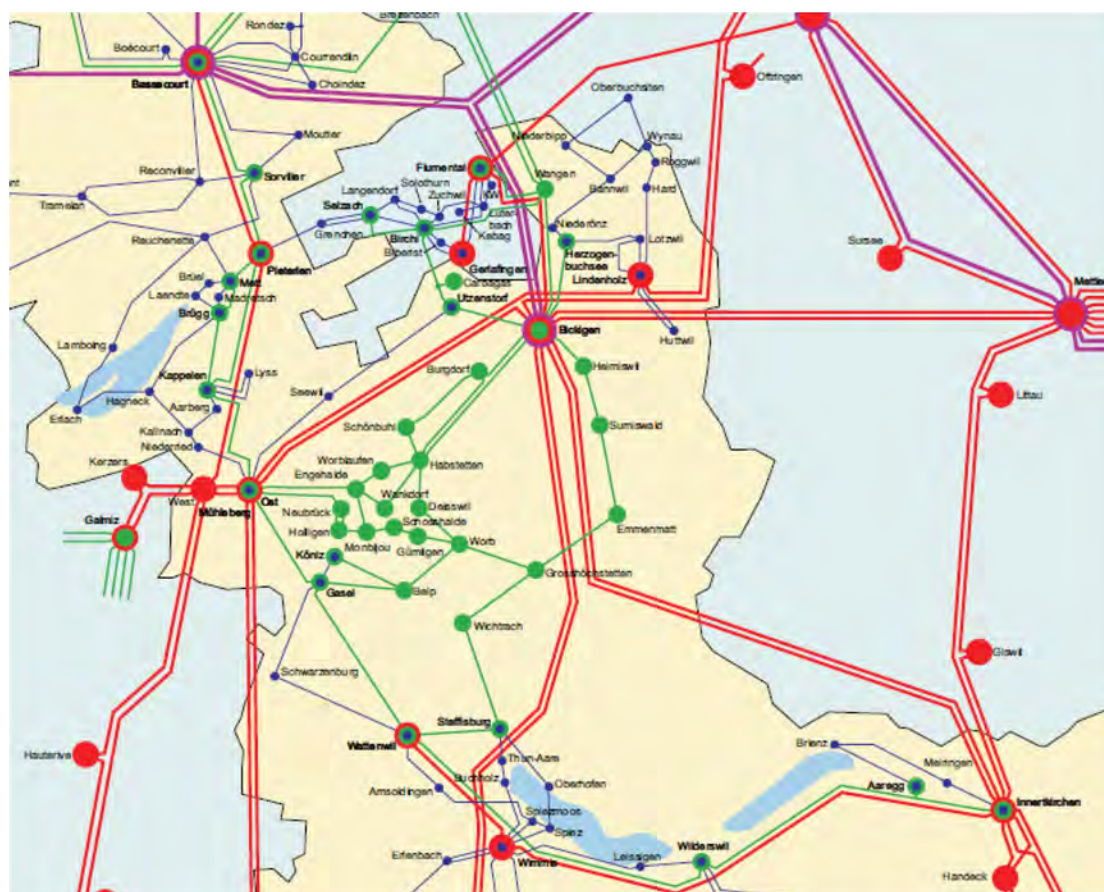


¹ FMB souhaite arrêter d'exploiter la KKM existante aussi rapidement que possible après la mise en service de l'EKKM. Une exploitation des deux installations en parallèle semble cependant nécessaire en l'état actuel des choses afin d'assurer l'approvisionnement pour FMB et les partenaires impliqués dans l'EKKM pendant la première phase qui suivra la mise en service de l'EKKM.

3.7.3 Stabilité du réseau

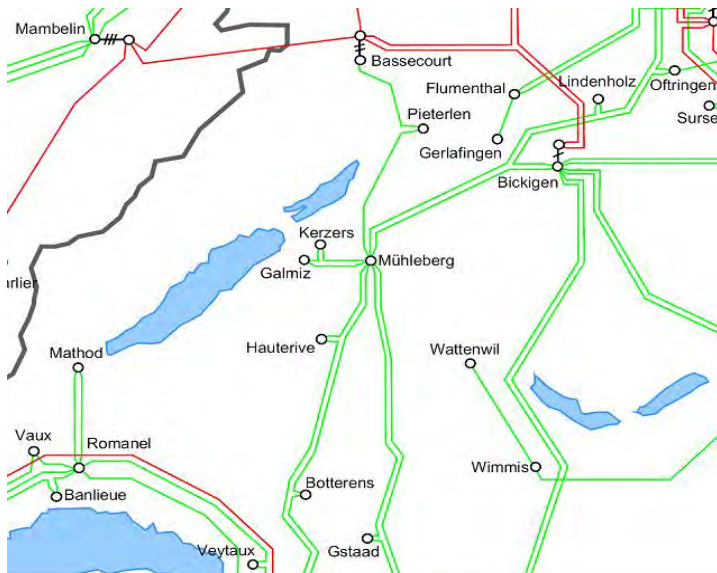
Ce paragraphe porte sur la topologie actuelle du réseau (voir figure 1.3-4) sans le raccordement prévu du nœud de Mühleberg au réseau 380 kV.

Figure 3.7-4 : Topologie du réseau en décembre 2008 avec les niveaux de tension de 380, 220, 132 et 50 kV. Le réseau 132 kV apparaît en vert. La procédure d'autorisation pour une ligne 220 kV supplémentaire de Mühleberg à Wattenwil est en cours ; cette ligne servira principalement à améliorer le raccordement des centrales hydroélectriques de l'Oberhasli au réseau haute tension.



Comme nous le montrerons plus bas, certaines fluctuations de tension se produisent. Le raccordement planifié au réseau 380 kV devrait permettre de les lisser (topologie du réseau en 2015), de sorte qu'on est en droit d'attendre une nette amélioration de la situation au moment de la réalisation de la centrale EKKM. Le raccordement 380 kV est nécessaire indépendamment de la réalisation de la centrale EKKM. Le site de Mühleberg est aujourd'hui raccordé au réseau haute tension suisse via sept lignes 220 kV (trois lignes doubles et une simple, voir Figure 3.7-5).

Figure 3.7-5 : Topologie du réseau en 2008 avec les lignes 220 kV (en vert) partant de Mühleberg



Au cours des dernières années, on a pu observer des fluctuations de tension sur les points nœuds 220 kV de Mühleberg (voir Figure 3.7-6 et Figure 3.7-7, source : réseaux FMB). Elles sont particulièrement marquées pendant l'arrêt de la KKM car la production de courant réactif de la KKM n'est alors pas disponible pour maintenir la tension.

On observe des fluctuations relativement importantes de la tension entre 230 et 247 kV. Par contre, aucune mise hors circuit n'est intervenue pendant cette période.

Figure 3.7-6 : Évolution de la tension à Mühleberg Ouest 220 kV (barre collectrice 1) pour les trois dernières années (de fin novembre 2005 à fin août 2008)

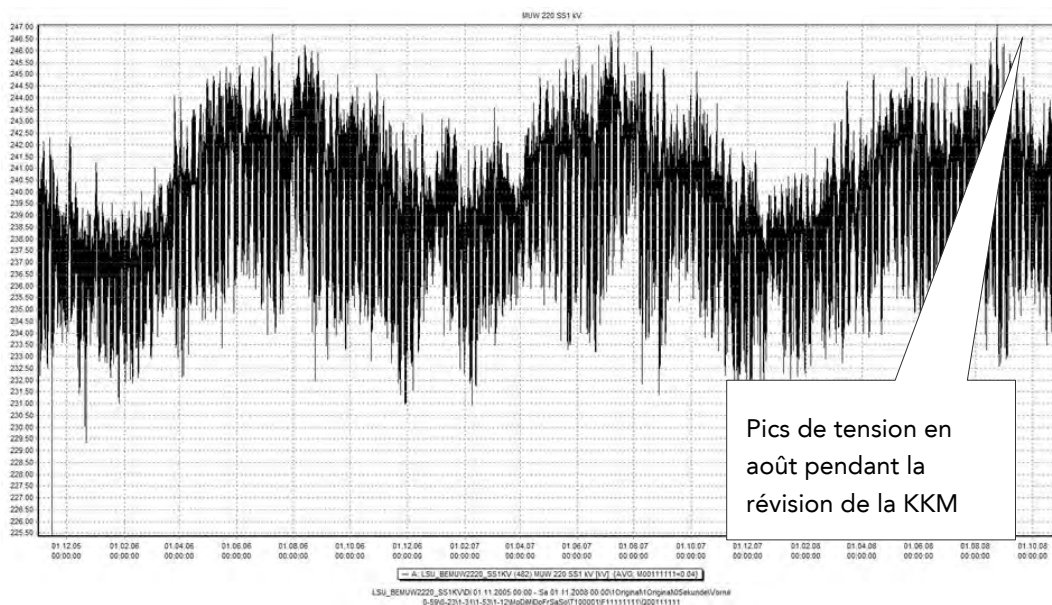
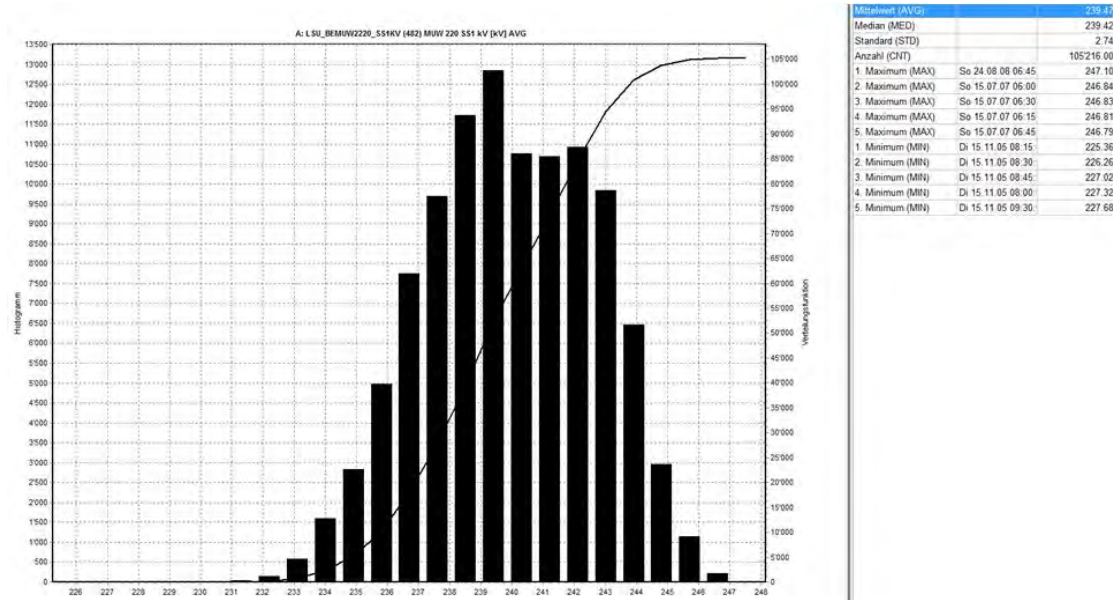
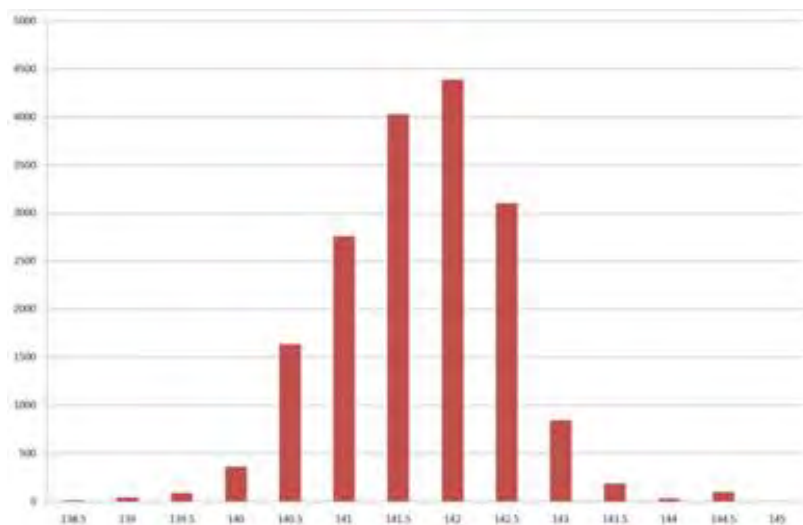


Figure 3.7-7 : Statistiques de tension de Mühleberg Ouest 220 kV (sur les trois dernières années) avec représentation de la fréquence en fonction de la tension



Le niveau de réseau 132 kV montre à Mühleberg des fluctuations de tension nettement inférieures (voir Figure 3.7-8).

Figure 3.7-8 : Statistiques de tension de Mühleberg Est 132 kV (depuis la mise en service). La tension est relativement stable entre env. 140 et 143 kV. La prise du transformateur 220/132 kV règle la tension.



En résumé, on constate :

- la tension au niveau 220 kV suit une évolution hebdomadaire et saisonnière caractéristique :
 - tension basse les jours de la semaine, élevée la nuit et le week-end
 - tension plutôt plus basse en hiver qu'en été.
- La centrale KKM réduit les fluctuations de tension en ayant une production de puissance réactive conforme. Plus la production de puissance réactive maximale possible est élevée, plus les fluctuations de tension au nœud de Mühleberg sont faibles.

La centrale KKM existante contribue de manière significative à la sécurité de l'approvisionnement grâce à sa proximité des grands lieux de consommation. Ceci se remarque tout particulièrement dans une situation extrême comme après la tempête Lothar fin décembre 1999 : seules deux lignes 220 kV en direction de Laufenburg fonctionnaient encore sur le réseau de transport de FMB, toutes les autres lignes, y compris celle de 380 kV en direction de la France étaient hors service. Grâce à la production de la centrale KKM, l'alimentation de Berne et de l'Espace Plateau a pu être très largement maintenue. La proximité des grands sites de consommation tels que Berne et l'Espace Mittelland d'une centrale comme la KKM ou l'EKKM sur le site de Mühleberg améliore de manière déterminante la sécurité de leur approvisionnement.

Comme le montre le Tableau 3.7-1 suivant (source Réseaux FMB, journal d'exploitation), très peu d'incidents sont survenus à Mühleberg au cours des dix dernières années :

Tableau 3.7-1 : Incidents survenus à Mühleberg au cours des 10 dernières années

	Mühleberg Est 220 kV	Mühleberg Ouest 220 kV	Mühleberg Ouest 132 kV
Nombre d'incidents	Protection BHT ¹	3 2x défaut à la terre, 1x protection barre haute tension	0
Durée de tous les incidents [h]	1	5	
Nombre de mises hors tension	26 (MT ² , uniquement 1 BHT à chaque fois)	2 (MT, uniquement 1 BHT à chaque fois)	2 (MT, uniquement 1 BHT à chaque fois)
Durée de toutes les mises hors tension [h]	2 884	8	15
Durée moyenne d'une mise hors tension [h]	111	4	8

3.7.4 Alimentation en électricité

La SSt Est répond en principe aux directives concernant les installations de ce type comme celles de la CNA/SUVA, de la sécurité du travail ou de la SIA et elle est réalisée conformément aux exigences de qualité de l'Inspection fédérale des installations à courant fort (IFICF), qui l'approuve. L'installation dispose en particulier d'une protection contre la foudre et contre les surtensions, ainsi que d'une mise à la terre appropriée. Ce sont des appareils distincts qui assurent la protection et le contrôle et l'ensemble du système de protection est redondant.

En outre, le périmètre de la nouvelle installation sera surélevé à > 467 mètres au-dessus du niveau de la mer (voir chap. 3.4.5) ; cela la protège largement des crues. Dans les cas d'urgence provoqués par une crue, la foudre, un SSIE (séisme sans interruption de l'exploitation), il existe une probabilité élevée que la SSt Est reste disponible.

Les besoins propres de l'installation peuvent être satisfaits par le générateur ou par le service auxiliaire 132 kV. Les lignes sortantes souterraines s'achèment dans deux voies 132 kV à partir de la SSt Est. L'installation isolée au gaz (installation GIS à la SSt Est) dispose de travées départ adaptées (voir Figure 3.7-3). Les câbles HT sont disposés dans une conduite de câbles ou des galeries de câbles, qui seront à créer. Les deux transformateurs 220/132 kV sont planifiés avec une capacité de 400 MVA. Les lignes des environs de Mühleberg, également au niveau 132 kV, sont représentées dans la Figure 3.7-4. Si l'alimentation destinée à couvrir les besoins propres

¹ BHT = barre haute tension

² MT = maintenance

n'était assurée ni par le générateur, ni par les lignes 132 kV, il est également possible de l'assurer grâce au niveau 220 kV par le biais de l'un des deux transformateurs de la SSSt Est (voir Figure 3.7-3).

3.7.5 Alimentation en électricité de secours

Il existe dans une centrale des alimentations en courant alternatif (AC : alternate current) et en courant continu (DC : direct current) liées ou non à la sécurité. Les alimentations en électricité liées à la sécurité sont conçues pour les accidents de référence (classe 1E), ce qui signifie qu'elles fonctionnent pendant et après ces accidents, même en respectant le critère de défaillance unique.

En fonction de la philosophie adoptée en matière de sécurité et de la construction de la centrale, et notamment de sa partie nucléaire, des systèmes AC internes à la centrale sont nécessaires ou non à une mise hors circuit en toute sécurité et à l'extraction de la chaleur résiduelle pendant et après les accidents.

Les systèmes du réacteur, avec des circuits actifs de mise à l'arrêt et d'extraction de la chaleur résiduelle, comportent plusieurs divisions d'alimentation en courant alternatif liées à la sécurité, avec des générateurs diesel. Habituellement, les commandes d'arrêt et de refroidissement du réacteur à l'arrêt après un accident de référence, les matériels correspondants comme les tuyauteries, les vannes, les échangeurs de chaleur et les pompes, ainsi qu'une alimentation ininterrompue en électricité à l'aide de générateurs diesel (AC) et une alimentation ininterrompue en courant continu à l'aide de batteries (DC) sont regroupées au sein d'une même division.

Pour mettre en œuvre le concept de « défense en profondeur », les systèmes du réacteur dotés de circuits passifs de mise à l'arrêt et d'extraction de la chaleur résiduelle disposent de systèmes d'alimentation en courant continu (avec des batteries) afin de commander la mise à l'arrêt sûr, et le refroidissement du réacteur à l'arrêt, affectés de manière redondante aux divisions de sécurité et classifiés 1E, ainsi que des générateurs diesel d'alimentation d'urgence, non liés à la sécurité.

Les solutions concrètes, ainsi que le système du réacteur qui sera choisi, seront décrits ultérieurement dans la demande d'autorisation de construire. Les mesures contre les accidents¹ en font également partie. L'installation sera conçue de manière à ce que tous les critères de sécurité relatifs à l'alimentation en électricité puissent être respectés ; toutes les conditions sont réunies sur le site de Mühleberg.

La centrale hydroélectrique (CHE) existante de Mühleberg peut contribuer à l'alimentation de la centrale KKM existante pour ses besoins propres avec deux de ses six machines. La CHE peut traiter jusqu'à environ 290 m³/sec, ce qui lui permet de travailler à un niveau de puissance d'environ 6 à 42 MW. Les besoins propres d'une nouvelle grande centrale nucléaire telle que l'EKKM étant nettement plus importants que la puissance produite par la CHE, même une CHE modernisée ne pourrait couvrir ces besoins que dans une mesure limitée. La CHE n'est donc pas prévue comme principale source d'alimentation d'urgence ; cela ne serait envisagé que dans des cas au-delà de la conception (p. ex. pour une extraction à plus long terme de la chaleur résiduelle).

¹ Art. 8 al. 1 OENu [2]

3.7.6 Evaluation du raccordement au réseau et de l'alimentation en électricité

Le site de Mühleberg et la topologie du réseau en 2015 sont bien adaptés au raccordement 380 kV d'une centrale nucléaire de dernière génération. En raison de la configuration du réseau et de la sous-station de Mühleberg Est dotée de lignes 132 kVn 220 kV et 380 kV indépendantes partant dans différentes directions, l'acheminement de l'énergie ainsi que l'alimentation de secours est possible via plusieurs lignes et à au moins deux niveaux de tension.

La disponibilité du système au nœud de Mühleberg peut être dès aujourd'hui estimée comme étant très bonne, comme le montre le chapitre « Stabilité du réseau », et le raccordement au réseau de transport 380 kV l'améliorera encore.

En attendant, les besoins propres d'une nouvelle centrale nucléaire seront en premier lieu couverts par le générateur, et en deuxième lieu par les raccordements au réseau externes indépendants. Enfin, une centrale nucléaire de dernière génération dispose, parallèlement aux raccordements externes au réseau, de la possibilité d'assurer l'alimentation auxiliaire et de secours afin d'assurer une mise hors circuit, une mise à l'arrêt de l'installation et l'extraction de la chaleur résiduelle, avec une alimentation en courant continu et des groupes électrogènes diesel.

La centrale hydroélectrique de Mühleberg et la nouvelle centrale qui la remplacera ne peuvent contribuer à l'alimentation de l'EKKM pour ses besoins propres que de manière limitée, par exemple pour une extraction à long terme de la chaleur résiduelle.

Les exigences réglementaires¹ et légales² concernant la conception et les mesures à prendre contre les accidents peuvent être respectées. Une description concrète sera fournie dans la demande d'autorisation de construire.

¹ Directive DSN R-101 [2]

² Art. 8 par. 1 OENu [2]

4 Radioprotection et exposition aux rayonnements

4.1 Exigences légales et principes de la radioprotection

4.1.1 Généralités sur l'exposition aux rayonnements dus à la centrale EKKM

La centrale nucléaire EKKM prévue sur le site de Niederruntigen doit contribuer à combler la pénurie qui se dessine pour les années à venir dans l'approvisionnement en électricité. Le choix de la conception de la future centrale d'EKKM est effectué notamment dans le souci de minimiser les doses et d'optimiser l'équilibre radiatif. Le présent chapitre traite uniquement des risques liés aux rayonnements ionisants. Le rapport d'impact sur l'environnement aborde les risques liés aux rayonnements non ionisants [33].

L'exposition prévisionnelle aux rayonnements induite par l'exploitation de la centrale d'EKKM est faible comparée à l'exposition naturelle et ne représente aucun risque substantiel supplémentaire pour la population.

Dans l'ensemble, l'exposition aux rayonnements au voisinage du site n'est pas plus importante que celle résultant de la présence de l'actuelle centrale de KKM. Cela s'applique notamment à une éventuelle période transitoire pendant laquelle les deux centrales KKM et EKKM fonctionneront simultanément.

4.1.2 Bases légales

La Loi sur l'énergie nucléaire LENu [1] fixe les principes d'utilisation de l'énergie nucléaire. L'homme et l'environnement doivent être protégés du rayonnement ionisant¹. Les substances radioactives ne peuvent être libérées que dans des quantités ne présentant pas de danger. Il faut en particulier prévenir le rejet excessif de substances radioactives ainsi que l'irradiation excessive des personnes, tant en phase d'exploitation normale qu'en cas d'accident. Pour assurer la prévention, il convient de prendre les conséquences à long terme sur le patrimoine héréditaire². En outre, au titre de la prévention, il faut prendre toutes les mesures qui s'imposent en vertu de l'expérience et de l'état actuel de la science et de la technique³ ainsi que toutes les mesures supplémentaires qui contribuent à diminuer le danger, pour autant qu'elles soient appropriées⁴.

La Loi sur l'énergie nucléaire prescrit également que des mesures de protection en cas d'urgence doivent être préparées pour limiter les dégâts en cas de libération de quantités dangereuses de substances radioactives⁵.

¹ Art. 4, al. 1 LENu [1]

² Art. 4, al. 2 LENu [1]

³ Art. 4, al. 3, let. a LENu [1]

⁴ Art. 4, al. 3, let. b LENu [1]

⁵ Art. 5, al. 2 LENu [1]

Conformément à la Loi sur l'énergie nucléaire LENU [1], la limite maximale d'exposition des personnes aux rayonnements aux alentours de l'installation est fixée dans le cadre de la demande d'autorisation générale¹. En revanche, les limites du rejet de substances radioactives dans l'environnement, les mesures de surveillance des alentours ainsi que les mesures de protection d'urgence devant être prises durant l'exploitation font l'objet de l'autorisation d'exploiter².

Aux termes de la loi sur la radioprotection LRaP [3], une activité pour laquelle l'homme ou l'environnement sont exposés à des rayonnements ionisants (exposition aux rayonnements) ne doit être exercée que si elle se justifie par rapport aux avantages et aux dangers qui y sont liés³. De plus, pour réduire l'exposition aux rayonnements de chaque individu ainsi que l'ensemble des personnes concernées, il y a lieu de prendre toutes les mesures commandées par l'expérience et par l'état de la science et de la technique⁴.

L'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2] resp. l'Ordonnance sur la radioprotection ORaP [4] sont destinées à concrétiser les dispositions de la loi sur l'énergie nucléaire LENU [1] et de la loi sur la radioprotection LRaP [3]. L'OENu stipule notamment que l'exposition aux rayonnements prévisible aux alentours de l'installation doit ressortir du rapport de sécurité accompagnant la demande d'autorisation générale⁵. L'ORaP fixe et énonce les principes justifiant⁶, au sens de la loi [3], l'exercice d'une activité qui expose aux rayonnements et, s'agissant d'activités justifiées, les circonstances dans lesquelles la radioprotection est réputée optimisée⁷. En outre, l'Ordonnance sur la radioprotection définit que l'autorité habilitée à délivrer les autorisations⁸ décide pour quelles entreprises une valeur directrice de dose liée à la source est nécessaire, et fixe celle-ci⁹.

Le rejet de déchets sous forme de gaz, d'aérosol ou de liquide¹⁰ ainsi que les mesures de contrôle y afférentes¹¹ et le rejet de déchets solides¹² sont également réglés dans l'Ordonnance sur la radioprotection ORaP [4]. De même, ces dispositions s'appliquent aux valeurs limites d'émissions¹³ et à la surveillance des émissions par l'entreprise¹⁴. Pour l'essentiel, ces données revêtent ultérieurement de l'importance pour l'autorisation d'exploiter.

¹ Art. 14, al. 1, let. e LENU [1]

² Art. 21, al. 1, let. c-e LENU [3]

³ Art. 8 LRaP [3]

⁴ Art. 9 LRaP [3]

⁵ Art. 23, let. a, chif. 3 OENu [2]

⁶ Art. 8 LRaP [3], art. 5 ORaP [4]

⁷ Art. 6 ORaP [4]

⁸ Selon l'art. 127 ORaP [4]

⁹ Art. 7, al. 2 ORaP [4]

¹⁰ Art. 80 ORaP [4]

¹¹ Art. 81 ORaP [4]

¹² Art. 82, al. 1 ORaP [4]

¹³ Art. 102 ORaP [4]

¹⁴ Art. 103 ORaP [4]

En relation avec les accidents, outre l'exigence formulée dans l'Ordonnance sur la radioprotection ORaP [4] stipulant qu'il faut prendre des mesures propres à empêcher tout accident¹, les exigences posées à la sécurité nucléaire dans l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire sont importantes pour limiter l'exposition aux rayonnements au voisinage de l'installation. Pour autant que cela soit notamment prescrit en relation avec la garantie de la sécurité nucléaire, on devra concevoir l'installation de façon à ce qu'aucun rejet inadmissible de substances radioactives ne se produise aux alentours pour pouvoir maîtriser les accidents ; des systèmes de sécurité passifs et actifs devront être prévus à cet effet² et, en prévision des accidents pouvant libérer des substances radioactives en quantités dangereuses, on devra prendre en outre, sur les plans technique, organisationnel et administratif, des mesures préventives destinées à en atténuer les effets³.

De plus, l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2] requiert la prise de mesures de protection contre les accidents ayant leur origine à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation⁴ et la démonstration que les limites des doses⁵ visées dans l'Ordonnance sur la radioprotection pour la prévention d'accidents peuvent être respectées⁶.

La demande d'autorisation de construire doit exposer que les principes susmentionnés concernant la sécurité nucléaire sont respectés⁷ et justifier, par le biais d'analyses probabilistes, que le critère⁸ de l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2] relatif à la fréquence moyenne des dommages au cœur en cas d'accident peut être respecté⁹.

4.1.3 Justification et optimisation de l'exposition aux rayonnements

Par principe, la production d'énergie électrique par le biais d'une centrale nucléaire est liée à une certaine exposition aux rayonnements. Sur la base des mesures prescrites par la loi, l'on garantit que l'exposition de l'homme et de l'environnement aux rayonnements est faible comparée à la radioactivité d'origine naturelle. L'on garantit également que les valeurs limites de l'exposition aux rayonnements des personnes travaillant dans l'installation sont respectées et que l'exposition aux rayonnements de chaque personne est limitée en fonction de l'état actuel de la science et de la technique. Le respect de la loi sur la radioprotection garantit la protection de l'homme et de l'environnement contre les dangers dus aux rayonnements ionisants¹⁰.

Aux termes de la loi sur la radioprotection, une activité par laquelle l'homme ou l'environnement sont exposés à des rayonnements ionisants (exposition aux rayonnements) ne doit être exercée que si elle se justifie par rapport aux avantages et aux dangers qui y sont liés¹¹.

¹ Art. 94, al. 1 ORaP [4]

² Art. 7, let. c OENu [2]

³ Art. 7, let. d OENu [2]

⁴ Art. 8, al. 1, al. 2 u. 3 OENu [2]

⁵ selon l'art. 94, al. 2 à 5 ORaP [4]

⁶ Art. 8, al. 4 OENu [2]

⁷ Art. 24, al. 1, let. a OENu [2]

⁸ Selon l'art. 24, al. 1, let. b OENu [2]

⁹ Art. 8, al. 5, al. 6 OENu [2]

¹⁰ Art. 1 LRaP [3]

¹¹ Art. 8 LRaP [3]

Selon la Commission Internationale de protection radiologique CIPR [5], une exposition aux rayonnements est justifiée lorsqu'on a pesé les avantages et les inconvénients ainsi que l'utilité et les risques que présente l'activité liée à la radio-exposition. Pareille évaluation ne peut être que générale et qualitative ; elle ne saurait être quantifiée tout au plus que partiellement et, par conséquent, restera toujours une affaire d'appréciation. Ainsi, la décision d'admettre ou non une activité liée à une exposition aux rayonnements est, en fin de compte, une décision politique. La CIPR estime que la justification existe d'une façon générale lorsque le législateur a établi des prescriptions légales régissant une activité. La question du principe de la justification ne doit donc pas être posée pour chaque autorisation particulière¹.

Ainsi, la justification de l'exposition aux rayonnements causée par la centrale d'EKKM existe d'une manière générale par la loi sur l'énergie nucléaire LEnu [1], puisqu'elle régit l'utilisation pacifique et sûre de l'énergie nucléaire et a notamment pour but de protéger l'homme et l'environnement contre ses dangers².

Conformément à la loi sur la radioprotection LRaP [3], il y a lieu de prendre toutes les mesures commandées par l'expérience et par l'état de la science et de la technique pour réduire l'exposition aux rayonnements de chaque individu ainsi que de l'ensemble des personnes concernées³. Les dépenses faites en vue de limiter l'exposition aux rayonnements doivent être raisonnablement proportionnées à la réduction de l'exposition aux rayonnements que l'on peut atteindre⁴. L'exposition résiduelle aux rayonnements après application de l'optimisation⁵ concrétisée dans l'Ordonnance sur la radioprotection ORaP [4] doit ainsi être, selon le principe de la proportionnalité, aussi faible que cela est raisonnable.

4.1.4 Principes aux fins de limiter l'exposition aux rayonnements

Aux fins de limiter l'exposition aux rayonnements de chaque individu ainsi que de l'ensemble des personnes, la loi sur la radioprotection LRaP [3] prescrit de prendre toutes les mesures commandées par l'expérience et par l'état de la science et de la technique. Cette exigence est remplie, d'une part par la conception de l'installation (chap.4.1.4.1) et, d'autre part, par les mesures à prendre pour la protection du personnel au sein de l'installation lors de sa future mise en service et de son exploitation (chap. 4.1.4.2). D'autres éléments sont également destinés à limiter l'exposition aux rayonnements. Il ne s'agit pas seulement du strict respect de la valeur directrice de dose liée à la source fixée par les autorités (chap. 4.1.4.3), mais, notamment, également de la prévention en vue de limiter encore les risques liés aux rayonnements ionisants (chap.4.1.4.4).

¹ Cf. FF 1988 192

² Art. 1 LEnu [1]

³ Art. 9 LRaP [3]

⁴ Cf. FF 1988 193

⁵ Art. 6 ORaP [1]

4.1.4.1 Principes conceptuels pour l'installation quant à la radioprotection

La conception de la centrale d'EKKM est strictement liée aux principes de la sécurité nucléaire énoncés dans la Loi sur l'énergie nucléaire LENu [1]. Il faut en particulier prévenir le rejet excessif de substances radioactives ainsi que l'irradiation excessive des personnes, tant en phase d'exploitation normale qu'en cas d'accident¹. À cet effet, dès la conception de l'installation, il conviendra de prendre toutes les mesures qui s'imposent en vertu de l'expérience et de l'état de la science et de la technique². Dans le même esprit, il conviendra également de prendre toutes les mesures qui contribuent à diminuer le danger, pour autant qu'elles soient appropriées³.

Dès la conception de l'installation, il convient de prendre des mesures de protection obéissant aux principes reconnus sur le plan international qui comprennent notamment l'utilisation d'éléments de construction de qualité, la mise en place de barrières de sécurité multiples (voir chap. 2.5.1) ainsi que la pluralité et l'automatisation des systèmes de sécurité⁴.

Comme le requiert l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire⁵, il faut concevoir la centrale d'EKKM de façon à empêcher le rejet inadmissible de substances radioactives aux alentours de l'installation et prévoir des systèmes de sécurité actifs et passifs à cet effet. En outre, les principes régissant la conception d'une centrale nucléaire, énoncés dans l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire⁶, devront être mis en oeuvre de manière conséquente.

Les parties de l'installation servant à entreposer des déchets radioactifs et des éléments de combustible doivent être conçues, conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire⁷, de manière à ne pas porter atteinte à l'aptitude au stockage final des fûts (colis) de déchets et à offrir une capacité suffisante pour couvrir les besoins prévisibles.

L'optimisation⁸ requise dans l'Ordonnance sur la radioprotection ORaP est prise en considération, le cas échéant, dans la conception de la centrale d'EKKM par le biais de l'évaluation de différentes solutions appropriées du point de vue de la radioprotection et par la prise en compte des risques d'accident et de l'évacuation des sources radioactives. Ce dernier point comprend notamment une optimisation utile issue des expériences faites avec des projets de désaffectation concrets en vue du démantèlement ultérieur de la centrale d'EKKM (cf. chap. 7.2. Concept de désaffectation EKKM [107]).

L'EKKM doit être conçue de manière à ce que les valeurs limites d'émissions⁹ fixées dans l'Ordonnance sur la radioprotection puissent être respectées lors de son exploitation et que la surveillance des émissions¹⁰ par l'entreprise puisse se dérouler conformément aux prescriptions.

¹ Art. 4, al. 1 LENu [1]

² Art. 4, al. 3, let. a LENu [1]

³ Art. 4, al. 3, let. b LENu [1]

⁴ Selon l'art. 5, al. 1 LENu [1]

⁵ Art. 7, let. c OENu [2]

⁶ Art. 10, al. 1 OENu [2]

⁷ Art. 12, al. 2 OENu [2]

⁸ Art. 6, notamment al. 1 ORaP [4]

⁹ Art. 102 ORaP [4]

¹⁰ Art. 103 ORaP [4]

Lors de la conception de la centrale d'EKKM, il est prévu d'essayer de s'assurer, dans les contacts entretenus avec les fournisseurs potentiels, à ce que les aspects de la radioprotection soient pris en compte dès le stade initial du design de l'installation. Cela s'applique en particulier à la description technique figurant dans les concepts accompagnant la demande de permis de construire conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire¹. Font partie intégrante de cette demande : les concepts pour les zones radiologiques, l'écran de protection, la surveillance des alentours, la surveillance de l'espace, du système et des émissions, de la protection d'urgence, des eaux usées, du procédé de conditionnement des déchets et de l'entreposage des déchets. Lors de l'évaluation de ces concepts, une attention particulière est accordée au critère d'une séparation propre entre la zone contrôlée et la zone non contrôlée aussi bien du point de vue de la construction qu'en relation avec les systèmes de l'installation.

4.1.4.2 Principes de protection des personnes au sein de l'installation

La protection des personnes exposées aux rayonnements est régie au chapitre 2 de la Loi sur la radioprotection LRaP [3]. Sont déterminantes pour une installation nucléaire les dispositions relatives au respect des valeurs limites de dose², à la mesure de la dose de rayonnement³, aux mesures médicales applicables aux personnes professionnellement exposées aux rayonnements⁴, à la communication des données médicales⁵ ainsi qu'à la responsabilité au sein des entreprises⁶. Conformément aux prescriptions de l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire⁷, les mesures visant au respect de ces dispositions sont exposées dans les documents requis pour l'autorisation d'exploiter, notamment dans le Règlement de la radioprotection.

Le principe de l'optimisation⁸, expliqué au chap. 4.1.4.1, est appliqué en particulier lorsqu'il s'agit de la protection des personnes au sein de l'installation. Cela concerne, d'une part la planification du projet et du travail pour laquelle les prescriptions y afférentes sont édictées dans le dossier d'exploitation⁹, et en particulier dans le Règlement de la radioprotection. D'autre part, dès la conception de l'installation (cf. chap. 4.1.4.1) et de la même façon que pour des modifications ultérieures¹⁰, le principe de l'optimisation est appliqué de manière conséquente. Cela est également garanti par la procédure d'attribution de l'autorité de surveillance dans la mesure où, conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire¹¹, les documents à fournir à ladite autorité de surveillance pour l'évaluation des aspects relatifs à la radioprotection contenus dans les demandes d'autorisation et de permis doivent notamment renseigner sur les critères de conception et les concepts, le dimensionnement des équipements radiologiques, le justificatif d'exécution ainsi que la mise en service et la documentation.

¹ Art. 24, al. 2, let. a et annexe 4 OENu [2]

² Art. 11 LRaP [3]

³ Art. 12 LRaP [3]

⁴ Art. 13 LRaP [3]

⁵ Art. 14 LRaP [3]

⁶ Art. 16 LRaP [3]

⁷ Art. 24, al. 2, let. a, resp. art. 28, al. 1, let. a-b ainsi que les annexes 3 et 4 OENu [2]

⁸ Art. 6 ORaP [4]

⁹ Selon art. 28, al. 1, let. a et art. 41, al. 1-2, annexe 3 OENu [2]

¹⁰ Art. 65, al. 3 LENu [1] et art. 40, al. 2, annexe 4 OENu [2]

¹¹ Art. 24, al. 2, let. a ; art. 26, al. 2 ; art. 28, al. 1, let. b ; art. 29, al. 2 et art. 40, al. 2, annexe 4 OENu [2]

D'une manière générale, en application du principe de l'optimisation (cf. chap. 4.1.3) la protection des personnes au sein de la centrale d'EKKM est optimisée au sens des prescriptions de l'Ordonnance sur la radioprotection¹ eu égard au fait que les différentes solutions appropriées ont été évaluées et pesées les unes par rapport aux autres du point de vue de la radioprotection, que le processus de décision ayant conduit à la solution choisie peut être reconstitué et que le risque d'accident et l'évacuation des sources radioactives ont été pris en considération.

4.1.4.3 Valeur directrice de dose liée à la source

Pour les installations nucléaires, la valeur directrice de dose liée à la source sert, au sens de l'Ordonnance sur la radioprotection², à la fixation prévue dans l'autorisation générale de la limite maximale d'exposition des personnes aux rayonnements aux alentours de l'installation³ selon la loi sur l'énergie nucléaire⁴. La valeur directrice de dose est fixée⁵ par l'autorité qui délivre les autorisations⁶ selon le principe de l'optimisation en tenant compte des rejets de substances radioactives et du rayonnement direct provenant d'autres entreprises⁷, de manière à ce qu'elle ne dépasse pas⁸ la valeur limite de dose applicable aux personnes exposées aux rayonnements dans des circonstances non liées à l'exercice de leur profession⁹. L'autorité qui délivre les autorisations fixe la valeur directrice de dose en tenant compte des conséquences à long terme sur le patrimoine héréditaire ainsi que le requiert expressément la loi sur l'énergie nucléaire¹⁰.

Cette valeur directrice de dose liée à la source s'applique à toute l'exposition¹¹ provenant du site de la centrale nucléaire pendant un an qui résulte, d'une part du rayonnement direct issu des installations sur le site, et d'autre part, des rejets radioactifs qu'elles engendrent et qui ont des effets sur l'immersion et l'inhalation par les voies respiratoires, l'ingestion, le prélèvement d'eau potable, les produits d'origine végétale et animale ainsi que sur l'organisme humain par végétaux du fait de l'irradiation du sol. La valeur directrice de dose s'applique à tous les individus, en particulier à un groupe de personnes fictif déterminé avec réserve qui est supposé vivre et travailler sur le lieu présentant la plus forte dose totale résultant de l'irradiation mentionnée ci-avant, qui couvre ses besoins avec les légumes, les fruits, le lait et la viande dudit lieu et prélève l'eau potable et pêche les poissons de la rivière en aval de l'installation.

La valeur directrice de dose liée à la source doit être respectée aussi bien dans des conditions normales qu'en cas d'accidents pouvant survenir tous les 10 ans ou plus fréquemment¹². Pour les

¹ Art. 6, al. 1 ORaP [4]

² Art. 7 ORaP [4]

³ C. FF 2001 2766

⁴ Art. 14 al. 1 let. e LENu [4]

⁵ Art. 7, al. 2 ORaP [4]

⁶ Selon l'art. 127 ORaP [4]

⁷ Art. 7, al. 3 ORaP [4]

⁸ Art. 7 al. 1 ORaP [4]

⁹ Selon art. 37 ORaP [4]

¹⁰ Art. 4 al. 2 LENu [4]

¹¹ exception faite de cas particuliers à observer séparément, qui, toutefois, ne contribuent généralement pas à l'irradiation importante du groupe de personnes critique.

¹² Art. 94, al. 2 ORaP [4]

accidents dont la fréquence se situe tous les 10 à 100 ans, chaque accident ne doit pas générer une dose supplémentaire excédant la valeur directrice de dose annuelle liée à la source¹.

Lors de la fixation de la valeur directrice de dose liée à la source, l'autorité qui délivre les autorisations considère comme source tous les points de rejet contrôlables sur un site. Afin de tenir compte de la superposition éventuelle de plusieurs sources, la Commission Internationale de protection radiologique CIPR [5] a recommandé une valeur directrice de dose liée à la source raisonnable n'excédant pas quelque 0.3 mSv par an pour chaque source². Ainsi, en cas d'émissions supplémentaires provenant d'autres sources, il n'est pas nécessaire de prévoir l'hypothèse d'un dépassement de la valeur directrice de dose.

En vertu de cette recommandation, une valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/a a été fixée³ pour le site de l'actuelle centrale de KKM. Cela signifie que dans des conditions normales et en cas d'incidents d'exploitation, le rejet maximal de substances radioactives dans l'environnement est limité de manière à ce que l'exposition globale aux rayonnements de chaque individu de la population n'excède pas 0.2 mSv/a⁴ et que celle résultant du rayonnement direct de l'installation ne dépasse pas 0.1 mSv/a.

La centrale d'EKKM sera construite à proximité immédiate de l'actuelle centrale de KKM. Du point de vue radiologique, les deux installations peuvent être considérées comme une source radioactive unique sur un site pour lequel une seule valeur directrice de dose liée à la source est appliquée. La future détenteur d'une autorisation d'exploiter la centrale d'EKKM et la détenteur d'une autorisation pour l'actuelle centrale de KKM régleront contractuellement l'utilisation commune de la valeur directrice de dose liée à la source fixée pour le site des deux installations.

Sans préjuger de l'autorité qui délivre l'autorisation lors de la fixation de la valeur directrice de dose liée à la source, il convient de remarquer ici que le report de la valeur directrice de dose liée à la source pour l'actuelle centrale de KKM sur le site commun KKM / EKKM constitue une solution évidente.

¹ Art. 94, al. 3 ORaP [1]

² CIPR Publication 82 (Annals of the CIPR, vol. 29, no. 1-2, 1999), par. 38, p. 30, 32

³ Voir p. ex. HSK Rapport sur la radioprotection 2007, p. 52

⁴ Voir p. ex. HSK Rapport sur la radioprotection 2007, p. 62

4.1.4.4 Principes des mesures supplémentaires contribuant à diminuer le danger dû aux rayonnements ionisants

Outre les mesures destinées à limiter l'exposition aux rayonnements¹ exigées par la loi sur la radioprotection, la loi sur l'énergie nucléaire requiert, au titre de la prévention, de prendre toutes les mesures supplémentaires qui contribuent à diminuer le danger, pour autant qu'elles soient appropriées².

À ces fins, des mesures préventives contribuant à minimiser les émissions de substances radioactives dans l'air et les eaux seront prises lors de la conception de la centrale d'EKKM ainsi que pendant sa durée d'exploitation. Cette prévention comprend, d'une part la conception des installations de retenue des substances radioactives correspondant à l'état de la science et de la technique, et d'autre part, la mise en œuvre de programmes ainsi que la prise de mesures d'exploitation qui répondent également à l'état de la science et de la technique en ce qui concerne la pratique environnementale.

L'on garantit ainsi que les émissions de substances radioactives causées par la centrale d'EKKM soutiendront la comparaison avec celles d'autres centrales nucléaires d'Europe de l'Ouest. Concrètement, l'on peut partir de l'hypothèse que les émissions de substances radioactives de la centrale d'EKKM ne seront pas plus élevées que celles des nouvelles installations suisses en exploitation qui abritent le même type de réacteur.

L'on garantit également que les autorités compétentes sont en mesure de prendre en considération les recommandations [37] faites en ce sens, notamment celles de la Convention internationale pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est [36], conformément à leur mandat d'exécution des prescriptions en matière d'environnement [35].

4.2 Exposition aux rayonnements au voisinage de l'installation

L'exposition aux rayonnements au voisinage de la centrale d'EKKM se compose de l'exposition aux rayonnements due aux rejets de substances radioactives sous forme de gaz, d'aérosol ou de liquide et de l'exposition directe émanant de l'installation. Outre l'exposition aux rayonnements résultant de l'exploitation normale de l'installation, il convient d'observer les expositions causées par des accidents qui doivent être classés selon leur fréquence conformément à l'Ordonnance sur la radioprotection³ et de prouver que les doses fixées pour l'installation peuvent être respectées.

Eu égard à la stricte observation des principes en relation avec l'exposition aux rayonnements qui figurent dans la loi sur l'énergie nucléaire⁴ et la législation sur la radioprotection⁵ dans la conception, la construction et l'exploitation de la centrale d'EKKM, l'on peut penser que l'exposition aux rayonnements générée par cette centrale au voisinage de l'installation ne sera pas plus élevée que celle des nouvelles installations suisses en exploitation qui abritent le même

¹ Art. 9 L RaP [3]

² Art. 4, al. 3, let. b L ENu [1]

³ Art. 94, al. 2 à 5.8 O RaP [3]

⁴ Art. 4 L ENu [1]

⁵ Art. 9 L RaP [3] et art 79 O RaP [4]

type de réacteur, ce qui vaut aussi pour l'exposition aux rayonnements attendue en cas d'accident majeur.

4.2.1 Respect de la limite maximale admissible de l'exposition aux rayonnements au voisinage de l'installation

L'autorisation d'exploiter fixe les limites du rejet de substances radioactives dans l'environnement¹. Ces limites du rejet de substances radioactives sont déterminées de telle sorte que la valeur directrice de dose liée à la source, fixée dans l'autorisation générale, soit respectée². La centrale d'EKKM sera exploitée de manière à toujours respecter ces limites ainsi que la valeur directrice de dose liée à la source, ce qui permet également de toujours respecter la limite d'exposition maximale admissible aux rayonnements au voisinage de l'installation.

L'autorisation d'exploiter selon la loi sur l'énergie nucléaire³ prévoit l'obligation faite au propriétaire de l'installation de prendre des mesures de surveillance des alentours, ce qui garantit à tout moment l'existence d'une preuve relative au respect de la limite maximale admissible de l'exposition aux rayonnements au voisinage de l'installation. Conformément aux prescriptions de l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire⁴, la fourniture de cette preuve fait également partie des rapports périodiques. La fourniture de la preuve est effectuée par le biais de modèles répondant à l'état de la science et de la technique qui correspondent aux prescriptions de l'Ordonnance sur la radioprotection pour la prévention des accidents majeurs⁵ ainsi qu'à la méthode et aux conditions applicables au calcul de la dose de rayonnement de la population aux environs d'une installation nucléaire résultant du rejet de substances radioactives sous forme de gaz et d'aérosols par voie aérienne et sous forme liquide dans les eaux usées, de manière conforme à l'état de la science et de la technique.

4.2.2 Exposition aux rayonnements due aux rejets de substances radioactives

Conformément à l'Ordonnance sur la radioprotection⁶, les déchets radioactifs sous forme de gaz, d'aérosol ou de liquide provenant de la centrale d'EKKM ne peuvent être rejetés que par l'air évacué dans l'atmosphère ou par les eaux usées déversées dans l'Aar.

¹ Art. 21, al. 1, let. c LENU [3]

² Cf. FF 2001 2770

³ Art. 21, al. 1, let. d LENU [3]

⁴ Art. 37, al. 1, annexe 5 OENU [4]

⁵ Art. 94, al. 8 ORaP [4]

⁶ Art. 80, al. 1 ORaP [4]

4.2.2.1 Émissions radioactives gazeuses et aériennes

Depuis la zone contrôlée de l'installation, l'air est rejeté dans l'environnement par le biais de la cheminée d'évacuation au moyen de processus industriels tels que l'aspiration du condensateur et la ventilation. De ce fait, l'air évacué qui contient des substances radioactives gazeuses et aériennes est rejeté sous contrôle. Il est prévu d'équiper les voies de rejets avec des filtres afin de maintenir les rejets à un niveau aussi bas que possible, pour autant qu'il soit raisonnable, selon les principes énoncés au chapitre 4.1.4.

Le parcours d'émission est muni de balises de contrôle pour surveiller et comptabiliser l'activité radioactive rejetée. En outre, il est prévu de faire acheminer autant que possible les rejets par un seul point : la cheminée d'évacuation.

4.2.2.2 Émissions radioactives liquides

L'eau radioactive provenant de l'installation est collectée et traitée. L'eau traitée est rejetée de manière contrôlée. Les systèmes nécessaires sont conçus de façon à maintenir les effluents radioactifs à un niveau aussi bas que possible, pour autant qu'il soit raisonnable, selon les principes énoncés au chapitre 4.1.4.

Les émissions sont contrôlées et comptabilisées afin de respecter les valeurs limites et les limites correspondantes ainsi que les autres objectifs de la radioprotection. Les lignes de retour des systèmes de refroidissement (avec eau de la rivière ou eaux souterraines) sont également contrôlés afin d'identifier et d'éviter des contaminations occasionnées par d'éventuelles fuites dans les échangeurs de chaleur ou autres barrières.

4.2.3 Exposition aux rayonnements par le rayonnement direct

Selon les principes énoncés au chap. 4.1.4, des blindages adéquats ainsi que des mesures inhérentes à l'entreprise doivent garantir que le rayonnement direct sera maintenu à un niveau aussi bas que possible, pour autant qu'il soit raisonnable, et, notamment, qu'il ne donnera pas lieu à des doses excédant 1 mSv/a dans les locaux d'habitation, de séjour et de travail et 5 mSv/a dans tout autre endroit comme l'exige l'Ordonnance sur la radioprotection¹. Il est en outre garanti que l'exposition aux rayonnements de chaque individu de la population résultant du rayonnement direct de l'installation ne dépasse pas 0.1 mSv/a (cf. chap. 4.1.4).

La dose locale, resp. le débit de dose locale, est surveillée à l'aide de systèmes de mesure appropriés au voisinage de la centrale d'EKKM ainsi que sur les clôtures de l'aire de cette centrale.

¹ Art. 102, al. 3 ORaP [4]

4.2.4 Exposition aux rayonnements dues aux émissions lors d'incidents d'exploitation et d'accidents

En concevant l'installation (cf. chap.4.1.4.1) contre les accidents ayant leur origine à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation, à l'aide de mesures de protection passives et actives conformes à l'état de la science et de la technique, les conditions sont créées pour faire descendre l'exposition aux rayonnements de la population également au-dessous les valeurs limites légales en cas d'accidents selon le principe de la proportionnalité.

Afin de prouver que toutes les limites radiologiques pertinentes sont respectées en cas d'accident, l'on procède à une analyse des conditions de fonctionnement et des accidents déterminant le dimensionnement et de leurs effets sur l'installation et ses environs, qui prend en considération la classification des accidents de l'Ordonnance sur la radioprotection¹. Cette analyse peut être effectuée ultérieurement à la conception de l'installation et fait partie intégrante des documents requis pour la demande d'autorisation de construire conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire².

À la suite de la conception de l'installation selon les principes mentionnés au chapitre 4.1.4.1, il convient de partir du principe selon lequel, en cas d'accidents de toutes les catégories, l'exposition aux rayonnements devra être aussi faible que celle résultant d'accidents comparables dans les installations suisses existantes les plus récentes.

Sur la base de la conception de l'installation correspondant à l'état actuel de la science et de la technique, l'on peut supposer en outre que des émissions radioactives plus importantes seront évitées même si quelques-unes des défaillances réputées dans les installations actuelles hors dimensionnement se produisent.

4.2.5 Contrôle des émissions d'exploitation

La mesure des émissions radioactives est définie comme une tâche de la radioprotection dans l'exploitation de la centrale d'EKKM et fait partie du dossier d'exploitation accompagnant les documents requis pour la demande d'autorisation d'exploiter³. Conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire⁴, le Règlement de la radioprotection, en tant que document organisationnel, doit être tenu à jour pendant toute la durée de l'exploitation de la centrale et ce jusqu'à l'issue du démantèlement, et être adapté continuellement à l'état de la technique.

En harmonie avec les prescriptions de l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire⁵, le contrôle des émissions d'exploitation doit assurer la traçabilité de l'exploitation au moyen de relevés d'exploitation et de justificatifs.

¹ Art. 94, al. 2 à 5, 8 ORaP [4]

² Art. 24, al. 2, let. a, annexe 4 OENu [2]

³ Art. 28, al. 1, let. a, annexe 3 OENu [2]

⁴ Art. 41, al. 1, annexe 3 OENu [2]

⁵ Art. 41, al. 2, annexe 3 OENu [2]

4.2.6 Respect des valeurs limites d'émissions

Le respect des valeurs limites d'émissions fixées dans l'Ordonnance sur la radioprotection¹ est assuré par la détermination des valeurs limites des rejets de substances radioactives et le contrôle des émissions d'exploitation mentionnés au chapitre 4.2.1 ainsi que par la limitation du rayonnement direct et son contrôle présentés au chapitre 4.2.3.

En accord avec l'Ordonnance sur la radioprotection², sur la base de ses obligations générales, le futur exploitant de la centrale d'EKKM surveillera lui-même par des mesures techniques ou fera surveiller par des services externes agréés par l'autorité de surveillance les émissions de substances radioactives et le rayonnement direct résultant de l'exploitation de la centrale d'EKKM comme éléments du dossier complet sur l'exploitation selon la Loi sur l'énergie nucléaire³. En outre, elle communiquera régulièrement les résultats obtenus à l'autorité de surveillance. Comme le prévoit l'Ordonnance sur la radioprotection⁴, des mesures du bruit de fond local sont effectuées pendant quelques années, p. ex. avant la mise en exploitation de l'EKKM, pour surveiller le respect des valeurs limites d'émissions au sens d'une mesure de contrôle.

Par analogie aux contrôles des émissions d'exploitation indiqués au chapitre 4.2.5, la surveillance des émissions est définitivement fixée dans le cadre de l'autorisation d'exploiter.

¹ Art. 102 ORaP [4]

² Art. 103 ORaP [4]

³ Art. 22, al. 2, let. i LENu [1]

⁴ Art. 81, al. 4 ORaP [4]

5 Personnel et organisation, facteurs humains et organisationnels

5.1 Introduction

Tenant compte des exigences décrites dans l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu¹, ce chapitre présente les informations importantes concernant le domaine « Personnel – Organisation – FOH » pour les différentes phases du projet EKKM. Sont notamment examinés dans le présent chapitre, les bases de la future organisation de la centrale ainsi que les principes des démarches qui seront engagées dans le domaine des facteurs humains et organisationnels.

Les actuelles phases du projet (Etudes préliminaires à la détermination du site et à la planification d'ensemble du projet) occupent le premier plan de ce chapitre tandis que les phases suivantes du projet (Etudes préliminaires et conception ; Construction ; Exploitation ; ...) sont uniquement évoquées. Des données détaillées concernant ces phases seront précisées dans le cadre de la procédure ultérieure d'autorisation.

5.2 Principes relatifs au personnel et à l'organisation

Les principes liés au personnel et à l'organisation de EKKM reposent sur les exigences de la législation : Loi sur l'énergie nucléaire LENu [1], Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu [2], Loi sur la radioprotection LRaP [3] et Ordonnance sur la radioprotection ORaP [4], ainsi que sur d'autres ordonnances y afférant (notamment l'Ordonnance sur les qualifications du personnel des installations nucléaires OQPN [79]) et sur les directives des autorités et des organisations mandatées le cas échéant par les autorités.

Une organisation est développée pour les différentes phases de déroulement du projet. Cette organisation permet :

- d'élaborer des processus de projet et d'autorisation qui permettent de démontrer que toutes les exigences relatives à la sécurité sont remplies
- d'harmoniser les processus de projet et d'autorisation de manière optimale de telle sorte que les besoins résultant des processus d'autorisation puissent être pris en compte pendant le déroulement du projet
- d'adapter l'organisation en fonction des besoins et des caractéristiques des différentes phases du projet.

¹ Art. 23, let. a, chif. 4 OENu [2]

L'organisation pour la construction et l'exploitation d'une nouvelle centrale nucléaire comme EKKM doit nécessairement évoluer au cours du projet. Toutefois, quelques principes sont communs à ces différentes phases notamment :

- la prise en compte de la sécurité nucléaire (par une conception prudente, une fabrication de haute qualité, une direction d'exploitation responsable, etc.) et de la culture de la sécurité¹
- la prise en compte de la sécurité conventionnelle
- la sûreté de l'installation
- l'harmonisation des processus du projet et d'autorisations
- la gestion des interfaces, la détermination de leurs rôles et de leurs responsabilités et la communication entre le responsable du projet (le futur détenteur de l'autorisation) et les fournisseurs ainsi qu'entre le responsable du projet et les autorités de surveillance.

Ces principes seront mis en œuvre de sorte à ce que les tâches du personnel et les compétences soient adéquates et prennent en compte la sécurité dans toutes phases du projet. L'entité qui pilote le projet ainsi que le futur détenteur de l'autorisation s'assurent que les ressources professionnelles et méthodologiques ainsi que les compétences du personnel sont conformes aux besoins. Ils s'assurent également que les fournisseurs mettent également à disposition toutes les compétences et ressources nécessaires au projet. Afin de garantir une surveillance intégrale des activités confiées aux fournisseurs, l'entité qui pilote le projet ainsi que le futur détenteur de l'autorisation s'engagent à connaître et comprendre l'ensemble des produits et prestations de service des fournisseurs (« Intelligent Customer Capability »).

En harmonie avec les principes relatifs à la culture de la sécurité formulés par l'AIEA (INSAG-4, voir [80]), l'entité qui pilote le projet ainsi que le futur détenteur de l'autorisation et ses représentants, en particulier la direction responsable de l'exploitation du futur site, engagent tous les moyens (ressources en personnel, moyens financiers et matériels) pour que la première priorité soit accordée à la sécurité dans toutes les activités et pour s'assurer que cela soit toujours le cas.

En outre, ils s'engagent en faveur du développement continu de la sécurité. La garantie de la sécurité et de la sûreté ainsi que la protection du personnel et de la population représenteront leur objectif primordial dans toutes les phases du projet ainsi que pendant toute la durée de vie de l'installation. Les principes de la culture de la sécurité seront strictement respectés et mis en application au travers par exemple de la démarche de progrès permanent, de la prise en compte du retour d'expérience et des principaux aspects liée au personnel, aux installations / matériels et à l'organisation.

Les principes de la culture de la sécurité seront progressivement définis au cours du projet. Ces principes seront complétés pendant la construction puis précisés en fonction du retour d'expérience pour la phase d'exploitation.

Des réflexions adéquates, approfondies et complètes concernant la sécurité seront nécessaires dès le début du projet et jusqu'à la désaffectation de l'installation. La prise en compte des éléments de sécurité nucléaire suivants sera indispensable :

¹ La culture de la sécurité est la somme de toutes caractéristiques et de toutes les attitudes dans les organisations et chez les individus qui garantissent que l'attention portée aux thèmes de la sécurité nucléaire, eu égard à leur importance, revêt la première des priorités

- Ingénierie nucléaire dans le domaine des analyses déterministes et probabilistes
- Facteurs organisationnels et humains (voir chap. 5.4ss.)
- Gestion de la qualité (assurance-qualité, contrôle-qualité). Conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu¹, un programme de gestion de la qualité est élaboré d'une part, pour les phases d'étude et d'autre part, pour la phase de construction (voir également chap. 2.8).

Le personnel nécessaire aux différentes phases du projet, les compétences nécessaires, l'organisation et les responsabilités sont présentés dans les demandes d'autorisation de construire et d'exploiter. Les diverses phases du projet avec les caractéristiques envisagées quant au personnel et à l'organisation sont décrites succinctement dans la section ci-après.

5.3 Développement du domaine organisationnel dans le projet EKKM

Les organisations mises en place aux différentes phases du projet depuis les études préliminaires, la construction, l'exploitation et la désaffectation ainsi que les tâches et compétences du personnel seront progressivement définies. Les détails relatifs à ces organisations et à leurs processus sont fixés dans les documents correspondants (exemples : Manuel Qualité ; Documents sur les processus ; Règlement d'entreprise). Ces documents couvriront les domaines suivants :

- Exploitation du réacteur (avec l'effectif minimal de personnel requis)
- Radioprotection
- Maintenance
- Evaluation de la sécurité ; Analyse des événements
- Etudes liées aux modifications apportées à l'installation
- Formation continue et perfectionnement du personnel, exigences en matière de qualifications (notamment pour le personnel détenteur d'une habilitation).

Etudes préliminaires à la détermination du site et à la planification d'ensemble du projet

Dans cette phase, l'organisation de projet comprend essentiellement des domaines spécialisés en matière d'ingénierie nucléaire qui procède à des études sur l'adéquation d'un site possible et déterminent l'impact sur l'environnement, ainsi que les aspects liés à la sécurité, la sûreté et à l'aménagement de ce site. Dans ces études, l'examen des risques envisageables sur le site constitue un aspect essentiel. Les futurs programmes relatifs à l'ingénierie des Facteurs Organisationnels et Humains (FOH) seront fixés, mais ils ne sont pas encore intégrés dans l'organisation.

L'équipe de projet pour l'élaboration de la demande d'autorisation générale se compose d'une équipe dont les membres, à titre de chefs de projet, sont responsables des activités menées dans les domaines de la sécurité et de la sûreté, de la gestion des déchets, de la désaffectation ainsi que des études sur l'impact du projet sur l'environnement et l'aménagement du site. Cette équipe accompagne également d'une manière générale les études sur l'analyse de la situation et les conceptions envisageables pour l'installation. Constituée avec soin, cette équipe regroupe des

¹ Art. 24 et 25 OENu [2]

personnes qui ont acquis une solide expérience par leur longue activité dans le domaine nucléaire et la conduite de projets nucléaires dans des sociétés partenaires (voir chap. 1.3) ou des organisations apparentées.

Cette équipe sera soutenue dans son travail par d'autres experts de sociétés partenaires ainsi que par des experts externes qui ont été sélectionnés notamment sur la base de leur expérience en matière de projets nucléaires. Des sociétés suisses ainsi que des sociétés internationales seront mandatées, à titre d'experts externes, pour exécuter des tâches dans leurs domaines spécialisés respectifs. L'équipe de projet assume la responsabilité de mandater l'ensemble de ces experts, la coordination de leurs travaux et la surveillance au titre de l'assurance-qualité des résultats obtenus. Bien qu'un programme formel de gestion de la qualité ne soit pas encore établi, des processus pertinents seront mis en œuvre au titre de l'assurance-qualité en particulier pour surveiller les documents produits (voir chapitre 2.8).

Etudes préliminaires et conception

L'organisation de projet pendant les études préliminaires sera élargie à une équipe de projet complète dans laquelle toutes les disciplines de l'ingénierie nucléaire (dont l'ingénierie FOH) seront représentées pour examiner les technologies de réacteur possibles et, après avoir choisi une technologie, pour mener les analyses détaillées nécessaires à la présentation de la demande d'autorisation de construire. L'élaboration d'une spécification et l'analyse des offres ainsi que les analyses détaillées relatives à la conception constituent les points clés de cette phase du projet.

L'effectif de l'équipe projet sera renforcé afin que l'organisation dispose des compétences essentielles requises pour mener à bien les études. Le recours à des experts reconnus dans divers domaines particuliers se poursuivra. De même le fournisseur du réacteur représentera ultérieurement un appui important pour les analyses détaillées. Un programme de gestion de la qualité sera élaboré dans cette phase du projet conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu¹.

Construction

L'organisation de projet constituée pour les études préliminaires et la conception sera maintenue car les phases « Etudes préliminaires et de conception » et « Construction » se superposeront dans une large mesure. En outre, l'organisation du futur détenteur de l'autorisation responsable de la construction est constituée à ce stade du projet.

Elle doit comprendre toutes les disciplines requises dans le domaine nucléaire et des FOH, mais également déjà inclure des éléments en perspective de la future organisation à la mise en service de l'installation puis pour la phase d'exploitation (par exemple, contrôle et entretien des matériels, des systèmes, des structures).

La surveillance de la fabrication (montage sur la base des spécifications conceptuelles et des prescriptions légales et publiques) constitue un point essentiel pendant cette phase du projet.

L'effectif du personnel est adapté aux nouveaux besoins ; les fournisseurs du réacteur (et leurs sous-traitants) ainsi que les experts reconnus continuent de fournir un soutien externe. Le futur

¹ Art. 25 OENu [2]

détenteur de l'autorisation garantit que l'organisation globale peut faire face aux défis et aux risques sur le chantier de construction et qu'il est en mesure de constater, d'analyser et le cas échéant, de corriger d'éventuels événements ou non-conformités. Le système de gestion de la qualité mis en place conforme à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu¹ jouera un rôle décisif dans cette phase du projet. La gestion des interfaces entre les différents fournisseurs, l'organisation du projet et de la construction et les relations avec les autorités revêtiront une importance croissante pendant cette phase.

La poursuite du travail de projet en vue de la mise en service de l'installation représente un autre point clé de la phase de construction. Pendant cette phase, le futur détenteur de l'autorisation se charge de mettre en place une organisation de la construction, de recruter et former le personnel afin de rendre l'organisation d'exploitation opérationnelle avant la mise en service de l'installation.

Exploitation

Conformément aux exigences de l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu², la majeure partie de l'organisation du site en exploitation est issue de l'organisation précédente.

L'organisation de la construction comprend déjà de nombreux domaines importants mais doit toutefois être complétée pour intégrer les disciplines spécifiques nécessaires en phase d'exploitation (comme par exemple le personnel d'exploitation et de maintenance, le personnel chargé de la surveillance du rayonnement). L'organisation d'exploitation est constituée suffisamment tôt (voir ci-avant), afin que le personnel d'exploitation soit familiarisé avec la conception de l'installation ainsi qu'avec les systèmes et les matériels. Le futur personnel d'exploitation est formé à ses différentes activités ultérieures avant la mise en service de l'installation. Outre une formation sur la connaissance de l'installation et des systèmes, le personnel d'exploitation diplômé (opérateurs, chefs de quart, ingénieur sécurité, ...) reçoit une formation approfondie sur la dynamique du processus et la conduite de celui-ci. La formation sur un simulateur permettra de transmettre à ces personnels les connaissances nécessaires en cas d'accident ou de situations d'urgence ainsi que sur les modalités du travail en équipe. En règle générale, la formation du futur personnel d'exploitation débute pendant la dernière partie de la phase de construction.

Conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu³, un système de gestion de la qualité est élaboré pour l'exploitation et remis avec la demande d'autorisation d'exploiter. La maintenance de l'installation, des examens périodiques de la sécurité et des analyses des incidents forment les éléments constitutifs essentiels du système de gestion de la qualité pour la phase d'exploitation.

Le futur détenteur de l'autorisation doit procéder périodiquement à une évaluation systématique de l'organisation et du personnel dans le cadre d'un réexamen approfondi de la sécurité⁴. En outre, le futur détenteur de l'autorisation doit mettre en place un comité qui analysera les

¹ Art. 25 OENu [2]

² Art. 30 OENu [2]

³ Art. 31 OENu [2]

⁴ Art. 33 et 34 OENu [2]

événements et les constats ayant pour origine des aspects techniques et humains (déroulement chronologique, analyse des causes, écarts par rapport aux normes ou aux limites, etc.), proposera des mesures correctives ou préventives et surveillera leur mise en œuvre¹.

Les exigences publiques de la directive G-07 [81] seront mises en œuvre pour définir et mettre en œuvre l'organisation de l'exploitation.

Désaffectation

L'organisation nécessaire pour la désaffectation se compose majoritairement de membres de l'organisation d'exploitation. Conformément à l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu², elle doit déjà être préparée et constituée pendant la phase d'exploitation. Le personnel en charge de l'installation jouera un rôle important dans la mise en œuvre d'une désaffectation sûre et l'évacuation des composants. Par principe, la structure organisationnelle correspondra à celle de l'organisation de la construction ; sur ce point également, une grande importance sera accordée à la gestion des interfaces.

Selon l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENu³, un programme de gestion de la qualité doit également être élaboré dans cette phase.

5.4 Facteurs humains et organisationnels, bases et objectifs

Les paragraphes qui suivent décrivent la manière dont nous avons l'intention de prendre en compte dans le projet EKKM les facteurs organisationnels et humains, depuis la phase d'étude jusqu'à la désaffectation.

Le terme de Facteurs Organisationnels et Humains (FOH) désigne tous les aspects d'une situation de travail sur lesquels il est possible d'agir afin d'améliorer l'interface entre l'homme et le système ou la machine (interfaces homme-système, IHS) :

- ceux qui relèvent du fonctionnement de l'être humain (dimension individuelle du travail),
- ceux qui se rapportent au contexte technique, organisationnel et social du travail (dimension collective des activités).

A cet égard, le personnel constitue un élément essentiel de la défense en profondeur. Que ce soit dans le cadre du fonctionnement, de la surveillance ou de la maintenance des installations, les collaborateurs participent à la sécurité en toute situation de fonctionnement par leurs capacités de réflexion, d'organisation, d'adaptation, de remise en question et de réaction.

La démarche consistant à intégrer les FOH dans le projet d'EKKM permettra de mieux prendre en compte, dès la planification de la nouvelle installation, tous les aspects des situations de travail, afin de définir l'organisation et les moyens (moyens de travail, moyens de protection, mesures d'organisation, prescriptions de service, etc.) dont le personnel aura besoin pour :

¹ Art. 30, al. 3 OENu [2]

² Art. 45 OENu [2]

³ Art. 45 OENu [2]

- atteindre ses objectifs et exercer ses activités de manière conforme aux exigences opérationnelles,
- anticiper et prévenir les risques techniques, organisationnels et humains susceptibles d'affecter les performances.

La démarche FOH vis-à-vis de l'autorisation générale s'appuie sur les bases légales suivantes :

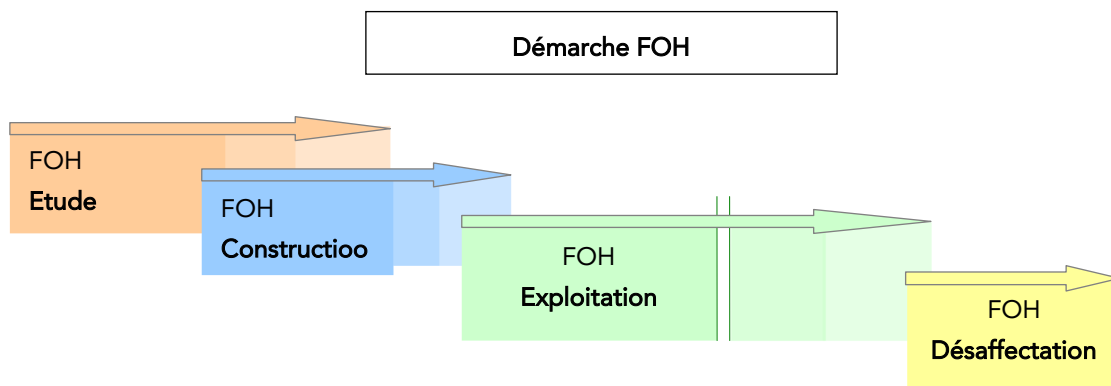
- Art. 5 al. 1 LENu [1]
- Art. 7 let. a, art. 10 al. 1 let. j, art. 23 let. a chi. 4, art. 25 al. 1, et art. 36 OENu [2]
- Convention sur la sûreté nucléaire (« Convention on Nuclear Safety ») de l'AIEA¹
 - Art. 12. Facteurs humains : « Chaque Partie contractante prend les mesures appropriées afin qu'un nombre suffisant d'agents qualifiés ayant été formés, entraînés et recyclés comme il convient soient disponibles pour toutes les activités liées à la sûreté qui sont menées dans ou pour chaque installation nucléaire pendant toute la durée de sa vie. »
 - Art. 18. Conception et construction, al. iii : « Chaque Partie contractante prend les mesures appropriées pour que la conception d'une installation nucléaire permette un fonctionnement fiable, stable et facilement maîtrisable, les facteurs humains et l'interface homme-machine étant pris tout particulièrement en considération. »

5.5 Vue d'ensemble de la démarche FOH

La démarche FOH pour la centrale d'EKKM constitue un processus continu aux différentes étapes du cycle de vie de l'installation, comprenant :

- Les activités d'ingénierie :
 - pour l'étude de la nouvelle centrale. Ces activités sont particulièrement importantes pour concevoir les interfaces Homme Systèmes (IHS), définir les procédures d'exploitation, agencer la salle de commande, reconnaître dès la conception de l'installation les contraintes relatives aux travaux de maintenance, évaluer les produits qui ont été développés, etc.
 - pour concevoir l'organisation future de la construction et de l'exploitation, notamment le système de gestion, ses processus et ses mesures d'assurance qualité.
- La prise en considération des FOH dans la construction de l'installation, notamment pour les processus impliquant des risques ou des difficultés particulières.
- La prise en considération des FOH dans la phase d'exploitation de l'installation afin d'organiser les activités humaines de manière optimale.
- La prise en considération des FOH pendant la préparation et l'exécution de la déconstruction et pendant la mise en place des installations nécessaires pour la désaffectation de la centrale d'EKKM, notamment pour les activités impliquant des risques.

¹ La Convention sur la sûreté nucléaire (voir par ex. www.iaea.org) est entrée en vigueur en Suisse le 11 décembre 1996.



(Remarque : la barre verticale dans la phase d'exploitation symbolise l'horizon temporel très long de l'exploitation en comparaison des autres phases.)

5.6 Principes de la démarche FOH

La démarche FOH développée pour la centrale d'EKKM s'appuie sur les principes importants suivants :

- Prise en compte continue, précise et structurée des FOH (notamment ceux spécifiques à l'installation) par l'ingénierie de projet et le futur détenteur de l'autorisation d'exploiter, à toutes les étapes de l'étude, de la construction, de l'exploitation et de la désaffectation de l'installation, en vue d'optimiser l'exécution des travaux.
- Conformité aux exigences nationales (autorités) et internationales (normes de sûreté de l'AIEA ; documents de l'INSAG ; normes et standards internationaux tels qu'ISO, CEI) définies au sujet des FOH dans les documents de référence.
- Prise en compte multidisciplinaire des FOH dès la phase d'étude, par les experts de la conception d'une installation nucléaire, de son exploitation, des FOH, de la sûreté, de la sécurité, de la radioprotection, etc., et par des représentants d'équipes d'exploitation et de maintenance.
- Prise en considération du retour d'expérience en matière de FOH :
 - d'une part, pour établir les plans de l'installation, des locaux, des interfaces de surveillance et de commande, ..., et
 - d'autre part, pour optimiser les actions humaines durant les phases de construction, d'exploitation et de désaffectation de l'installation.
- Prise en compte itérative des FOH, dans un processus au cours duquel les décisions techniques et organisationnelles, prises aux différentes étapes de la vie de l'installation, seront évaluées et suivies de manière à s'assurer que les moyens à disposition du personnel sont propres à optimiser les conditions et les processus de travail.
- Les options / solutions retenues dans le cadre de la démarche FOH sont définies, examinées et approuvées de manière conforme aux processus et aux prescriptions du programme de gestion de la qualité du projet EKKM (voir chap. 2.8).

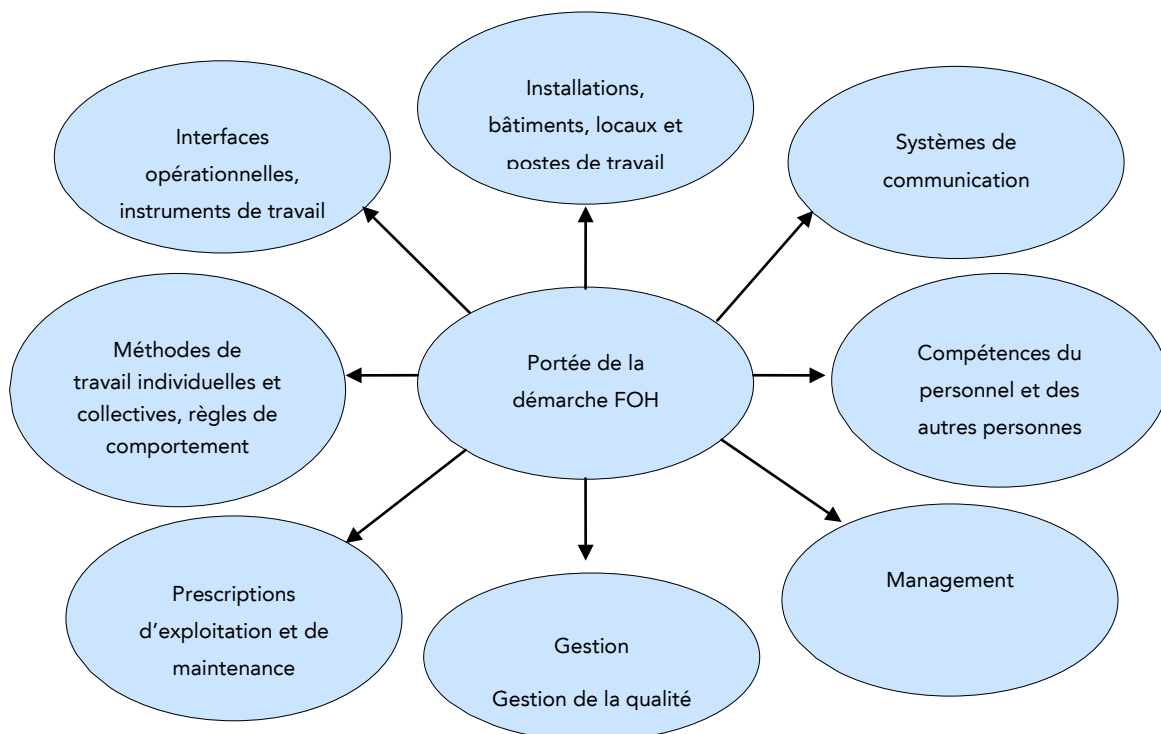
5.7 Portée de la démarche FOH

La démarche FOH porte sur tous les états de l'installation (exploitation normale, démarrage et arrêt périodique de l'installation, fonctionnement en cas d'accident) et sur toutes les activités relevant de l'exploitation, de la maintenance, des essais ou de la logistique (dans la salle de commande ou dans le reste de l'installation), en particulier celles qui :

- sont liées à la sûreté de l'installation
- peuvent avoir des incidences sur l'environnement
- ou s'effectuent dans un environnement présentant des risques pour le personnel.

Afin de prendre en compte et d'améliorer les conditions dans lesquelles s'effectueront ces activités, la démarche FOH offre la possibilité d'agir sur plusieurs leviers pour optimiser l'interaction entre l'utilisateur et l'installation : Ergonomie des installations, des bâtiments, des locaux et des postes de travail ; Qualité des interfaces d'exploitation (aussi bien dans la salle de commande que hors de celle-ci) et des moyens utilisés durant ces activités ; Optimisation des systèmes de communication ; Optimisation des compétences du personnel et des personnes impliquées sur place ou dans la formation ; Evaluation de leur capacité à accomplir les tâches demandées ; Efficacité et efficience des méthodes de travail individuelles et collectives ; Optimisation des méthodes de travail et des collectifs de travail ; Gestion générale et gestion de la qualité ; Règles d'exploitation et de comportement ; Processus d'exploitation et de maintenance (par exemple, processus de travail, procédures, prescriptions d'exploitation). Ces multiples aspects concernés par les FOH sont récapitulés dans la figure 5.7-1 ci-après (dans un ordre arbitraire) :

Figure 5.7-1 : Portée des FOH



En outre, la démarche FOH sera importante pour la conception de l'organisation aux phases de l'étude, de l'exploitation et de la désaffectation, puisqu'elle contribuera aux réflexions sur les processus de travail, la gestion de la qualité, la gestion de l'installation et celle du personnel (système qualité, recrutement, formation). Les réflexions relatives au domaine « Personnel et organisation » figurent aux chapitres 5.2 et 5.3.

Le rôle du personnel fera l'objet d'une attention particulière lorsqu'il s'agira de choisir les technologies de la nouvelle installation. En effet, les nouvelles technologies disponibles et l'automatisation toujours plus poussée exercent une influence considérable sur le comportement et l'attitude du personnel d'exploitation et de maintenance, d'où l'extrême importance de la démarche FOH pour le choix et la validation des technologies.

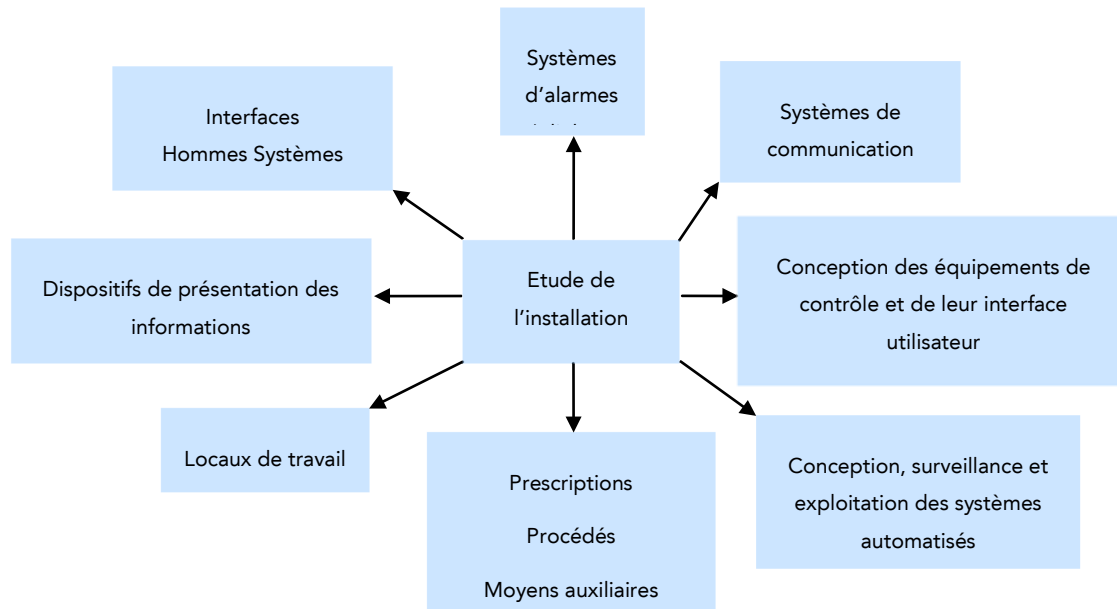
D'autres points sont également importants pour la phase d'étude :

- disposition du bâtiment, des locaux et des matériels
- accès aux matériels et aux moyens de maintenance
- optimisation des espaces de circulation
- équipements de surveillance et d'exploitation (dans et hors de la salle de commande) et leurs moyens de maintenance.

Au niveau des interfaces dans la salle de commande, les études FOH ont pour but de définir ou de valider, en concertation avec le fournisseur du réacteur et ses sous-traitants impliqués dans la conception de l'installation, les options de conception liées aux aspects IHS telles que la disposition des interfaces et des postes de travail dans la salle de commande, les conditions d'ambiance, les dispositifs de présentation des informations, les dispositifs de commande, les systèmes d'alarmes / d'alerte, les processus automatisés, les systèmes de communication ainsi que les interfaces entre les dispositifs de surveillance du processus et les matériels. Des critères seront définis pour que les installations et les moyens de travail qui seront utilisés par le personnel répondent aux besoins et prennent en compte le retour d'expérience provenant de l'étude et de l'exploitation des installations nucléaires existantes.

La Figure 5.7-2 ci-après récapitule ces différents thèmes (dans un ordre arbitraire, sans considération de leur importance respective ni de leur chronologie) :

Figure 5.7-2 : Thèmes FOH pour la phase d'étude et de conception



La facilité d'utilisation de ces moyens de travail et de ces équipements pour le personnel d'exploitation et de maintenance, leur tolérance aux erreurs humaines, la prise en compte de temps de réaction correspondant aux capacités et aux limites de l'être humain, l'ergonomie des informations et des commandes, les possibilités prévues de compensation ou de correction en cas de défectuosité technique ou d'erreur humaine, sont autant d'objectifs auxquels l'ingénierie de projet et le futur détenteur de l'autorisation accorderont une attention particulière au niveau des exigences et des conditions posées au fournisseur concernant leur conception.

L'ingénierie de projet et le futur détenteur de l'autorisation s'appliqueront à satisfaire dans toute la mesure du possible les exigences FOH définies pour l'étude et la conception de la nouvelle installation. Toutefois, les exigences FOH seront parfois en contradiction avec les conditions de conception des fournisseurs. En effet, la plupart des nouvelles conceptions d'installations sont « standardisées », et des écarts par rapport au standard ne sont pas toujours possibles ou seulement à des coûts très élevés. Lorsque les exigences FOH ne seront pas ou pas entièrement réalisables, des solutions alternatives seront recherchées sur la base d'analyses coûts/bénéfices, de manière à ce que les manquements aux exigences puissent être compensés ou surmontés.

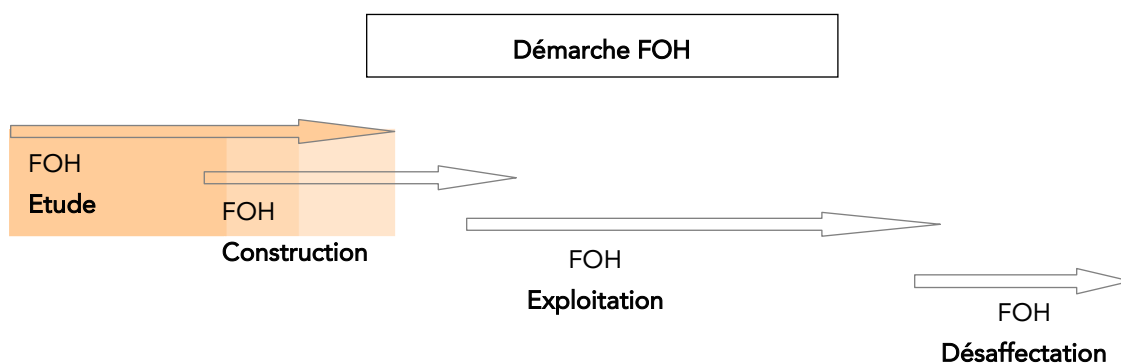
5.8 Réalisation de la démarche FOH

La démarche FOH sera définie et mise en œuvre par l'ingénierie de projet et le futur détenteur de l'autorisation, qui sont responsables de la coordination et nommeront un coordinateur chargé de piloter l'ensemble de la démarche FOH. Le coordinateur FOH sera subordonné au directeur technique du projet EKKM et pourra, au besoin, l'aviser de la nécessité d'études FOH et/ou lui signaler les conséquences de tel choix de conception.

Afin de favoriser une prise en compte multidisciplinaire de ce domaine dès la phase d'étude, le coordinateur FOH assurera la mise en réseau des compétences des différents départements (y compris les équipes d'exploitation et de maintenance), de manière à ce que les options retenues pour la conception répondent aux besoins de l'exploitant.

Le coordinateur initiera aussi la préparation des étapes de la prise en compte des FOH dans la construction, l'exploitation et la désaffectation. Au cours de ces phases, la mise en œuvre de la démarche FOH requerra des mesures organisationnelles particulières, qui seront définies à mesure des besoins par le futur détenteur de l'autorisation compte tenu du retour d'expérience.

5.9 La démarche FOH dans la phase d'étude de l'installation

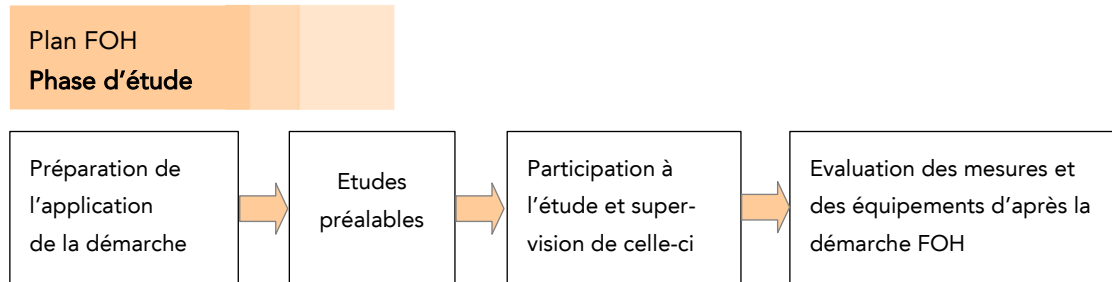


5.9.1 Objectifs

Mise en route le plus tôt possible avant l'étude proprement dite de l'installation, des matériels et des interfaces, la démarche FOH permettra de prendre en compte tous les aspects des situations de travail futures et le retour d'expérience des phases d'étude et d'exploitation d'autres installations nucléaires.

Elle comprendra plusieurs étapes, permettant de préparer l'application de la démarche, d'entamer les études d'avant projet, de planifier la participation à l'étude de l'installation, de la salle de commande et des documents d'exploitation, et d'évaluer les principes de la démarche FOH et les mesures qui en découlent (voir figure 5.9-1).

Figure 5.9-1 : Étapes de la démarche FOH pour la phase d'étude



Chacune de ces étapes suppose des études préalables sur la base de méthodes reconnues en matière de FOH.

5.9.2 Etapes

5.9.2.1 Préparation de la mise en œuvre de la démarche FOH

Le but consiste à développer une démarche FOH qui soit appropriée pour l'étude (planification) de la centrale d'EKKM et des équipements qui seront utilisés par le personnel pour l'exercice de ses activités. En fonction des particularités du projet et de la progression des travaux d'étude, l'ingénierie de projet définira la succession des travaux, le calendrier d'exécution, les ressources à affecter et les documents permettant d'assurer la traçabilité des résultats.

5.9.2.2 Etudes d'avant projet

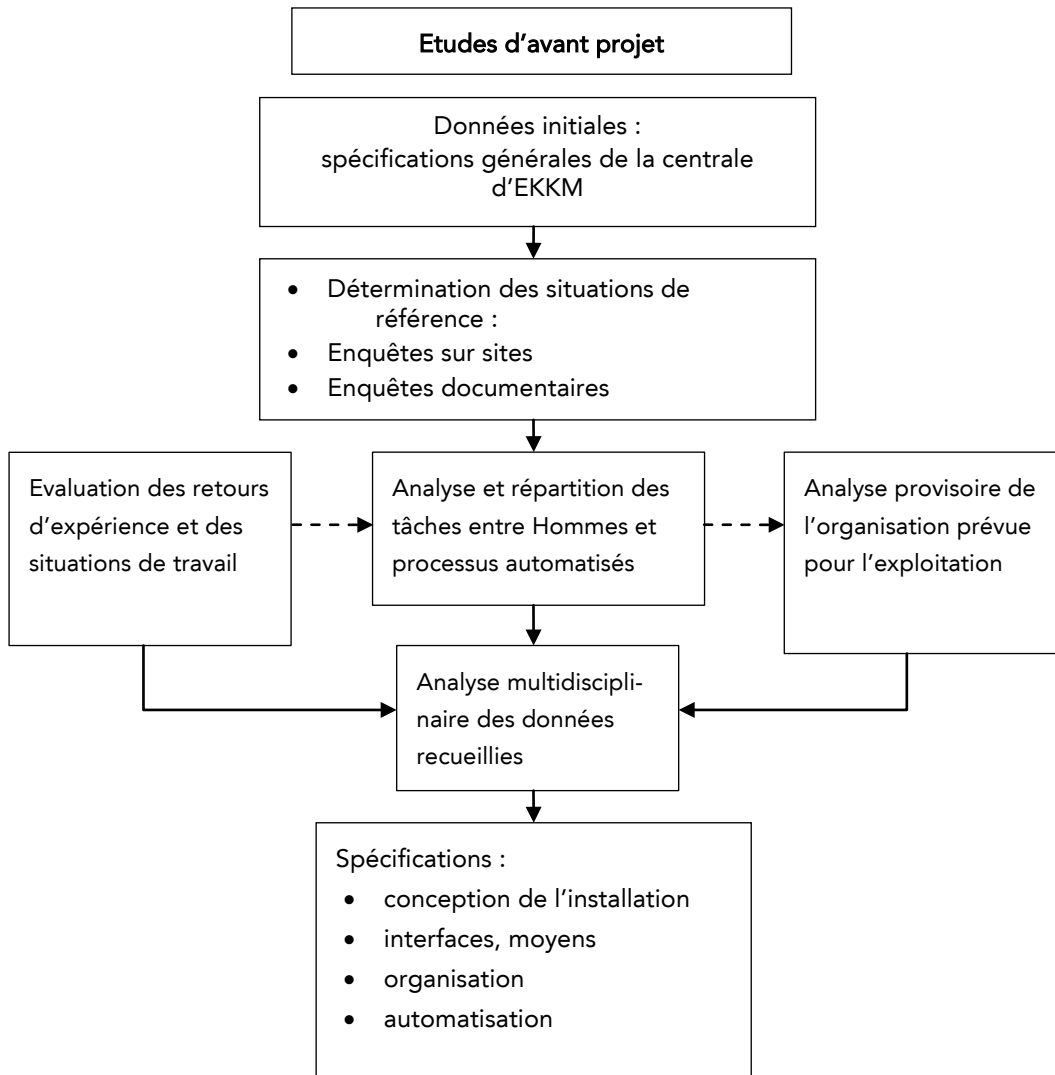
Les études FOH effectuées permettront de définir d'une manière multidisciplinaire les exigences FOH pour la centrale d'EKKM, les principes des procédés d'exploitation à retenir, les principales caractéristiques de la future installation et des interfaces prévues, le degré d'automatisation et les principes d'organisation de la centrale en matière de personnel, de recrutement, de qualifications et de formation.

Le retour d'expérience concernant la conception, provenant de centrales nucléaires existantes ou en construction, servira de point de départ à la phase d'étude et permettra d'élaborer les spécifications détaillées relatives à l'étude de l'installation, à la salle de commande et aux moyens d'exploitation. Ce retour d'expérience aura pour source le personnel d'exploitation et de maintenance, les fournisseurs impliqués dans la phase d'étude et dans la construction et des spécialistes en FOH disposant d'une expérience dans ce domaine.

Pour rassembler les informations nécessaires à l'élaboration de ces spécifications, les études suivantes seront entreprises (voir l'organigramme figure 5.9-2) :

- Une évaluation du retour d'expérience de centrales nucléaires similaires et une analyse de situations de travail réelles comparables. Ceci permettra de mettre en évidence les avantages et les difficultés observés par les industriels et le personnel lors de l'étude et de l'exploitation de centrales nucléaires de conception semblable à celle prévue pour la centrale d'EKKM, et de dresser une liste des principes et des exigences applicables à l'étude de la nouvelle installation et de ses interfaces homme-machine.
- Une analyse de la répartition des tâches entre le personnel et les systèmes automatisés ainsi que des critères d'automatisation. Cette analyse permettra de préciser les rôles et les responsabilités du personnel dans l'exploitation de la centrale d'EKKM ainsi que le degré d'automatisation de l'installation. En fonction des critères d'automatisation définis, cette analyse permettra aussi de spécifier d'une part les moyens dont le personnel devra disposer pour contrôler le fonctionnement des systèmes automatisés, d'autre part les conditions et les possibilités d'interventions humaines en cas de défaillances techniques.
- Une analyse provisoire de l'organisation et du système de gestion de l'exploitation de la centrale d'EKKM. Ceci permettra de définir dans leurs grandes lignes l'organisation de l'exploitation, les tâches du personnel, les responsabilités et les qualifications, la formation et l'évaluation des compétences ainsi que la gestion de la qualité (voir chap. 5.2 et 5.3).

Figure 5.9-2 : Organigramme des études d'avant projet



Toutes ces études liées à la planification de la centrale d'EKKM auront une structure semblable :

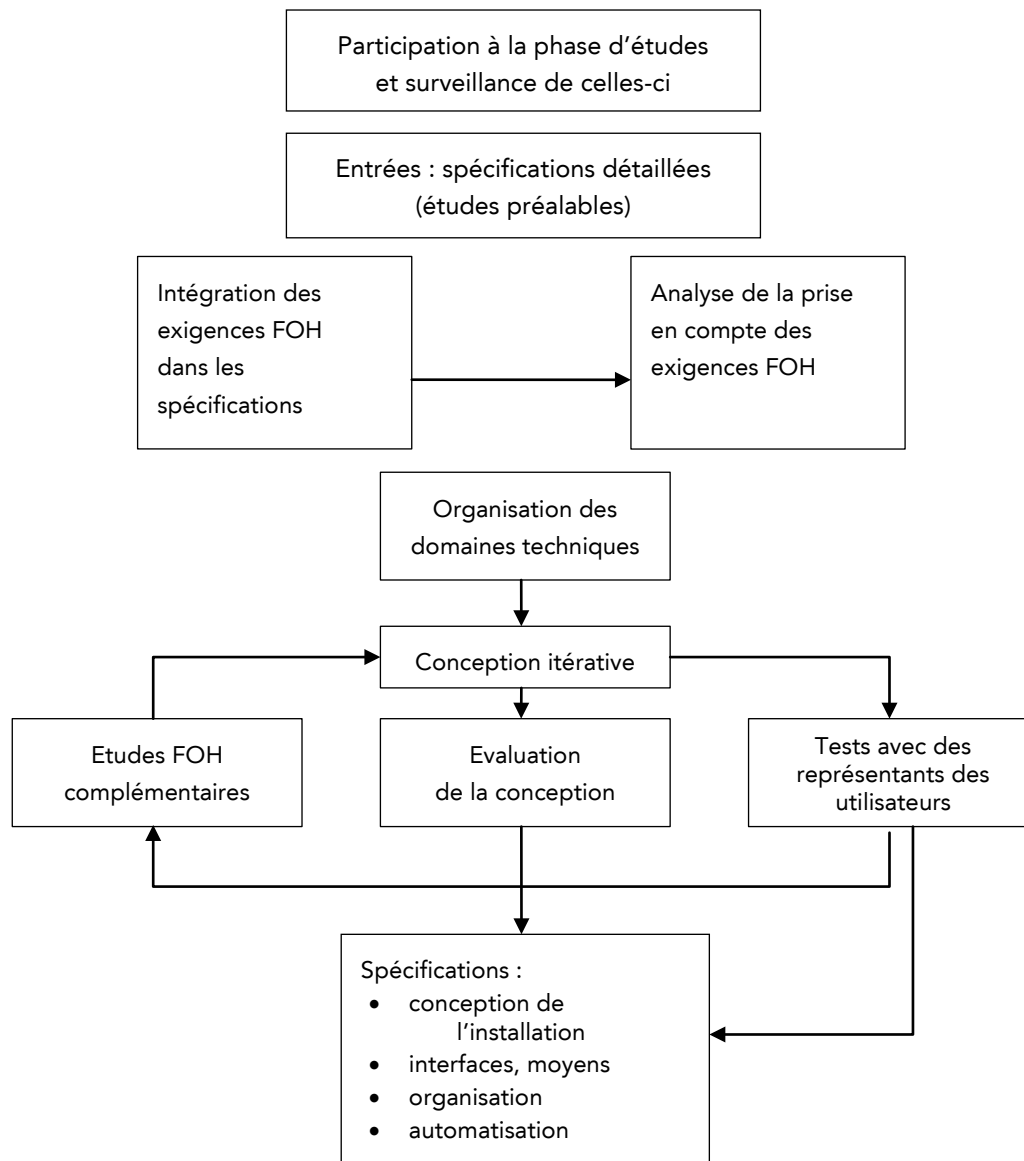
- Détermination des installations et des situations de travail qui serviront de référence étant donné la conception choisie pour la centrale d'EKKM et les moyens prévus pour son exploitation.
- Analyses documentaires et sur sites du retour d'expérience concernant ces installations et leurs situations de travail.
- Détermination des besoins des utilisateurs (exploitation de l'installation, maintenance, essais, activités sur place) et des aspects organisationnels (coordination des travaux techniques, travail en équipes, communication) sur la base des informations recueillies grâce aux études susmentionnées et à l'échange d'expériences au sein de l'équipe multidisciplinaire.
- Détermination des spécifications relatives à la conception de l'installation, des interfaces et des moyens d'exploitation, du degré d'automatisation, de la conception des équipements, etc. Ces spécifications prennent en compte les informations issues des recherches documentaires et du retour d'expérience concernant les installations dont la conception est comparable à celle de la centrale d'EKKM.

Parallèlement au déroulement des études du projet, ces analyses pourront, au besoin, être encore approfondies afin de préciser certaines spécifications.

5.9.2.3 Participation à la phase d'études et surveillance de celles-ci

La démarche FOH adoptée offre la possibilité de s'assurer de manière continue, itérative et multidisciplinaire que les spécifications définies lors des études préalables sont prises en compte et que la conception de l'installation ainsi que des interfaces et des moyens d'exploitation est conforme aux besoins / exigences des utilisateurs (voir figure 5.9-3).

Figure 5.9-3 : Organigramme de la procédure itérative FOH pour la supervision de la phase d'études



La démarche FOH permettra :

- d'intégrer les exigences FOH dans les spécifications de la centrale d'EKKM. Il y a deux sortes d'exigences :
 - Les spécifications fonctionnelles et ergonomiques applicables à la conception des locaux, à l'équipement de la salle de commande, à la présentation des informations, à la configuration des interfaces homme-machine, aux procédures, aux alarmes, etc.
 - Les procédures pour la prise en compte des FOH durant la phase d'études : moyens matériels et humains pour garantir que les résultats des études d'avant projet seront pris en compte ; répartition des rôles entre les entités qui participent à la conception de la centrale d'EKKM ; moyens à utiliser par les différentes entités pour le prototypage et les tests ; méthodologie d'évaluation des écarts entre les performances attendues et observées ; principes d'assurance qualité à appliquer durant les études ; traçabilité des écarts et de leur résolution.
- d'assurer que les exigences FOH seront prises en compte par les entités qui participent aux études de la centrale d'EKKM
- de préparer et de mener un programme de surveillance de la mise en œuvre de la démarche FOH par les entités qui participent aux études. Le déroulement de ces dernières comprend un processus itératif constitué des phases suivantes :
 - Contrôle de la prise en compte des exigences FOH applicables à l'étude de l'installation et des interfaces.
 - Tests des produits en développement, à l'aide par exemple, de bancs d'essai, de modèles, de prototypes, développés par les départements respectifs afin de constater et d'évaluer, par simulation des situations de travail, les écarts éventuels entre les performances attendues et effectives des produits. Ces tests serviront à garantir que les produits et leur comportement répondent aux besoins des utilisateurs et que dans le cas contraire les mesures correctrices pourront être prises rapidement. (Noter que ces tests-là ne remplacent nullement les tests de vérification et de validation¹ à mener ultérieurement, voir chap.5.9.2.4).
- si nécessaire, de mener des études FOH complémentaires afin de préciser les besoins et les conditions de base à prendre en compte dans les études de l'installation, de la salle de commande et des moyens d'exploitation.

Conformément aux principes d'assurance qualité applicables à la centrale d'EKKM, la démarche FOH, les résultats observés et la résolution des écarts seront suivis durant toute la phase d'études du projet.

La démarche FOH contribuera non seulement à l'étude de la planification de projet et à la conception de l'installation, mais parallèlement aussi au développement de l'organisation, notamment à la définition des tâches et des responsabilités des unités organisationnelles ainsi qu'au recrutement du personnel et à sa formation dans les délais requis.

¹ La vérification consiste à s'assurer (par exemple, par une inspection ou un test) qu'un produit ou un résultat répond aux spécifications ou aux normes afférentes. La validation consiste à s'assurer qu'un produit ou un résultat répond aux besoins ou aux exigences de l'utilisateur final (client).

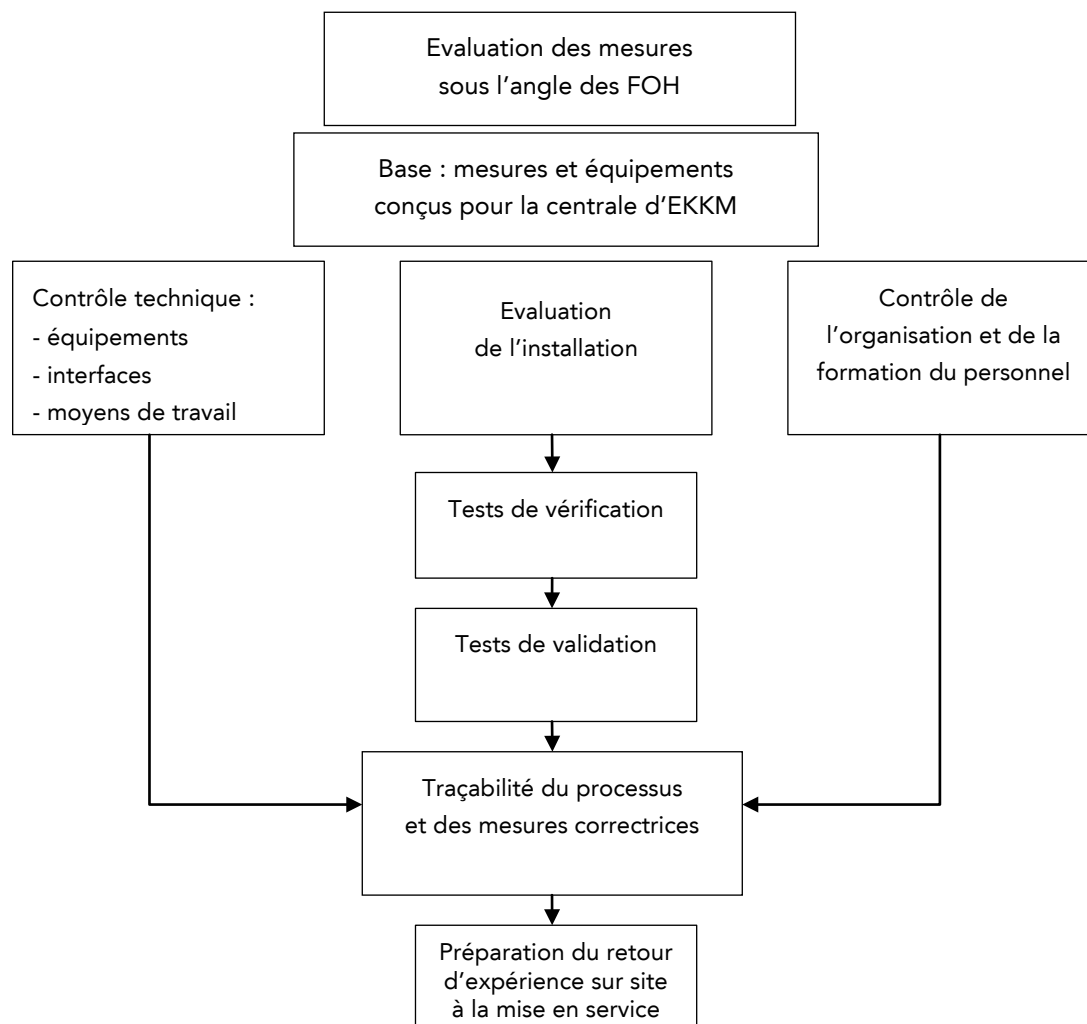
5.9.2.4 Evaluation des dispositifs en fonction des FOH

A la fin de la phase d'études du projet, la démarche FOH comprendra une phase d'évaluation complète (voir l'organigramme figure 5.9-4) basée sur les éléments suivants :

- Examen technique multidisciplinaire des documents par les différentes entités impliquées dans les études de la centrale d'EKKM, afin de s'assurer du respect des exigences FOH spécifiées pour concevoir les éléments de l'installation et des moyens d'exploitation.
- Examen de la conception :
 - Tests de vérification servant à contrôler que la conception répond aux exigences spécifiées et aussi, plus généralement, aux exigences techniques et à celles des autorités.
 - Tests de validation des interfaces et en particulier des équipements de la salle de commande, dans des conditions aussi proches que possible de l'exploitation réelle. Cet examen doit garantir que la conception de l'installation facilitera de manière efficace les activités du personnel et lui permettra d'atteindre ses objectifs dans le respect des exigences opérationnelles. A cet effet, s'il y a lieu, on « construira » des postes de commande et une salle de commande virtuels.
- Contrôle des principes définissant la manière d'organiser la construction et l'exploitation de l'installation et la formation du personnel.
- Préparation des essais de mise en service de l'installation : planification des aspects FOH prioritaires – ou à tester – et de la méthodologie de surveillance de la mise en service sur la base du retour d'expérience issu des tests de validation. Le but est de pouvoir s'assurer, dans les conditions réelles d'exploitation, que les interfaces et les moyens à la disposition du personnel répondent aux attentes et sont pratiques et efficaces.

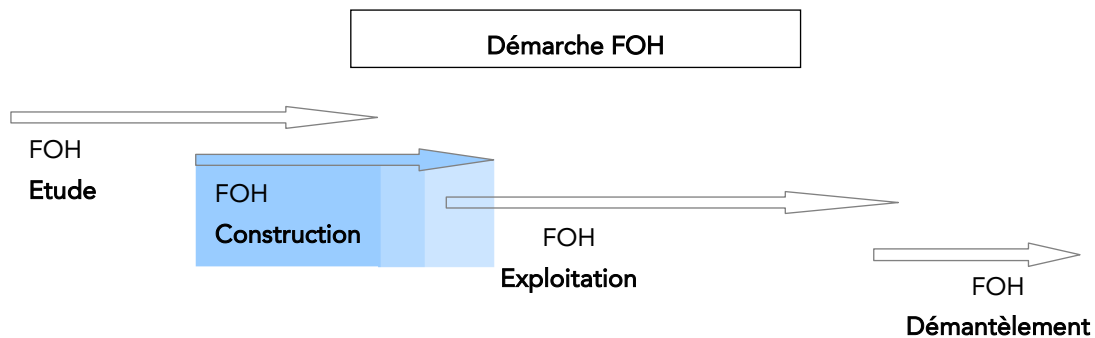
Cette évaluation (vérification et validation) de la conception de l'installation pourra tout à fait être menée en parallèle à la construction (de manière générale, il faut considérer que les phases d'études et de construction vont partiellement se chevaucher). Elle permettra, si des attentes ne sont pas remplies, de corriger la conception de l'installation, les conditions d'exploitation ou l'organisation et la formation du personnel.

Figure 5.9-4 : Évaluation FOH de la conception de l'installation



Ce processus d'évaluation (de même que la résolution des écarts éventuels) s'effectuera en conformité avec les exigences du système de gestion de la qualité mis en place pour les études.

5.10 La démarche FOH dans la phase de construction de l'installation



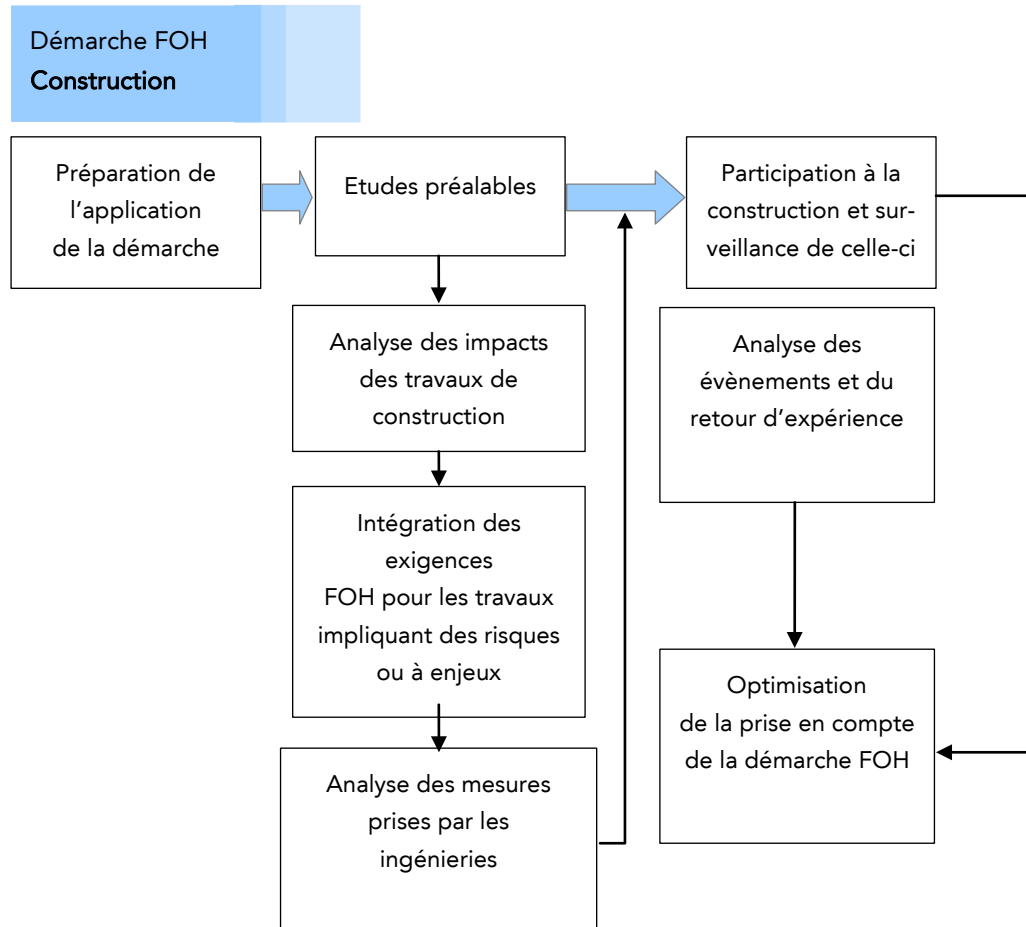
5.10.1 Objectifs

Menée parallèlement à l'étude de l'installation, des matériels et des interfaces, la démarche FOH relative à la construction (construction, montage, etc.) de la centrale d'EKKM permettra de prendre toutes les mesures propres à :

- s'assurer que les équipes de travail occupées sur le chantier exerceront leurs activités dans le respect des exigences relatives notamment à la sécurité et à l'environnement
- s'assurer que les équipes de travail occupées sur le chantier exerceront leurs activités dans le respect des exigences relatives notamment à la sécurité et à l'environnement
- développer des moyens de travail et des processus d'organisation propres à réduire les risques d'erreurs, à encourager le développement, le maintien et l'amélioration de la culture de sécurité et à promouvoir la responsabilité individuelle et collective durant toute la phase de construction.

La démarche FOH comprendra plusieurs étapes, permettant de mener des études préalables à la construction, de mettre en place un programme de surveillance servant à évaluer l'exécution et l'efficacité des mesures prises en particulier lors de travaux présentant des conséquences ou des risques (de défaillances techniques ou humaines, d'incidences sur la sûreté, la radioprotection, l'environnement, etc.), ainsi que de préparer et de prendre des mesures pour l'analyse des éventuels incidents et du retour d'expérience (voir figure 5.10-1).

Figure 5.10-1 : Étapes de la démarche FOH dans la construction



5.10.2 Etapes

5.10.2.1 Préparation de la mise en œuvre de la démarche FOH

Le but est de traduire la démarche FOH en termes opérationnels. En fonction des particularités du projet et de la progression des travaux d'étude et de construction, le futur détenteur de l'autorisation définira l'organisation du projet, son calendrier d'exécution, les ressources à affecter et les documents permettant d'assurer la traçabilité des résultats.

5.10.2.2 Etudes précédant la construction

Ces études préalables permettront d'échelonner la démarche FOH en fonction des enjeux et des risques des travaux de construction et de s'assurer que les mesures de prévention des risques ont été prises et sont efficaces.

Ces études s'appuieront sur les éléments suivants :

- Une analyse de l'incidence FOH des travaux. Ceci permettra au futur détenteur de l'autorisation de classer les travaux en fonction aussi de leur incidence FOH, c'est-à-dire :
 - de leurs conséquences pour la sécurité du personnel, de l'environnement, de la poursuite des travaux de construction
 - de leurs risques :
 - pour le personnel effectuant ces travaux,
 - d'erreurs humaines pendant ces travaux,
 - pour le personnel occupé au voisinage de ces travaux.
- Sitôt cette analyse effectuée, on préparera une procédure de prise en compte des FOH afin d'adapter les exigences applicables aux travaux à leur incidence respective.
- La définition des exigences FOH relatives à la préparation, à l'exécution et au suivi des interventions par le futur détenteur de l'autorisation. Il y a deux sortes d'exigences :
 - les exigences générales, applicables à tous les travaux, pour assurer le respect des règles d'exploitation et de gestion de la qualité ;
 - les exigences particulières, applicables aux travaux présentant la plus forte incidence FOH. Le futur détenteur de l'autorisation définira les mesures nécessaires à la préparation et à l'exécution de ces travaux (conditions particulières d'intervention du personnel, documentation requise, analyse préalable des risques, mesures à prendre pour les interventions, etc.).
- Une surveillance de la prise en compte des FOH par les différentes entités participant à la construction de la centrale d'EKKM. Il s'agira de vérifier que celles-ci tiennent compte des exigences FOH formulées et de contrôler l'adéquation des méthodes qu'elles appliquent pour l'exécution des travaux d'études et de construction. Ce programme de surveillance et de contrôle porte en particulier sur :
 - la préparation des travaux par les fournisseurs
 - la détermination d'une marche à suivre adaptée à l'incidence FOH des travaux
 - la qualification du personnel
 - la définition de points d'arrêt permettant au futur détenteur de l'autorisation de contrôler la conformité des résultats obtenus
 - la prise en compte du retour d'expérience
 - les mesures de prévention des risques.

5.10.2.3 Surveillance de la construction

Au cours du processus de construction, la démarche FOH permettra de s'assurer par des contrôles réguliers que les dispositions prévues, pour les travaux présentant des impacts FOH, ont été prises et sont efficaces pour prévenir les risques.

Ces contrôles pourront être supportés par :

- des évaluations internes sous la responsabilité du futur détenteur de l'autorisation à partir de l'analyse des documents fournis par les ingénieries et d'inspections réalisées sur le terrain
- des évaluations périodiques par des experts indépendants.

Les travaux ayant la plus forte incidence sur les FOH seront suivis en permanence (par exemple, au moyen d'inspections), de façon qu'en cas d'évolution défavorable, des mesures puissent être prises suffisamment tôt.

5.10.2.4 Analyse des événements survenant pendant la construction et du retour d'expérience

A partir de la phase de construction, la démarche FOH a pour but de rendre possibles :

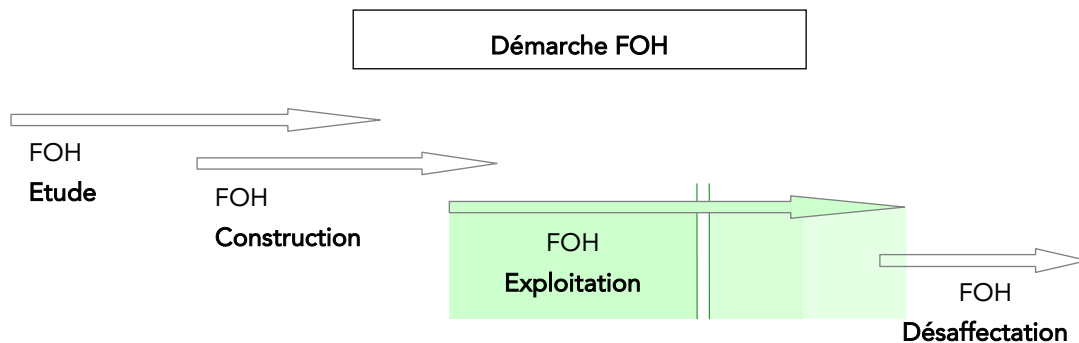
- Le relevé et l'analyse des événements survenant pendant la construction. L'analyse des événements vise à reconnaître leurs causes « profondes » (les facteurs dépendant non seulement des personnes, mais aussi de l'organisation, de la gestion, de la définition des tâches et des responsabilités, de la gestion des compétences, des processus de planification et de collaboration, des processus de décision, du retour d'expérience, etc.) et d'engager les moyens propres à écarter ou à minima, réduire les risques ainsi identifiés
- L'organisation, la réalisation et l'exploitation du retour d'expérience. L'analyse des écarts entre les résultats attendus et les résultats réels permettra d'exploiter et de prendre en compte ce retour d'expérience, qui pourra aussi être complété par des contrôles des conditions d'exécution de la construction par le futur détenteur de l'autorisation.

Le futur détenteur de l'autorisation procédera à un retour d'expérience indépendant et s'assurera en outre que les entités techniques qui participent à la construction de la centrale d'EKKM¹ mettent eux aussi en place des procédures pour conduire leurs propres analyses d'événements et leur retour d'expérience. Un échange entre le futur détenteur de l'autorisation et des représentants de ces entités permettra de mettre en commun les données recueillies et, au besoin, de modifier les mesures prévues sur le chantier pour la préparation et l'exécution des travaux de construction. Cet échange s'effectuera de manière échelonnée en fonction de l'incidence FOH des différents travaux.

¹ Fabricant du réacteur, fournisseurs et sous-traitants.

5.11 La démarche FOH dans la phase d'exploitation de l'installation

5.11.1 Objectifs



La démarche FOH participera au renforcement de la culture de sécurité et de la « défense en profondeur », en optimisant la contribution de tout le personnel et de toute l'organisation de l'exploitation au comportement global du système (sécurité du personnel et des fournisseurs, sûreté des installations, protection de l'environnement, maîtrise des coûts). Elle rendra possibles :

- L'évaluation des risques liés aux activités du personnel. Les objectifs consistent à reconnaître et à prévenir les éléments suivants :
 - les risques auxquels le personnel sera exposé pendant l'exercice de ses activités
 - les erreurs humaines possibles pendant la préparation, l'exécution et la poursuite des activités
 - les « signaux faibles » ou signes avant-coureurs possibles (observations sur les systèmes, les matériels ou encore les êtres humains) d'événements pouvant conduire à un risque
- L'acquisition de moyens de travail, de moyens auxiliaires et la création de conditions de travail qui diminuent les risques et renforcent le rôle positif du personnel
- La prise en compte du retour d'expérience de la centrale d'EKKM (et d'installations nucléaires comparables) afin de d'identifier et de corriger les défaillances techniques et humaines susceptibles d'affecter les performances et d'optimiser les moyens de travail.

Cette démarche permettra d'agir sur les facteurs susceptibles d'influencer les performances individuelles et collectives. De tels facteurs sont l'implication de la direction et du management dans le domaine des FOH et dans la culture de sécurité en général, la formulation des exigences en matière de sécurité, la reconnaissance des risques, l'engagement individuel et collectif, la clarification des tâches des unités organisationnelles, la formulation des exigences et des responsabilités respectives des différentes divisions/services impliquées dans l'exploitation de l'installation, le recrutement et la formation du personnel, l'optimisation des postes de travail et des interfaces, l'amélioration des méthodes et des processus de travail, le contrôle des opérations sensibles ou à enjeux, la surveillance des fournisseurs et les modalités du retour d'expérience.

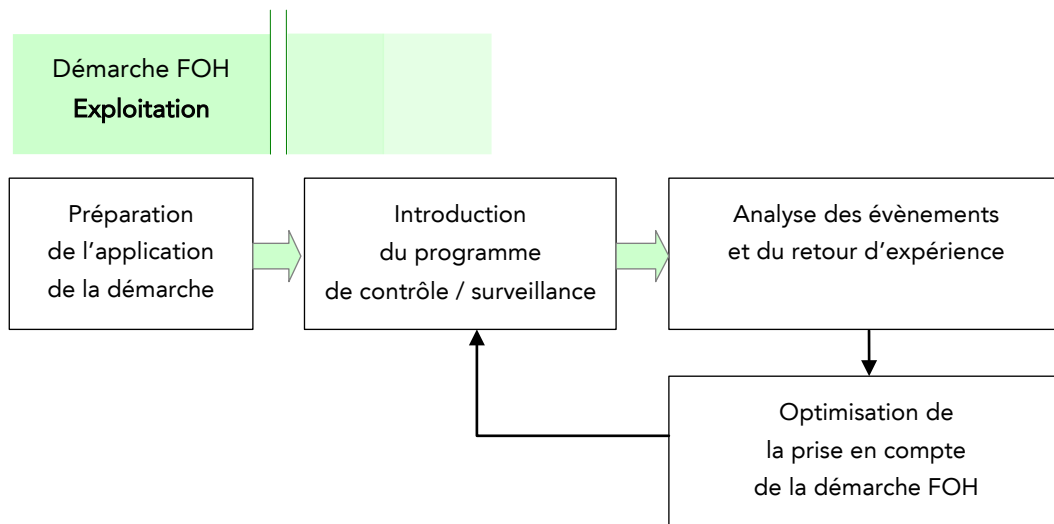
La centrale d'EKKM entend tenir compte de ces aspects durant toute la durée de vie de la centrale, s'impliquer dans des améliorations constantes, analyser régulièrement sur le site les activités du personnel et les risques qu'elles comportent et contribuer par ces analyses au retour d'expérience concernant les facteurs humains et organisationnels de l'exploitation.

5.11.2 Etapes

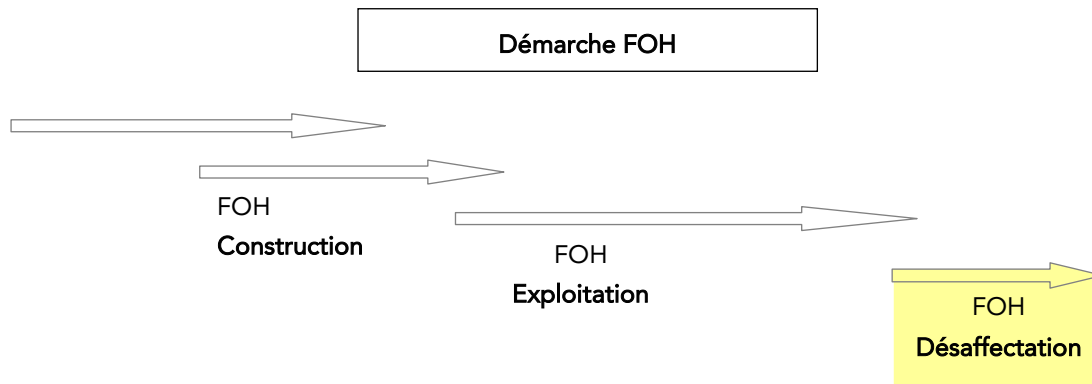
L'organisation de l'exploitation facilitera la réalisation des étapes successives de la démarche FOH (voir Figure 5.11-1) :

- Préparer la mise en place de la démarche FOH pour encourager le développement, le maintien et l'amélioration de la culture de sécurité et promouvoir la responsabilité individuelle et collective durant la phase d'exploitation
- Préparer et mettre en place un programme de contrôle et de surveillance servant à évaluer l'exécution et l'efficacité des mesures prises en particulier lors d'opérations / d'activités qui présentent des conséquences ou des risques (risques de défaillances techniques ou humaines, risques présentant des incidences sur la sûreté, la radioprotection, l'environnement, etc.)
- Analyser les événements et le retour d'expérience en matière de FOH.

Figure 5.11-1 : Étapes de la démarche FOH durant l'exploitation



5.12 La démarche FOH dans la phase de désaffectation de l'installation



Mise en route le plus tôt possible avant la désaffectation de l'installation, des matériels et des interfaces, la démarche FOH offrira la possibilité de prendre toutes les mesures propres à :

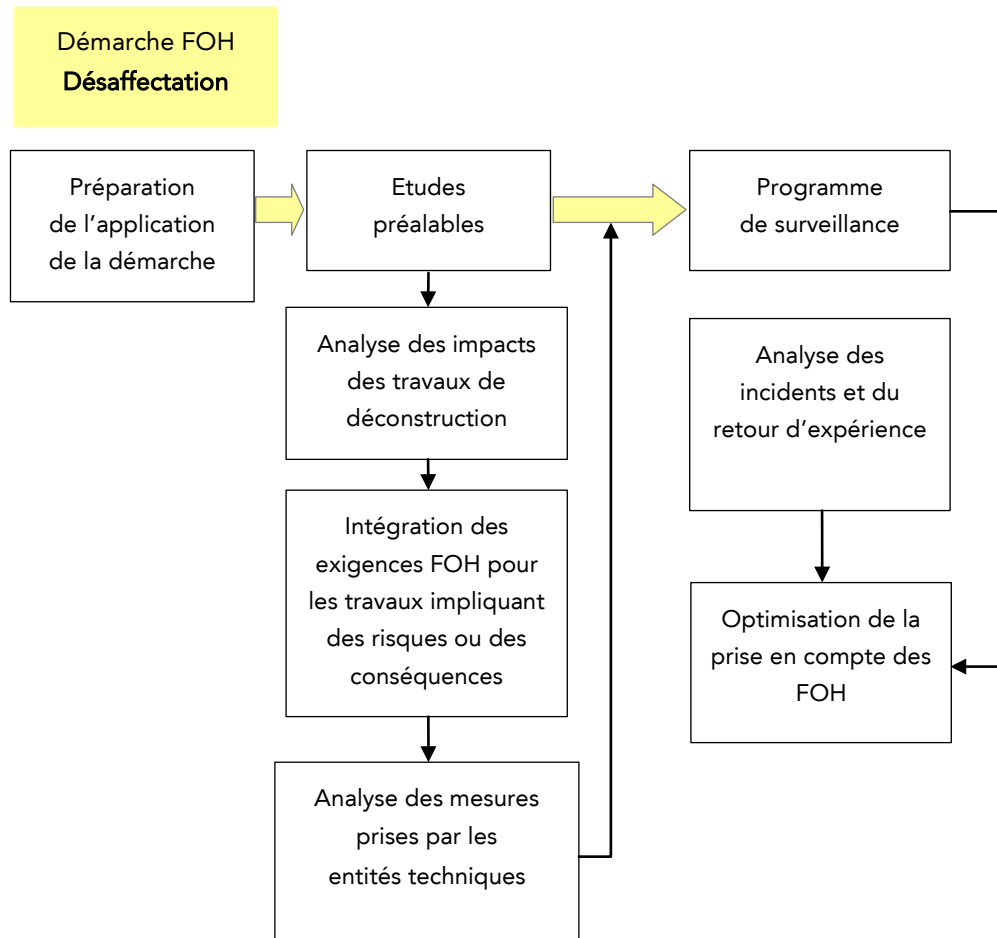
- conforter la culture de sécurité
- s'assurer que les équipes de travail engagées sur le chantier de déconstruction exerceront leurs activités dans le respect des exigences relatives à la sécurité, à la radioprotection et à l'environnement
- anticiper et prévenir les risques techniques, organisationnels et humains susceptibles d'affecter le niveau de prestation
- développer les moyens de travail qui réduisent les risques d'erreur.

Les étapes de la démarche FOH durant la désaffectation (voir Figure 5.12-1) seront en principe les mêmes que pour la construction. Le but est de préparer et d'effectuer :

- des études préalables aux travaux et à la mise en place des installations nécessaires à la désaffectation, notamment pour assurer durant cette phase la préservation et l'amélioration d'une culture de sécurité forte
- un programme de contrôle et de surveillance servant à évaluer l'exécution et l'efficacité des mesures prises en particulier lors de travaux impliquant des conséquences ou des risques (de défaillances techniques ou humaines ; d'incidences sur la sûreté, la radioprotection, l'environnement ; etc.)
- l'analyse des éventuels événements et du retour d'expérience.

Le futur détenteur de l'autorisation est responsable de la réalisation de ces études et analyses.

Figure 5.12-1 : Étapes et études de la démarche FOH durant la désaffectation



Références

- [1] Loi sur l'énergie nucléaire LENU du 21.03.2003, SR 732.1
- [2] Ordonnance sur l'énergie nucléaire OENU du 10.12.2004, SR 732.11
- [3] Loi sur la radioprotection LraP du 22.03.1991, SR 814.50
- [4] Ordonnance sur la radioprotection ORaP du 22.06.1994, SR 814.501
- [5] International Commission on Radiological Protection ICRP, [http ://www.icrp.org](http://www.icrp.org), (07.11.2008)
- [6] Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, Tiefbauamt, Wasserwirtschaftsamt : *Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare – EHW Aare – Kurzfassung zum Schlussbericht (rapport)*, 19.12.2007
- [7] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. DVWK : *Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*, Merkblatt zur Wasserwirtschaft 251/1999, Bonn, 1999, ISBN 3-935067-97-6
- [8] Schälchli, Abegg & Hunzinger : *Hochwasser an Aare und Saane bei der Saanemündung, Überflutungsgefährdung des Kernkraftwerks Mühleberg*, 19.04.2006
- [9] Kerntechnischer Ausschuss KTA : *Schutz von Kernkraftwerken vor Hochwasser*, Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 2207, Fassung 11/04, BAnz. Nr. 35a
- [10] Richtlinien des BWG : *Sicherheit der Stauanlagen*, Version 1.1, November 2002
- [11] Flussbau AG : *Hochwasserspiegel « Aare Niederried-Mühleberg »*, 29.02.2008
- [12] United States Nuclear Regulatory Commission U.S. NRC NUREG-1742, George, E. : *Perspectives gained from the Individual Plant Examination for External Events (IPEEE) program*, April 2001
- [13] André, S., Bollaert, E. : *Effet des ouvrages d'accumulation*, In : Bezzola G.R., Hegg C. : *Ereignisanalyse Hochwasser* 2005, Teil 1, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt (WSL), 2007, pp. 99-106
- [14] Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG : *Hydrologische Jahrbücher der Schweiz, Département Landeshydrologie*
- [15] OcCC / ProClim : *Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*, Berne, 2007
- [16] Helmut, S. : *Langzeitverhalten der Hochwasserabflüssen in Baden-Württemberg und Bayern. Klimaveränderung und Wasserwirtschaft KLIWA, KLIWA-Projekt A 2.1.3. Analyse zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse, KLIWA-Bericht Heft 2*, 2002
- [17] OcCC/ProClim : *Extremereignisse und Klimaänderung*, Berne, 2003
- [18] Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC : *Plan sectoriel des lignes de transport d'électricité (PSE)*, 12.04.2001
- [19] Isler, A. : *Erläuterungen Geologischer Atlas der Schweiz*, 1 :25 000 Blatt, 1166 Berne, Office fédéral des eaux et de la géologie, 2005
- [20] Keller, B. : *Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens : Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen*, Eclogae geol. Helv. 85/3 : 611-651, 1992

- [21] Bericht Bohrlochmessungen KKM-E Mühleberg, Pr.-Nr. 245/2008, 25.06.2008, terratec D-Heitersheim
- [22] Kastrup, U., Deichmann, N., Fröhlich, A., Giardini D. : *Evidence for an active fault below the northwestern Alpine foreland of Switzerland*, Geophys. J. Int. 169, 2007, pp. 1273-1288
- [23] Kastrup, U. : *Seismotectonics und stress field variations in Switzerland*, Dissertation ETH, no. 14527, 2002
- [24] Dollinger, J. : *Geologie und Hydrogeologie der Unteren Süsswassermolasse im SBB-Grauholztunnel bei Bern*, LHG Geologischer Bericht, No. 21, 1997
- [25] Geotechnisches Institut AG : *Bericht über die Baugrund und Fundationsverhältnisse*, Bericht Atomkraftwerk Mühleberg, Gt-Nr. 626, Berne, 23.12.1965
- [26] Geotechnisches Institut AG : *Baugrunduntersuchung*, Bericht Atomkraftwerk Mühleberg-Projekt SUSAN, Gt-Nr. 2057, Berne, 11.06.1981
- [27] United States Nuclear Regulatory Commission U.S. NRC NUREG/CR-2300 : *A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants : PRA Procedures Guide*
- [28] Paul, F. : *A developing inventory of tornadoes in France*, Atmospheric Research, Vol. 56, 2001
- [29] United States Nuclear Regulatory Commission U.S. NRC NUREG-1407, *Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities*
- [30] Loi fédérale concernant la protection des ouvrages militaires, SR 510.518
- [31] Nasa Ames Space Science Division : *Spaceguard Survey Report*, 1992, [http ://impact.arc.nasa.gov](http://impact.arc.nasa.gov), [http ://128.102.38.40/impact/downloads/spacesurvey](http://128.102.38.40/impact/downloads/spacesurvey)
- [32] Ordonnance sur la protection des eaux (Oeaux), SR 814.201
- [33] Resun AG : *Bericht zur Umweltverträglichkeit*, Rahmenbewilligungsgesuch EKKM, TB-042-RS080013, décembre 2008
- [34] Directive DSN R-101, *Auslegungskriterien für Sicherheitssysteme von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren*, janvier 1993
- [35] Ordonnance du département de l'environnement, des transports et de la communication DETEC sur l'autorisation des décisions et recommandations internationaux, SR 814.201.81
- [36] Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordost-Atlantiks, SR 0.814.293, 22.09.1992
- [37] PARCOM : *Recommendation on Radioactive Discharges*, 20.06.1991
- [38] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC : *Synthesis Report*, 2007, [http ://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)
- [39] Directive DSN R-102 : *Auslegungskriterien für den Schutz von sicherheitsrelevanten Ausrüstungen in Kernkraftwerken gegen die Folgen von Flugzeugabsturz*, janvier 1993
- [40] Directive DSN R-103 : *Anlageinterne Massnahmen gegen die Folge schwerer Unfälle*, janvier 1993
- [41] Resun AG : *Bericht über die Abstimmung mit der Raumplanung*, Rahmenbewilligungsgesuch EKKM, TB-042-RS080014, décembre 2008

- [42] Resun AG : *Sicherungsbericht*, Rahmenbewilligungsgesuch EKKM, TB-042-RS080012, décembre 2008
- [43] Directive DSN R-04 : *Aufsichtsverfahren beim Bau von Kernkraftwerken, Projektierung von Bauwerken*, janvier 1993
- [44] Directive DSN R-06 : *Sicherheitstechnische Klassierung, Klassengrenzen und Bauvorschriften für Ausrüstungen in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren*, janvier 1993
- [45] Directive DSN R-100 : *Nachweis ausreichender Vorsorge gegen Störfälle in Kernkraftwerken*, décembre 2004
- [46] Ordonnance sur la protection en cas d'urgence au voisinage des installations nucléaires, SR 732.33
- [47] Konzept für den Notfallschutz in der Umgebung der Kernanlagen, Kom ABC 2006-03-D, janvier 2006
- [48] Ordonnance sur l'alerte, la transmission de l'alarme à la population et la diffusion de consignes de comportement, SR 520.12
- [49] Graber, W.K., Tinguely, M. : *Projekt Windbank oberes Aaretal*, rapport PSI No. 99-09
- [50] OcCC : *Extremereignisse und Klimaänderung* (rapport), 2003, http://www.occc.ch/reports/Extremereignisse03/Extrem03_Bericht.html
- [51] GeoExpert AG : *Kernkraftwerk Mühleberg Seismische Untersuchung* (Bericht), Auftrags-Nr. 5.3600002/950, Schwerzenbach, 20.03.2008
- [52] Augeos GmbH Zürich : *Bestimmung der elastischen Felsparameter in der Umgebung des Kernkraftwerks Mühleberg* (Bericht), juillet 2008
- [53] Muralt, R., Vuataz, F.D., Schönborn, G., Sommaruga, A., and Jenny, J. : *Intégration des méthodes hydrochimiques, géologiques et géophysiques pour la prospection d'une nouvelle ressource en eau thermale. Cas d'Yverdon les Bains, pied du Jura, Eclogae geologicae Helvetiae*, 1997, V. 90, pp. 179-197
- [54] Mosar, J. : *Present-day and future tectonic underplating in the Western Swiss Alps : reconciliation of basement/wrench-faulting and decollement folding of the Jura and Molasse Basin in the Alpine foreland*, Earth and planetary Science Letters, 1999, V. 173, pp. 143-145
- [55] Jordi, H.A. : *Tektonisch-strukturelle Übersicht Westschweizerisches Molassebecken*, Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. U.-Ing., avril 1990, Vol. 56, No. 56, No. 130, pp.1-11
- [56] Burkhard, M., Sommaruga, A. : *Evolution of the Swiss Molasse basin : structural relations with the Alps and the Jura belt*, Geological Society of London, Special Publication, 1998, V. 134, pp. 279-298
- [57] Bonnet, C. : *Interactions between tectonics and surface processes in the Alpine foreland : Insights from analogue model and analysis of recent faulting* (Ph.D. thesis), Université de Fribourg, 2007
- [58] Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant ORNI, SR 814.710
- [59] DSN AN-6647 : *Zonenpläne für die Notfallplanung* (Bericht), September 2008, www.hsk.ch
- [60] Geotechnisches Institut AG : *EKKM Mühleberg, Baugrunduntersuchung* (Bericht), Gt-Nr. 31.3714.030, Berne, 31.10.2008

- [61] Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG (publ.) (2000a) : *Carte géologique de la Suisse 1 :500 000 (version GIS Béta provisoire)*, Berne
- [62] Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG (publ.) (2000b) : *Carte tectonique de la Suisse 1 :500 000 (provisorische GIS-Beta-Version)*, Berne
- [63] Pfiffner, O.A., Erard, P.-F., Stäuble, M. : *Deep structures of the swiss alps, results of NRP 20, 8. two cross sections through the Swiss Molasse Basin* (lines E4-E6, WI, W7-W10), 1997
- [64] Mosar, J. : *Aléa sismique dans le Canton de Fribourg ; étude réalisée sur mandat de l'Etat de Fribourg*, Unveröffentlichte Studie für den Kanton Fribourg, 2006
- [65] Wells, D.L., Coppersmith, K.J.B. : *New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement*, Bull. Seism. Soc. Amer. 84(4), 1994, pp. 974-1002
- [66] IAEA, *Preliminary Safety Review Services, Seismic Safety Expert Mission : Preliminary findings and lessons learned from the 16 July 2007 earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP* (Bericht), V.1, 17.08.2007,
[http ://www.iaea.org/NewsCenter/News/2007/kashiwazaki-kariwa_report.html](http://www.iaea.org/NewsCenter/News/2007/kashiwazaki-kariwa_report.html)
- [67] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. : *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*, *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, V. 15/3, pp. 259-263
- [68] Mosar, J., Ibele, T., Matzenauer, E. : *Tectonics of the Molasse Basin of Western-Switzerland : an Overview*, rapport de travail de Nagra NAB 08-07
- [69] Mohammadioun, B., Serva, L. : *Stress drop, slip type, earthquake magnitude and seismic hazard*, Bull. Seism. Soc. Amer., 2001, 91 (4), pp. 694-707
- [70] Platt, N.H., Keller, B. : *Distal alluvial deposits in a foreland basin setting – the Lower Freshwater Molasse (Lower Miocene), Switzerland ; sedimentology, architecture and palaeosols*, *Sedimentology*, 1992, 39, pp. 545-565
- [71] Resun AG : *Nachweis für die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle*, Rahmenbewilligungsgesuch EKKM, TB-042-RS080016, décembre 2008
- [72] Office fédéral de l'énergie : *Plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes », conception générale*, 02.04.2008
- [73] DSN AN-6252 : *Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz* (Bericht), Projekt PEGASOS, juin 2007,
www.hsk.ch
- [74] Directive DSN R-35 : *Aufsichtsverfahren bei Bau und Änderungen von Kernkraftwerken*, Systemtechnik, mai 1996
- [75] Directive DSN R-46 : *Anforderungen für die Anwendung von sicherheitsrelevanter rechnerbasierter Leittechnik in Kernkraftwerken*, avril 2005
- [76] PEGASOS Project : *Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites, Final Report*, Volume 1 : Text. Nagra, Wettingen, 2004
- [77] United States Nuclear Regulatory Commission U.S. NRC NUREG/CR-6372 : *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis : Guidance on Uncertainty and Use of Experts*, 1997

- [78] Niggeler, E., Keller, V. : *Winterbestände der Wasservögel am Aare-Stausee Niederried 1951/52-2005/06*, Der Ornithologische Beobachter Band 104, 2007, Heft 4, pp. 279-300
- [79] Ordonnance sur la qualification du personnel des installations nucléaires OQPN, SR 732.143.1
- [80] The International Nuclear Safety Advisory Group INSAG : *Safety Culture* (report), IAEA Safety Series No. 75-INSAG-4,
Http ://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub882_web.pdf
- [81] Directive DSN G-07 : *Organisation von Kernanlagen*, avril 2008
- [82] Ordonnance relative à l'organisation d'intervention en cas d'augmentation de la radioactivité OROIR, SR 520.17
- [83] Loi fédérale sur la protection de la population et sur la protection civile, SR 520.1
- [84] Ordonnance sur la distribution de comprimés d'iode à la population, SR 814.52
- [85] Basler & Hofmann AG : *Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen, zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge*, 1992 und Korrigendum vom April 1993
- [86] CARBURA, SKS Ingenieure AG : *Rahmenbericht über die Sicherheit von Stehtankanlagen für flüssige Treib- und Brennstoffe*, 2004
- [87] Schweizerische Erdgaswirtschaft und SKS Ingenieure AG : *Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen, Rahmenbericht*, Revidierte Ausgabe 1997 und die in der Zwischenzeit gewonnenen Erfahrungen aus ähnlichen Projekten und aus Gesprächen mit den zuständigen Behörden, 1997
- [88] Verein Deutscher Ingenieure VDI : *Ausbreitungsrechnung für die Sicherheitsanalyse nach der Störfallverordnung*, Richtlinie VDI 3783, Blatt 2, *Ermittlung der Ausbreitung schwerer Gase im Rahmen der Sicherheitsanalyse*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990
- [89] Kerntechnischer Ausschuss KTA : *Instrumentierung zur Ermittlung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre*, Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 1508
- [90] Begert, M., Schlegel, T., Kirchhofer, W. : *Homogeneous Temperature and Precipitation Series of Switzerland from 1864 to 2000*, International Journal of Climatology, 2005, V.25, pp. 65-8
- [91] SIA Norm 261 : *Einwirkung auf Tragwerke*, 2003
- [92] Dotzek, N. : *An updated estimate of tornado occurrence in Europe*, 2003
- [93] Entwurf der HSK-Richtlinie A-05 : *Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) : Qualität und Umfang*, 2003
- [94] Ordonnance sur la Centrale nationale d'alarme OCENAL, SR 520.18
- [95] Ordonnance sur les substances étrangères et les composants OSEC, SR 817.021.23, 26.6.1995
- [96] Intraplan Consult GmbH : *Entwicklung des Flugverkehrs in der Schweiz bis 2030, Nachfrageprognose*, München, août 2005,
http ://www.bazl.admin.ch/dokumentation/studien/index.html?lang=de
- [97] Office de la statistique suisse : *Bewegungen im Linien- und Charterverkehr seit 1950*, Neuchâtel, 2009

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/07/03/03.html>

- [98] Boeing : *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide Operations 1959-2003*, 2004.
- [99] DOE Standard : *Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities*, DOE-STD-3014-96, octobre 1996,
<http://hss.doe.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/std3014/std3014.pdf>
- [100] Bienz, A.F. : *Analysis of the Risks of the Population due to Airplane Crashes Around Zürich Airport*, Proceeding of PSAM7 & ESREL'04, Springer Verlag, (London), Berlin juillet 2004 (ISBN 9871852338275)
- [101] Federal Office of Civil Aviation FOCA : *Swiss Civil Aviation 2007*, Neuchâtel, 2008.
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/news/publikationen.html?publicationID=3323>
- [102] Skyguide : *Facts and Figures 2003*, Geneva, août 2003.
<http://www.skyguide.ch/de/MediaRelations/Publications/>
- [103] Skyguide : *Annual Report 2003*, Geneva, February 2004.
<http://www.skyguide.ch/de/MediaRelations/Publications/>
- [104] Skyguide : *Flugsicherung*, Skyguide 4-2002.
<http://www.skyguide.ch/de/MediaRelations/Publications/>
- [105] Brotschi, P. : *Gebrochene Flügel, Alle Flugunfälle der Schweizer Luftwaffe*, Orell Füssli Verlag AG, 2007.
- [106] Grebner, D., Roesch, T. : *Flächen-Mengen-Dauer-Beziehungen von Starkniederschlägen und mögliche Niederschlagsgrenzwerte in der Schweiz* (Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes « Klimaänderungen und Naturkatastrophen », NFP 31), Zurich 1998, (ISBN 3728126004)
- [107] Resun AG : *Konzept für die Stilllegung*, Demande d'autorisation générale EKKM , TB-042-RS080015, décembre 2008
- [108] Directive DSN R-30 : *Aufsichtsverfahren beim Bau und Betrieb von Kernanlagen*, janvier 1993
- [109] ANSI/ANS – 58.21 : *External Events in PRA Methodology*, 2007
- [110] IAEO Safety Requirements NS-R-3 : *Site Evaluation for Nuclear Installations*, 2003
- [111] Geotechnisches Institut AG : *EKKM Mühleberg, Grundwasserstände im Lockergestein, Porenwasserdrücke im Fels* (Bericht), Gt-Nr. 31.3714.050, Berne, 14.08.2009
- [112] Seed, H.B., Idriss, I.M. : *Ground motion and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake*, Engineering Research Institute (EERI), University of California, Berkeley, EERI Monograph, 1982
- [113] Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R. : *Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations*, Journal of Geotechnical Engineering Division 111 (12), 1985, pp. 1425-1445.
- [114] Tokimatsu, K., Seed, H.B. : *Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking*, Journal of Geotechnical Engineering 113 (8), 1987, pp. 861-878.
- [115] Youd, T. L., Hansen, C. M., Bartlett, S. F. : *Revised MLR equations for predicting lateral spread displacement*, Proc. 7th U.S.–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction, Seattle, Tech. Rep. No.

MCEER-99-0019, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 1999, pp. 99–114.

- [116] Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F. J., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stokoe II, K. H. : *Liquefaction Resistance of Soils : Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127 (10), 2001, pp. 817-833.
- [117] Schlunegger, F., Hinderer, M. : *Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps*, Terra Nova, 2003, Vol 15, pp. 88-95
- [118] Gorin, G. E., Morend, D., Pugin, A. : *Bedrock, Quaternary sediments and recent fault activity in central Lake Neuchatel, as derived from high-resolution reflection seismic*, Eclogae geol. Helv. 96 (Supplement 1), 2003, pp. 3-10
- [119] Cornell, C.A. : *Engineering seismic risk analysis*, Bull. Seism. Soc. Am. 58, 1968, pp. 1583-1606
- [120] Cornell, C.A. : *A Probabilistic Analysis of Damage to Structures Under Seismic Loads*, Chapter 27 of Dynamic Waves in Civil Engineering, ed. by D. A. Howells et al., John Wiley & Sons Ltd., London, 1971
- [121] Pfiffner, O.A., Erard, P.F., Stäubli, M. 1997 : *Two cross sections through the Swiss Molasse Basin* in Pfiffner, Lehner, Heitzman, Mueller, Steck (editors) : *Deep structure of the Swiss Alps – Results from NRP 20*, (pp. 64-71), Birkhäuser Verlag, Bâle, ISSN 0039-3169 resp. pp. 1573-1626
- [122] Meier, B. : *2D Seismik Interpretation im Gebiet Fribourg und Berner Seeland*, Rapport Interoil E&P Switzerland AG, pour Resun AG, Zurich 2009
- [123] NAGRA Rapport technique : *Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA und das HAA Lager : Geologische Grundlagen*, NAGRA NTB 08-04
- [124] Deichmann, N. : *Structural and rheological implications of lower-crustal earthquakes below northern Switzerland*, Phys. Earth Planet. Int. 69, 1992, pp. 270-280
- [125] PEGASOS : *Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS-Project) – Final Report Volume 2 : Results*. Nagra, Wettingen, 2004
- [126] Giardini, D., Wiemer, S., Fäh, D., Deichmann, N., Sellami, S., Jenni, S., the hazard team of the Swiss Seismological Service : *Seismic hazard assessment 2004*, Swiss Seismol. Serv., ETH Zürich, 2004
- [127] PEGASOS : *Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS-Project) – Final Report Volume 4 : Elicitation Summaries, Seismic Source Characterisation*, Nagra, Wettingen, 2004

Index des tableaux

Tableau 2.3-1 :	Dimensions des bâtiments essentiels (en mètres)	19
Tableau 2.3-2 :	Échéancier du déroulement des travaux	22
Tableau 2.3-3 :	Besoin temporaire de surfaces pour la phase de construction de l'EKKM	23
Tableau 3.1-1 :	Nombre d'habitant des plus importantes zones à forte concentration urbaine dans les environs du site (<i>Source : Office fédéral de la statistique</i>).....	53
Tableau 3.1-2 :	Répartition de la population des communes dans la zone 1 (R=2.8 km) et dans la zone 2 (R=20 km) pour les années 1990, 2000, 2003 et 2007, avec une classification des zones 2003	55
Tableau 3.1-3 :	Population transitoire : formation (état 2007/2008).....	66
Tableau 3.1-4 :	Population transitoire : santé (état 2007)	67
Tableau 3.1-5 :	Population transitoire : Tourisme (état 2008)	68
Tableau 3.1-6 :	Population transitoire : toutes catégories confondues	68
Tableau 3.1-7 :	Utilisation du sol dans un rayon de 20 km autour du site répartie en 4 secteurs principaux, chiffres du relevé de 2004/09	71
Tableau 3.1-8 :	Développement des quatre catégories principales de l'utilisation des sols dans un rayon (20 km) autour du site	78
Tableau 3.2-1 :	Trafic routier des deux plus importantes liaisons routières aux environs du site	87
Tableau 3.2-2 :	Trafic ferroviaire (jour ouvrable) sur la ligne Berne-Chiètres	88
Tableau 3.2-3 :	Rayons de la boule de feu pour 46 t et 20 t de gaz propane liquide libéré	91
Tableau 3.3-1 :	Installations météo. Les données de mesure proviennent des deux stations de mesure dans un rayon de 2 km de la KKM ainsi que des stations de Wynau et Berne. Les données sur la foudre proviennent de Météorage.	98
Tableau 3.3-2 :	Plus fortes rafales de vent enregistrées durant la période de mesure	101
Tableau 3.3-3 :	Maximum absolu des rafales de vent (m/s) pour chaque mois durant l'ensemble de la période de mesure	101
Tableau 3.3-4 :	Paramètres de la distribution des GEV de 'Fig. 3.3-3	103
Tableau 3.3-5 :	Pointes maximales de rafales attendues pour les diverses périodes répétitives [m/s]. (KI = Intervalle de confiance)	103
Tableau 3.3-6 :	Valeurs horaires moyennes de la vitesse du vent (m/s) pour chaque mois durant l'ensemble de la période de mesure	105
Tableau 3.3-7 :	Mühleberg 1987-2007 Valeurs moyennes (Mean) et variation standard (Std) des maximums mensuels calculés sur les valeurs horaires du mâât météo 10 (m/s)	105

Tableau 3.3-8 :	Mühleberg 1987-2007 Valeurs moyennes (Mean) et variation standard (Std) des maximums mensuels calculés sur les valeurs horaires du mât météo 110 m au-dessus du sol (m/s)	105
Tableau 3.3-9 :	Mühleberg 1987-2007 Valeurs moyennes (Mean) et variation standard (Std) des maximums mensuels calculés sur les valeurs horaires du mât Stockeren 70 m au-dessus du sol (m/s)	106
Tableau 3.3-10 :	Nombre de mesures de 10 min. par année au mât météo et mât Stockeren avec vent calme	109
T Tableau 3.3-11 :	Classification des tornades	109
Tableau 3.3-12 :	Observations de tornades en Suisse dès 1890-2008. Les probabilités d'événements de tornades ne sont pas répertoriées ici. La fréquence des événements durant ces 10 dernières années se rapporte au fait qu'aujourd'hui, l'on accorde plus d'attention à ce thème et que l'on observe et documente beaucoup plus.	111
Tableau 3.3-13 :	Températures records à Berne et Mühleberg.....	113
Tableau 3.3-14 :	Valeurs moyennes journalières de la température - plus hautes / plus basses [°C].....	113
Tableau 3.3-15 :	Valeurs moyennes mensuelles de la température - plus hautes / plus basses [°C].....	114
Tableau 3.3-16 :	Valeurs moyennes mensuelles de la température [°C].....	114
Tableau 3.3-17 :	Moyenne des températures journalières et nocturnes aux mâts météo Mühleberg et sur le mât Stockeren (Données en °C)	115
Tableau 3.3-18 :	Paramètres des distributions GEV de la température.....	115
Tableau 3.3-19 :	Moyenne horaire des températures [°C] les plus basses (min) / les plus hautes (max) attendues pour Berne et Mühleberg pour diverses périodes répétitives. Dans la parenthèse angulaire est indiqué l'intervalle de confiance de 95%.	116
Tableau 3.3-20 :	Nombre mensuel d'heures avec risque de givrage	117
Tableau 3.3-21 :	Quantité de précipitations la plus forte à l'heure, à Mühleberg, Berne et Wynau (mm).....	119
Tableau 3.3-22 :	Quantité de précipitations la plus forte à l'heure, à Mühleberg, Berne et Wynau (mm).....	119
Tableau 3.3-23 :	Quantité de précipitations la plus forte à la journée Mühleberg, Bern et Wynau (mm).....	119
Tableau 3.3-24 :	Quantité de précipitations la plus forte sur cinq jours à Mühleberg, Berne et Wynau (mm).....	119
Tableau 3.3-25 :	Quantité de précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales à Mühleberg (mm).....	120

Tableau 3.3-26 :	Quantité de précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales à Berne (mm)	120
Tableau 3.3-27 :	Paramètres des distributions (GEV) de la quantité de précipitations à l'heure de la Fig. 3.3-10	121
Tableau 3.3-28 :	Plus haute somme à l'heure attendue [mm] pour diverses périodes répétitives	121
Tableau 3.3-29 :	Paramètres de la distribution (GEV) des quantités de précipitations journalières de la Fig. 3.3-11	122
Tableau 3.3-30 :	Plus haute somme journalière attendue [mm] pour diverses périodes répétitives	122
Tableau 3.3-31 :	Plus grande hauteur globale de neige attendue [cm] et charge de la neige pour les différentes périodes répétitives (KI = Intervalle de confiance). Pour la charge spatiale moyenne de neige l'on a admis selon [91] 3kN/m ³	125
Tableau 3.3-32 :	Nombre d'années de grêle dans les environs de Mühleberg durant la période de 1961-2004	127
Tableau 3.3-33 :	Répartition saisonnière de l'augmentation de la température pour les années 2030, 2050 et 2070 par rapport à 1990. La valeur médiane est indiquée et, entre parenthèses, l'intervalle de confiance de 95%. (selon OcCC [15])	128
Tableau 3.3-34 :	Fréquence des catégories de diffusion A-F. De 2/1987 jusqu'à 12/2007, chaque heure a été comptée	130
Tableau 3.3-35 :	Nombre d'heures par mois selon la classe de diffusion entre 2/1987 et 12/2007	130
Tableau 3.3-36 :	Nombre d'heures moyen par mois selon la classe de diffusion durant la journée (6-18 UTC).....	131
Tableau 3.3-37 :	Nombre d'heures moyen par mois selon la classe de diffusion durant la nuit (18-6 UTC).....	131
Tableau 3.3-38 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion A	133
Tableau 3.3-39 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion B	133
Tableau 3.3-40 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion C	134
Tableau 3.3-41 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion D	134
Tableau 3.3-42 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion E	135

Tableau 3.3-43 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : pas de précipitations, classe de diffusion F	135
Tableau 3.3-44 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion A.....	136
Tableau 3.3-45 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion B	136
Tableau 3.3-46 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion C.....	137
Tableau 3.3-47 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : Précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion D.....	137
Tableau 3.3-48 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion E	138
Tableau 3.3-49 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations jusqu'à 0.5 mm/h, classe de diffusion F	138
Tableau 3.3-50 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion A.....	139
Tableau 3.3-51 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion B	139
Tableau 3.3-52 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion C.....	140
Tableau 3.3-53 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion D.....	140
Tableau 3.3-54 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion E	141
Tableau 3.3-55 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations de 0.5-3 mm/h, classe de diffusion F.....	141
Tableau 3.3-56 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion A.....	142
Tableau 3.3-57 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion B	142
Tableau 3.3-58 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion C.....	143
Tableau 3.3-59 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion D.....	143
Tableau 3.3-60 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion E	144

Tableau 3.3-61 :	Quadruple paramétrie de la statistique de propagation : précipitations supérieures à 3 mm/h, classe de diffusion F	144
Tableau 3.4-1 :	Débits des scénarios de crues extrêmes considérés	149
Tableau 3.4-2 :	Combinaisons de débit de l'Aar et la Sarine pour les HQ _{1 000} [8]	150
Tableau 3.4-3 :	Niveau des scénarios de crues extrêmes.....	151
Tableau 3.4-4 :	Niveau d'eau à la KKM (EKKM) durant différentes années	151
Tableau 3.4-5 :	Résumé des scénarios de crues	156
Tableau 3.4-6 :	Lacs de barrages dans le bassin versant de l'Aar	157
Tableau 3.4-7 :	Lacs de barrages dans le bassin versant de la Sarine.....	157
Tableau 3.4-8 :	Cotes de crues maximales des ruptures de barrages analysées sur le site de Niederruntigen	165
Tableau 3.5-1 :	Stratification de la couverture de roches meubles du Quaternaire dans la région de Mühleberg (des dépôts les plus récents aux plus anciens)	192
Tableau 3.5-2 :	Résultats des mesures de forage pour la nappe souterraine	195
Tableau 3.5-3 :	Productivité théorique de la nappe souterraine à l'emplacement du forage RB11/P/08.....	195
Tableau 3.5-4 :	Description géotechnique des couches des roches meubles	200
Tableau 3.6-1 :	Événements externes potentiels accompagnés de la référence aux paragraphes qui les décrivent	258
Tableau 3.6-2 :	Vitesse de pointe des rafales sur le site (10 m au-dessus du sol conformément à l'analyse des valeurs extrêmes du chapitre 3.3.4)	268
Tableau 3.6-3 :	Fréquence des tornades en Suisse	269
Tableau 3.6-4 :	Fréquence des tornades sur le site.....	270
Tableau 3.6-5 :	Calcul de C, gros porteurs, décollage et atterrissage, Berne-Belp.....	273
Tableau 3.6-6 :	Calcul de f(x, y), gros porteurs, décollage et atterrissage, Berne-Belp	274
Tableau 3.6-7 :	Calcul de F'=N*-C*f(x, y), gros porteurs, vol de croisière, Zurich-Genève	276
Tableau 3.6-8 :	Calcul de C, avions moyens, décollage et atterrissage, aéroports régionaux .	278
Tableau 3.6-9 :	Calcul de f(x, y), avions légers, décollage et atterrissage, aéroports et champs d'aviation.....	280
Tableau 3.6-10 :	Calcul de f(x, y), avions militaires de taille moyenne, décollage et atterrissage, Payerne	283
Tableau 3.7-1 :	Incidents survenus à Mühleberg au cours des 10 dernières années.....	304

Index des figures

Figure 2.2-1 :	Schéma d'une centrale nucléaire dotée d'un réacteur à eau sous pression	5
Figure 2.2-2 :	Schéma d'une centrale nucléaire dotée d'un réacteur à eau bouillante.....	6
Figure 2.2-3 :	Exemple d'une installation moderne dotée d'un réacteur à eau sous pression : AP1000 de Westinghouse-Toshiba.....	7
Figure 2.2-4 :	Exemple d'une installation moderne dotée d'un réacteur à eau bouillante : ESBWR de General Electric-Hitachi.....	8
Figure 2.3-1 :	Vue d'ensemble du site et des environs.....	12
Figure 2.3-2 :	Photomontage de l'EKKM (disposition possible des ouvrages), prise de vue : Salzweid. L'actuelle KKM est à l'arrière-plan.	14
Figure 2.3-3 :	Photomontage de l'EKKM équipée d'un réacteur de type EPR comme exemple (disposition possible des ouvrages), prise de vue : Talmatt.....	14
Figure 2.3-4 :	Représentation schématique de bâtiments et de systèmes importants d'une centrale nucléaire équipée d'un réacteur à eau sous pression (DWR) et d'un système de refroidissement hybride	17
Figure 2.3-5 :	Exemple de plan de situation d'une installation nucléaire dotée d'un réacteur EPR et une tour de refroidissement hybride. Cette disposition correspond aux illustrations avec photomontage (Fig. 2.3-2, Fig. 2.3-3). Sous réserve de l'optimisation future du projet ainsi que du choix du système de réacteur et du fournisseur ; route non optimisée.	20
Figure 2.3-6 :	Exemple de plan de situation d'une installation nucléaire dotée d'un réacteur EPR et d'un refroidissement hybride avec deux tours de refroidissement hybride. Cette disposition correspond aux illustrations avec photomontage (Fig. 2.3-2, Fig. 2.3-3). Sous réserve de l'optimisation future du projet ainsi que du choix du système de réacteur et du fournisseur	21
Figure 2.3-7 :	Desserte et surfaces éventuelles pour les installations temporaires durant la phase des travaux de construction de l'EKKM.....	24
Figure 2.4-1 :	Principe d'un circuit de refroidissement du réacteur	29
Figure 2.4-2 :	Valeurs moyennes de jour de la température de l'Aar en amont de la centrale nucléaire de Mühleberg (KKM) pour la période 1998-2007	34
Figure 3.1-1 :	Représentation graphique de toute la population transitoire par secteur d'arrondissement, de 30°	69
Figure 3.2-1 :	EKKM : Vue d'ensemble des risques industriels.....	86
Figure 3.2-2 :	Distance de la limite d'explosion inférieure en relation avec une émission spontanée de grande quantité [85].....	90
Figure 3.3-1 :	Plan de situation des installations de mesures météorologiques autour de Mühleberg. Le rectangle rouge désigne la centrale nucléaire de Mühleberg,	

	le rond rouge les deux mâts météo (en haut) et le mât à faisceau Stockeren (en bas).	96
Figure 3.3-2 :	Plan de situation des installations de mesures météorologiques à Wynau. Le cercle rouge localise les installations de mesures.	97
Fig. 3.3-3 :	GEV - Distribution et histogramme (normé) des pointes de rafales pour Berne 1981-2006, Wynau 1981-2007, Stockeren 1987-2007 et Mühleberg (10 m et 110 m au-dessus du sol) 1987-2007 [m/s].	102
Figure 3.3-4 :	Périodes répétitives des pointes de rafales pour Mühleberg 10 m. au-dessus du sol et Stockeren. L'événement record de 1999 avec 28.4 m/s au mât météo 10 m au-dessus du sol à Mühleberg avait une période répétitive de 830 ans. Le même événement au Stockeren avait une période répétitive annuelle de 2 000 ans.	104
Figure 3.3-5 :	Rose des vents des valeurs moyennes de 10 minutes des mâts météo 10 m et 110 m au-dessus du sol et du mât à faisceau Stockeren	107
Fig. 3.3-6 :	Rose des vents des valeurs moyennes de 10 minutes des mâts météo 10 (en haut) et 110 m au-dessus du sol (au centre) et mât à faisceau Stockeren (en bas) durant la journée - (7-19 h) (à gauche) et durant la nuit (19-7 h) (à droite)	108
Figure 3.3-7 :	Carte de la Suisse : Les observations de tornades- (T) et trombes d'eau- (W) sont indiquées	112
Figure 3.3-8 :	Répartition normée de l'humidité relative (la valeur = 1 signifie que cette valeur revient le plus souvent). La courbe pour Wynau finit à 98%. La valeur correspond à la fréquence dans la classe 96-100% alors que la dernière valeur pour Berne indique la fréquence de la classe 99-103%.	117
Figure 3.3-9 :	Répartition du risque de givrage en fonction des heures de la journée.	118
Figure 3.3-10 :	Distribution (GEV) et histogramme (normé) de la quantité de précipitations à l'heure pour Berne 1981-2006 et Mühleberg 1988-2007 [mm]	121
Figure 3.3-11 :	Distribution (GEV) et histogramme (normé) des quantités de précipitations journalières pour Berne 1864-2006, Wynau 1981-2007 et Mühleberg 1988-2007 [mm].	122
Figure 3.3-12 :	Périodes répétitives (ligne rouge) de la somme de précipitation journalière pour Berne (à gauche) et Mühleberg (à droite). La valeur répétitive de 80 mm est attendue 1 fois tous les 50 ans.	123
Figure 3.3-13 :	Plus hautes valeurs annuelles de la quantité de précipitations journalière [mm] et événement tous les 50 ans (rouge) avec intervalle de confiance de 95% (barre grise)	124
Figure 3.3-14 :	Plus grand amoncellement annuel de neige à Berne	125
Figure 3.3-15 :	Moyenne annuelle de la densité d'éclairs en Suisse, éclairs qui atteignent le sol. Le cercle noir situe le site de Mühleberg.	126

Figure 3.3-16 :	Température moyenne des 150 dernières années à Berne et Bâle. La moyenne mobile indique une croissance claire dans la deuxième moitié du XX ^e siècle.	127
Figure 3.3-17 :	Quantité de précipitations annuelle des 150 dernières années à Berne et Bâle	128
Figure 3.4-1 :	Carte synoptique des environs proches de l'EKKM	147
Figure 3.4-2 :	Courbe du risque de crues pour la KKM (EKKM)	152
Figure 3.4-3 :	Cotes de crue de l' Aar pour le HQ _{10.000}	153
Figure 3.4-4 :	Importantes retenues (du [13]) bassin versant de la Sarine (gauche) et du bassin versant du haut de l'Aar (droite).....	159
Figure 3.4-5 :	Niveau à l'avant de la terrasse après rupture complète du Barrage de Mühleberg au Gewiss.-km 156.2	161
Figure 3.4-6 :	Courbe de la cote de crues sur le site de l'EKKM au Gewiss.-km 156.2 lors d'une rupture totale du barrage de Schiffenen.....	162
Figure 3.4-7 :	Courbe de la cote des crues sur le site de l'EKKM au Gewiss.-km 156.2 lors d'une rupture séquentielle de Rossens / Schiffenen	165
Figure 3.4-8 :	Annualités des étiages au niveau de l'Aar Berne-Schönau	167
Figure 3.5-1 :	Carte géologique et tectonique de la Suisse et des régions limitrophes, simplifiée d'après l'Office fédéral des eaux et de la géologie 2000a [61] et 2000b [62].....	176
Figure 3.5-2 :	Profil géologique à travers le Plateau occidental jusqu'aux Alpes ; d'après Burkhard & Sommaruga 1998 [56] ; simplifié dans Bonnet 2007 [57].....	176
Figure 3.5-3 :	Carte tectonique synoptique, intégrant les résultats récents de l'interprétation sismique (voir chapitre 3.5.3.7.2), notamment les failles qui sont en rapport avec la zone de Fribourg et les structures de Hermrigen et de Tschugg.	179
Figure 3.5-4 :	Mouvements verticaux récents de la croûte en Suisse (tiré de [123]). Les taux de soulèvement dans le bassin molassique entre Berne, Bienne et Yverdon sont de 0 à 0.25 mm/an. Il s'agit essentiellement de soulèvements. Ces données ne peuvent pas être attribuées à une activité tectonique spécifique.....	182
Figure 3.5-5 :	Sismicité (a) et répartition de la profondeur des foyers (b), tiré de [123]	184
Figure 3.5-6 :	Carte montrant les épicentres de séismes dans un rayon de 25 km autour de l'EKKM. La concentration d'activité sismique dans la zone de Fribourg, orientée N-S, est discutée de manière approfondie au chapitre. 3.5.3.6.	185
Figure 3.5-7 :	Carte et croquis d'un modèle tectonique régional	187

Figure 3.5-8 :	Profil géologique à travers le bassin molassique de la Suisse occidentale (modifié à partir de Pfiffner et al. 1997 [63]. Désignations : USM, molasse d'eau douce inférieure ; Pc, permo-carbonifère)	188
Figure 3.5-9 :	Modèle de faciès simplifié de la molasse d'eau douce inférieure dans la partie septentrionale du bassin molassique (tiré de [70], légèrement modifié).....	190
Figure 3.5-10 :	Emplacement de la faille présumée au nord-ouest du site de l'EKKM, de l'autre côté de l'Aar. Les trois segments de profil montrent l'interprétation de GeoExpert pour la faille subverticale présumée dans l'USM [51]. La carte de droite montre la courbure de la faille qui en découle. D'autres déformations analogues de la réflexion sismique le long de ces segments et d'autres profils (non représentés ici) n'ont pas été interprétées comme des failles. L'emplacement des trois sections de profils concernés est indiqué en jaune sur la carte de droite.	191
Figure 3.5-11 :	Emplacement des sondages du sol de fondation, des forages et des points de mesure.....	193
Figure 3.5-12 :	Profil le long de l'Aar.....	198
Figure 3.5-13 :	Profil à travers l'Aar	199
Figure 3.5-14 :	Carte de l'aléa sismique du Service sismologique suisse (SED, 2004). Sont représentées les accélérations horizontales attendues (en m/s^2) pour une fréquence de 5 Hz et un temps de retour de 10 000 ans.	207
Figure 3.5-15 :	Courbe d'aléa pour la région du site de Mühleberg, composantes horizontales pour la roche, la surface, la PGA. La distribution des incertitudes est représentée par les courbes de la moyenne, de la médiane et des quantiles de 5%, 16%, 84% et 95%.	214
Figure 3.5-16 :	Spectre d'aléa (« Uniform Hazard Spectrum ») pour la région du site de Mühleberg, composantes horizontales, roche pour une probabilité annuelle de dépassement de 10^{-4} et 5% d'atténuation (critique).	214
Figure 3.5-17 :	Valeurs moyennes de la PGA pour des roches dures (3000 m/s) avec une probabilité annuelle de dépassement de 10^{-4} dans la partie centrale et orientale des Etats-Unis (calculées sur la base d'une carte d'aléa USGS – pour des roches moins dures, de 2000 m/s, il résulterait des accélérations à peine plus élevées, selon la norme PEGASOS). Les résultats d'aléa de PEGASOS correspondent à la codification jaune.	215
Figure 3.5-18 :	Extrait de la base de données PEGASOS de caractérisation des sources aux environs de Mühleberg (« modèle sismo-tectonique »). L'EKKM en projet est représentée par le pentagone vert.	221
Figure 3.5-19 :	Distributions de probabilité de la magnitude maximale pour les zones sources du nord de la Suisse. Développées par les quatre groupes d'experts du SP1 (caractérisation des sources).....	223

- Figure 3.5-20 : Exemple d'un modèle de zonage du groupe d'experts EG1a. Dans cette variante, la zone du fossé permo-carbonifère n'est pas exclue comme zone source séparée (« PC Active » : No). Dans ces conditions, la zone de Fribourg est modélisée comme faille source (FF) dans la moitié des cas, c'est-à-dire avec une pondération de 0.5 (Fribourg fault source : yes). 224
- Figure 3.5-21 : Modèle de zonage des sources du groupe d'experts EG1a présenté sous forme de branches pondérées d'un arbre logique. Les représentations alternatives de la zone de Fribourg dans le cas (« PC Active » : No) sont marquées en jaune. 225
- Figure 3.5-22 : Modèle des vitesses des ondes de cisaillement sur le site de la KKM selon l'estimation des quatre experts du SP3 (effet de site), en noir. Le modèle PEGASOS, ainsi que le profil traitillé en bleu ont servi de données d'entrée pour les calculs d'amplification de résonance pour KKM et EKKM (voir figure 3.5-23). Le profil pour l'EKKM s'appuie fortement sur les résultats des mesures down-hole (fournis par 10 forages, courbe brune, voir [60]) et tient compte de l'épaisseur très légèrement plus faible des roches meubles sur le nouveau site..... 228
- Figure 3.5-23 : Comparaison provisoire des fonctions d'amplification moyennes pour les sites de KKM (rouge) et EKKM (bleu) 229
- Figure 3.5-24 : Contributions à l'aléa sismique pour le site de Mühleberg (roche) en fonction de la magnitude, de la distance et de ϵ . En haut pour une amplitude d'accélération horizontale de 0.05 g et une fréquence de 0.5 Hz, en bas pour une amplitude de 0.7 g et une fréquence de 100 Hz (PGA)..... 231
- Figure 3.5-25 : Carte des épicentres de la partie occidentale du bassin molassique pour les séismes de magnitude $M_w > 1$ pendant la période 1984-2003 (voir [126]). L'alignement des épicentres à l'ouest de Fribourg indique un décrochement senestre actif de direction N-S. Les hypocentres de ces tremblements de terre se trouvent dans le terrain de couverture (voir [22])..... 232
- Figure 3.5-26 : *A gauche* : Détail des scénarios de zonage des sources établis par le groupe d'experts EG1a dans le cas « PC troughs not reactivated » ; FF représente la faille-source de Fribourg. *A droite* : aléa moyen (mean hazard, PGA) dans la région du site de Mühleberg, alternativement avec et sans la prise en compte explicite de la zone de Fribourg comme source linéique (« yes » resp. « no »)..... 234
- Figure 3.5-27 : *En haut* : Modélisation de la zone de Fribourg par le groupe d'experts EG1b. L'étroite zone source AE07 est déterminée par une faille supposée au centre. Pour la limite orientale, on admet trois positions alternatives avec des pondérations de 0.25, 0.5 et 0.25. L'emplacement du site de l'EKKM est signalé en vert. *En bas* : Aléa moyen (mean hazard, PGA) dans la région du site de Mühleberg, dépendant de l'emplacement de la limite orientale de la zone source. La courbe grise (NA) représente la contribution des

	branches de l'arbre logique sans modélisation explicite de la zone de Fribourg.	235
Figure 3.5-28 :	Les dix principales contributions des diverses sources à la valeur moyenne de l'aléa dans la région du site de Mühleberg selon le modèle du groupe d'experts EG1a. (composantes horizontales, surface, roche, PGA). La faille-source FF (Fribourg Fault) ne fournit pas une contribution dominante.	236
Figure 3.5-29 :	Plan de situation des lignes de sismique réflexion dans la région étudiée. Toutes les lignes ont été incluses dans l'étude d'interprétation décrite dans ce paragraphe. Les lignes rouges correspondent aux exemples présentés dans ce paragraphe.	240
Figure 3.5-30 :	La structure de Fribourg sur une ligne sismique représentative à env. 5 km au SE de Fribourg. La section montre les horizons stratigraphiques de référence cartographiés : base du Tertiaire, base du Malm, sommet du Lias et base du Mésozoïque. Du côté oriental du synclinal de Fribourg, la série de couches mésozoïques est bombée par un coussin d'évaporites du Trias moyen. (source : [122])	242
Figure 3.5-31 :	Section sismique au nord de la ville de Fribourg, entre les forages de Fendringen-1 et Courtion-1 (correspond au « profil B-B » de l'interprétation de BuG1990). (source : [122])	243
Figure 3.5-32 :	Section sismique (regroupée) de direction E-W à env. 3 km au sud du site de l'EKKM. Dans cette section, la faille « régionale » figurée selon BuG1990 à env. 5.5 km à l'ouest du site n'est plus visible (voir Figure 3.5-33). On peut exclure qu'un lien existe entre le chevauchement à vergence est au nord (voir figure Figure 3.5-34) et la faille normale réactivée par compression au sud (figure Figure 3.5-31), notamment parce que la nature et le sens du déplacement des failles sont complètement différents. Les failles locales figurées à l'est et à l'ouest du site sont insignifiantes. Elles ne peuvent pas être corrélées sur plusieurs lignes et n'apparaissent ainsi que comme symboles dans les cartes des horizons sismiques (voir figure Figure 3.5-39). Aucune faille ni autre complication n'est repérable sous le site. (source : [122])	244
Figure 3.5-33 :	Interprétation des données de sismique réflexion de la partie occidentale du bassin molassique par BuG1990. La figure du bas est un extrait de la carte des lignes de profondeur au niveau du sommet du Jurassique (env. base du Tertiaire). Elle montre les intersections entre les sections sismiques et la faille N-S postulée selon BuG1990 à env. 6 km à l'ouest de l'EKKM. L'emplacement de la faille sur les sections sismiques est à chaque fois indiqué par un numéro CMP (Common-Mid-Point).	245
Figure 3.5-34 :	Section à env. 5 km au nord-est du site de l'EKKM. La faille « régionale » selon BuG1990 est représentée ici comme faille inverse à vergence ouest.(source : [122])	246

Figure 3.5-35 :	Section sismique orientée NO-SE à env. 5 km au nord-est du site de l'EKKM (source : [122]).....	247
Figure 3.5-36 :	Section sismique orientée SO-NE à env. 2 km au sud-ouest du site de l'EKKM (source : [122]).....	247
Figure 3.5-37 :	Section sismique orientée NW-SE à env. 2 km au sud-ouest du site de l'EKKM (source : [122]).....	248
Figure 3.5-38 :	Interprétation d'une section de la ligne 75BE04 (W9) (tiré de [121], page 70, fig. 8-11). Selon les auteurs, la faille normale limite un fossé permo-carbonifère (« halfgraben ») dans le soubassement rocheux. Une continuation <i>directe</i> (figurée en rouge) de la faille jusque dans le socle semble cependant problématique. Pour cela, elle devrait traverser les réflexions (figurées en jaune) du soubassement rocheux, ce qui peut être exclu.....	249
Figure 3.5-39 :	Carte des isohypses de la base du Tertiaire. Outre les lignes de profondeur, la carte montre le modèle de failles à la limite Mésozoïque/Tertiaire. On voit nettement que la structure de Fribourg, en forme de fossé, ne s'étend pas beaucoup plus au nord qu'une ligne allant de l'extrémité orientale du lac de Morat jusqu'à Laupen. Les failles locales que l'on discerne sur la ligne FR.N-74001 – BE7506 (voir figure Figure 3.5-32) au sud de la région du site, ne peuvent pas être corrélées sur plusieurs lignes et sont signalées par des symboles sur la carte.	250
Figure 3.5-40 :	Activité sismique dans la région de la zone de Fribourg. Les épacentres du catalogue des séismes sont représentés par des cercles dont la surface correspond à la magnitude M_w . Le catalogue comprend les données instrumentales (cercles pleins) et historiques (cercles vides).....	251
Figure 3.5-41 :	Détails du modèle de faille au niveau de la base du Tertiaire dans les environs immédiats du site de l'EKKM	252
Figure 3.6-1 :	Proportion par rapport au taux de chute total, en fonction des catégories de poids	286
Figure 3.6-2 :	Proportion par rapport au taux de chute total, avions de la catégorie de poids > 5.7 t.....	287
Figure 3.7-1 :	Topologie du réseau en 2015 représentant les lignes 380 kV (en rouge) et 220 kV (en vert) partant de Mühleberg	297
Figure 3.7-2 :	Schéma de la sous-station de Mühleberg Est (SSt Est) planifiée, des barres 380 et 220 kV et du transformateur intermédiaire. Il est possible d'installer un deuxième transformateur	298
Figure 3.7-3 :	Schéma de distribution de la SSt Est planifiée à partir de la topologie du réseau en 2015, tous niveaux de tension représentés. Sont indiquées les lignes d'alimentation de la centrale hydroélectrique existante destinées à répondre aux besoins propres (BP KKM A/B) de la centrale KKM existante	

	ainsi que son alimentation (KKM a/b) et l'alimentation pour besoins propres (BP KKM a/b). Deux travées 380 kV sont réservés à l'évacuation de l'énergie produite par la centrale EKKM (EKKMa et EKKMb). Deux travées de 132 kV ont été prévues pour l'alimentation électrique de la centrale EKKM destinée à couvrir ses besoins propres (BP EKKMa, BP EKKMb). La place nécessaire et les sorties sont prévues. Les autres cas de défaillance d'une ligne 220 kV s'avèrent non critiques puisque les lignes 380 kV fonctionnent.	299
Figure 3.7-4 :	Topologie du réseau en décembre 2008 avec les niveaux de tension de 380, 220, 132 et 50 kV. Le réseau 132 kV apparaît en vert. La procédure d'autorisation pour une ligne 220 kV supplémentaire de Mühleberg à Wattenwil est en cours ; cette ligne servira principalement à améliorer le raccordement des centrales hydroélectriques de l'Oberhasli au réseau haute tension.	300
Figure 3.7-5 :	Topologie du réseau en 2008 avec les lignes 220 kV (en vert) partant de Mühleberg	301
Figure 3.7-6 :	Évolution de la tension à Mühleberg Ouest 220 kV (barre collectrice 1) pour les trois dernières années (de fin novembre 2005 à fin août 2008)	301
Figure 3.7-7 :	Statistiques de tension de Mühleberg Ouest 220 kV (sur les trois dernières années) avec représentation de la fréquence en fonction de la tension	302
Figure 3.7-8 :	Statistiques de tension de Mühleberg Est 132 kV (depuis la mise en service). La tension est relativement stable entre env. 140 et 143 kV. La prise du transformateur 220/132 kV règle la tension.....	302
Figure 5.7-1 :	Portée des FOH.....	329
Figure 5.7-2 :	Thèmes FOH pour la phase d'étude et de conception	331
Figure 5.9-1 :	Étapes de la démarche FOH pour la phase d'étude.....	333
Figure 5.9-2 :	Organigramme des études d'avant projet.....	335
Figure 5.9-3 :	Organigramme de la procédure itérative FOH pour la supervision de la phase d'études	337
Figure 5.9-4 :	Évaluation FOH de la conception de l'installation	340
Figure 5.10-1 :	Étapes de la démarche FOH dans la construction.....	342
Figure 5.11-1 :	Étapes de la démarche FOH durant l'exploitation	346
Figure 5.12-1 :	Étapes et études de la démarche FOH durant la désaffectation.....	348

Glossaire des figures

Fig. 2.3-4

allemand	français
Abluftkamin	Cheminée d'évacuation
Reaktorgebäude	Bâtiment du réacteur
Hybridkühlturm	Tour de refroidissement hybride
Maschinenhaus	Bâtiment des machines

Fig. 2.3-5

allemand	français
Kühlturm	Tour de refroidissement
Maschinenhaus	Bâtiment des machines
Reaktorgebäude	Bâtiment du réacteur
Lagergebäude für schwach-und mittelaktive Betriebsabfälle	Entrepôt des déchets d'exploitation de faible ou moyenne activité
Lagergebäude für Hochaktive Abfälle	Entrepôt des déchets de haute activité
Unterstation UST Ost	Sous-station Est

Fig. 2.3-4

allemand	français
Kühlturm	Tour de refroidissement
Maschinenhaus	Bâtiment des machines
Reaktorgebäude	Bâtiment du réacteur
Lagergebäude für schwach- und mittelaktive Betriebsabfälle	Entrepôt des déchets d'exploitation de faible ou moyenne activité
Lagergebäude für hochaktive Abfälle	Entrepôt des déchets de haute activité
Unterstation UST Ost	Sous-station Est

Fig. 2.3-7

allemand	français
Barackendorf	Village de baraques
Tabuflächen	Surfaces tabou
Temporäre Fläche/Installationsfläche am Baufeld	Surface temporaire / Installations de chantier sur le site de la construction
Externer Logistikplatz	Place de logistique externe
Neu zu erstellende Erschliessung	Desserte à créer
Temporäre Erschliessung/Baupisten	Desserte temporaire / pistes de chantier
Bestehende Erschliessung KKM	Desserte existante KKM
Erschliessung auf bestehendem Strassennetz	Desserte par le réseau routier existant
Optionaler Umschlagplatz	Variante pour la place de manutention

Fig. 2.4-1

allemand	français
Verdunstungsverlust	Pertes d'eau dues à l'évaporation
Wasserrückgabe	Réintroduction de l'eau dans l'Aar
Zusatzwasser	Apport d'eau de l'Aar
Maschinenkondensator (3000 MW Wärmelast)	Condenseur machine (charge thermique : 3000 MW)
Aare	Aar
Nebenkühlstellen des Maschinenhauses	Points de refroidissement annexes du bâtiment des machines

Fig. 2.4-2

allemand	français
Maschinennebenhauskühlstelle	Point de refroidissement annexe du bâtiment des machines
Hauptkühlung	Refroidissement du réacteur
Reaktoranlagekühlstelle	Point de refroidissement du réacteur
Nebenkühlung	Refroidissement annexe
Durchlaufkühlung	Refroidissement en circuit ouvert
Zellkühltürme	Tours de refroidissement cellulaires
Nass	Humide
Hybrid	Hybride
Aare	Aar

Fig. 2.4-3

allemand	français
Temperatur der Aare flussaufwärts von KKM	Température de l'Aar en amont de la KKM

Fig. 3.1-1

allemand	français
3 km Umkreis 10 km Umkreis 20 km Umkreis	Rayon de 3 km Rayon de 10 km Rayon de 20 km

Fig. 3.2-1

allemand	français
EKKM : Übersichtsplan industrielle Gefährdungen	EKKM: vue d'ensemble des risques industriels
Erdgashochdruckleitung 16"/70 bar	Conduite de gaz naturel à haute pression de 16"/70 bar
Letalitätsradius R ₁ Feuerball Personen im Freien infolge Hitzestrahlung (gem. Rahmenbericht 97)	Rayon de mortalité R ₁ de la boule de feu pour personnes à l'air libre dû au rayonnement de chaleur (selon rapport-cadre 97)

Fig. 3.2-2

allemand	français
Spontane Freisetzung	Libération spontanée
Hohe, Windparallele Wand	Élévation, paroi parallèle au vent
Ebenes Gelände	Terrain plat
Zünddistanz (m)	Distance d'allumage (m)
Menge (t)	Quantité (t)

Fig. 3.3-4

allemand	français
Wiederkehrende Böenspitze	Pointe de rafales
Konfidenzgrenzen	Limites de confiance
Empirische Werte	Valeurs empiriques
Jahre	Années

Fig. 3.3-5

allemand	français
Windrose Meteomast	Rose des vents mâât météo
Richtstrahlmast Stockeren	Mât à faisceau Stockeren

Fig. 3.3-6

allemand	français
Windrose Tag Meteomast	Rose des vents mâât météo (jour)
Windrose Nacht Meteomast	Rose des vents mâât météo (nuit)
Richtstrahlmast	Mât à faisceau

Fig. 3.3-8

allemand	français
Ganzjahres Verteilung relative Feuchte	Répartition annuelle de l'humidité relative
Normierte Verteilung	Répartition normée
Relative Feuchte	Humidité relative

Fig. 3.3-9

allemand	français
Tageszeitabhängigkeit der Vereisungsgefahr	Dépendance horaire du danger de givrage
Normierte Häufigkeit	Fréquence normée
Tageszeit (h)	Heure de la journée (h)

Fig. 3.3-10

allemand	français
GEV stündliche Regenmenge	GEV Quantité de précipitations à l'heure
Regenmenge pro Stunde	Quantité de précipitations à l'heure
Histogramm	Histogramme

Fig. 3.3-11

allemand	français
Regenmenge pro Tag	Quantité de précipitations journalières
Histogramm	Histogramme

Fig. 3.3-12

allemand	français
Wiederkehrperioden 1-Tagessumme	Périodes répétitives de la somme journalière
Konfidenzgrenzen	Intervalle de confiance
Empirische Werte	Valeurs empiriques
Jahre	Années

Fig. 3.3-13

allemand	français
Jährlich höchste Niederschlags-Tagessumme 1864-2006	Plus hautes valeurs annuelles de la quantité de précipitations journalière 1864-2006
Niederschlag (mm)	Précipitations (mm)
50-jähriges Ereignis	Evènement tous les 50 ans

Fig. 3.3-14

allemand	français
Jährlich höchste Gesamtschneehöhe	Plus grand amoncellement annuel de neige
Schneehöhe (cm)	Hauteur de neige (cm)
Jahr	Année

Fig. 3.3-15

allemand	français
Mittlere jährliche Blitzdichteverteilung	Répartition de la densité des éclairs annuelle moyenne
Anzahl Erdblitzes pro km ²	Nombre d'éclairs au sol par km ²

Fig. 3.3-16

allemand	français
Mittlere Temperatur 1864-2007	température moyenne 1864-2007
Jahresmittel	Moyenne annuelle
Gleitendes Mittel (15-Jahre)	Moyenne mobile (15 années)
Temperatur	Température
Jahr	Année

Fig. 3.3-17

allemand	français
Jährlicher Niederschlag 1864-2007	Précipitations annuelles 1864-2007
Jahressumme	Quantité annuelle
Gleitendes Mittel (15-Jahre)	Moyenne mobile (15 années)
Temperatur	Température
Jahr	Année

Fig. 3.4-1

allemand	français
Niederriedsee	Lac de Niederried
Saane-Mündung	Confluent de la Sarine
Wasserkraftwerk Mühleberg	Centrale hydroélectrique de Mühleberg
Wohlensee	Lac de Wohlen
Schaltanlage Ost	Poste de couplage Est

Fig. 3.4-2

allemand	français
Wiederkehrperiode (Jahre)	Périodes de retour (années)
Mittelwert	Valeur moyenne
Perzentil	Percentile
Pegel am KKM (m ü.M.)	Niveau à la KKM (m ALS)

Fig. 3.4-3

allemand	français
Wasserspiegelkote (m ü. M.)	Cotes de niveaux d'eau (m ASL)

Fig. 3.4-5

allemand	français
Pegel (m ü. M.)	Niveau (m ASL)
Mit Terrasse	Avec terrasse
Ohne Terrasse	Sans terrasse

Zeit nach Bruch in s	Temps après rupture en s
----------------------	--------------------------

Fig. 3.4-6

allemand	français
Kote in m ü. M.	Cotes en m ASL
Zeit nach Bruch Schiffenen in s	Temps en secondes après la rupture totale du barrage de Schiffenen

Fig. 3.4-7

allemand	français
Kote in m ü. M.	Cotes en m ASL
Zeit nach Bruch Rossens in s	Temps en secondes après la rupture totale du barrage de Rossens

Fig. 3.4-8

allemand	français
Abfluss in m3/s	Débit en m3/s
Jährlichkeit in Jahren	Annualité en années

Fig. 3.5-4

allemand	français
Hebung	Soulèvement
Senkung	Affaissement
Mittlerer Fehler (Einfache Standard-abweichung)	Erreur moyenne (écart-type simple)
Referenzpunkt Laufenburg	Point de référence Laufenburg
Rezente vertikale Krustenbewegungen in der Schweiz.	Mouvements verticaux récents de la croûte en Suisse
Geologisch-tektonische Übersichtskarte vereinfacht nach Swisstopo (2005).	Carte géologique et tectonique synoptique simplifiée d'après Swisstopo (2005)
Rote und blaue Balken zeigen die rezenten Hebungs- bzw. Senkungsraten relativ zu einem Referenzpunkt bei Laufenburg. Die Werte basieren auf wiederholten Präzisionsnivellement-Messungen aus dem	Les barres rouges et bleues montrent les taux de soulèvement et d'affaissement relatifs à un point de référence près de Laufenburg. Les valeurs sont basées sur des mesures de nivellement de précision répétées entre 1896

Zeitraum zwischen 1896 und 2006 (Daten der Nordostschweiz nach Schlatter 2007, übriges Gebiet nach Schlatter 2006).	et 2006 (données pour la Suisse orientale d'après Schlatter 2007, autres régions d'après Schlatter 2006).
---	---

Fig. 3.5-5

allemand	français
Erbebenkatalog ECOS	Catalogue des séismes ECOS
Tektonische Einheiten	Unités tectoniques
ca. 1000 – 1974: Makroseismisch Magnitude M_w	Vers 1000 à 1974: Macrosismique Magnitude M_w
1975 – 2007: Instrumentell Magnitude M_w	1975 – 2007: Instrumental Magnitude M_w
Tektonische Einheiten	Unités tectoniques
Vogesen- und Schwarzwald-Massiv	Massifs des Vosges et de la Forêt-Noire
Mittelländische Molasse, Tertiär der Oberrheingrabens und des Po-Beckens	Molasse du Plateau, Tertiaire du graben du Haut-Rhin (ORG) et du bassin du Pô
Subalpine Molasse	Molasse subalpine
Tafeljura	Jura tabulaire
Faltenjura	Jura plissé
Helvetische Sedimentdecken	Couverture sédimentaire helvétique
Externmassive	Massifs externes
Penninische Sedimentdecken (inkl. Sesia-Zone)	Couverture sédimentaire pennique (zone Sesia incluse)
Penninische Kristallindecken	Nappes cristallines penniques
Ostalpine Sedimentdecken	Couverture sédimentaire des Alpes orientales
Ostalpine Kristallindecken	Nappes cristallines des Alpes orientales
Südalpin, Kristallin	Cristallin sudalpin
Südalpin, Sedimente	Sédiments sudalpins
Tertiäre Intrusiva (Bergell und Adamello)	Intrusions du Tertiaire (Bregaglia et Adamello)
Tertiäre Ergussgesteine (Hegau)	Roches éruptives du Tertiaire (Hegau)

Hypozentrum-Daten vorhanden	Données existantes sur l'hypocentre
NNW	NNO
Schwarzwald	Forêt-Noire
Helvetikum	Helvétique
Externmassive	Massifs externes
Penninikum	Pennique
Südalpin	Sudalpin
Rhein	Rhin
Europäische Oberkruste	Croûte européenne supérieure
Aar-Massiv	Massif de l'Aar
Adriatische Oberkruste	Croûte adriatique supérieure
Adr. Unterkruste	Croûte adriatique inférieure
Europäischer Mantel	Manteau européen
Europäische Unterkruste	Croûte européenne inférieure
Adriatischer Mantel	Manteau adriatique
Erdbeben 1975 – 2007: Magnitude M_I	Séismes 1975 – 2007: Magnitude M_I
Molasse, Tertiär des Oberrheingrabens	Molasse, Tertiaire du graben du Haut-Rhin
Autochthones Mesozoikum	Mésozoïque autochtone
Permokarbontröge	Fossés permo-carbonifères
Helvetische Sedimentdecken	Couverture sédimentaire helvétique
Externmassive (Aar & Gotthard)	Massifs externes (Aar & Gothard)
Spät- / post-variskische Granite	Granites varisques tardifs et post-varisques
Penninische Sedimentdecken	Couverture sédimentaire pennique
Pennische Kristallindecken	Nappes cristallines penniques
Ostalpine Decken (Sesia-Zone)	Couverture des Alpes orientales (zone Sesia)
Südalpines Tertiär	Tertiaire du sudalpin
Südalpines Mesozoikum	Mésozoïque sudalpin

Fig. 3.5-6

allemand	français
Historische Erdbeben, (Mw)	Séismes historiques (Mw)
Instrumentelle Erdbeben (Mw)	Séismes instrumentaux (Mw)
Störungen	Failles
Beobachtete Über-/Aufschiebungen	Chevauchements / failles inverses observés
Historische Erdbeben, (Mw)	Séismes historiques (Mw)
Instrumentelle Erdbeben (Mw)	Séismes instrumentaux (Mw)
Störungen	Failles
Beobachtete Über-/Aufschiebungen	Chevauchements / failles inverses observés
Vermutete Über-/Aufschiebungen	Chevauchements / failles inverses supposés
Blattverschiebungen	Décrochements
Beobachtete Abschiebungen	Failles normales observées
Vermutete Abschiebungen	Failles normales supposées
Beobachtete Atörungen (ohne Angaben eines Verschiebungssinns)	Failles observées (sans indication d'un sens de déplacement)
Vermutete Störungen (ohne Angaben eines Verschiebungssinns)	Failles supposées (sans indication d'un sens de déplacement)

Fig. 3.5-8

allemand	français
Abscherhorizonte und Scherflächen	Horizons et surfaces de cisaillement

Fig. 3.5-9

allemand	français
Überschwemmungsebene (U)	Plaine d'inondation (U)
Rinnengürtel (RG)	Lits de méandres (RG)
Uferwälle (UW)	Levées naturelles (UW)
Durchbruchsfächer und -rinnen (DF und DR)	Dépôts et chenaux de crevasses (DF et DR)

Fig. 3.5-12

allemand	français
Deckschicht /künstliche Auffüllungen	Couche de couverture / Remplissage artificiel
Junge Anschwemmungen der Aare	Alluvions récentes de l'Aar
Gehängelehm	Limons de pente
Moräne	Moraine
Rinnenschotter	Débris de chenaux
Untere Süßwassermolasse (USM)	Molasse d'eau douce inférieure (USM)
projiziert	projeté

Fig. 3.5-13

allemand	français
Deckschicht /künstliche Auffüllungen	Couche de couverture / Remplissage artificiel
Junge Anschwemmungen der Aare	Alluvions récentes de l'Aar
Gehängelehm	Limons de pente
Moräne	Moraine
Rinnenschotter	Débris de chenaux
Untere Süßwassermolasse (USM)	Molasse d'eau douce inférieure (USM)
projiziert	projeté

Fig. 3.5-18

allemand	français
25 km Radius um Muehleberg	Rayon de 25 km autour de Mühleberg
Historische Erdbeben (Mw)	Séismes historiques (Mw)
Instrumentelle Erdbeben (Mw)	Séismes instrumentaux (Mw)
Herdflächenlösungen	Mécanismes au foyer
Inversion der Herdfl. lösungen	Inversion des mécanismes au foyer
Störungen	Failles
Beobachtete Über / Aufschiebung	Chevauchement / faille inverse observé(e)
Vermutete Über / Aufschiebung	Chevauchement / faille inverse supposé(e)

Blattverschiebung	Décrochement
Beobachtete Abschiebung	Faille normale observée
Vermutete Abschiebung	Faille normale supposée
Beobachtete Störung	Faille observée
Vermutete Störung	Faille supposée

Fig. 3.5-22

allemand	français
Scherwellengeschwindigkeit [m/s]	Vitesse des ondes de cisaillement [m/s]
Tiefe [m]	Profondeur [m]
PEGASOS Modell – KKM Input für Berechnungen	Modèle de PEGASOS – Input pour les calculs KKM
Downhole Messungen EKKM	Mesures down-hole EKKM
EKKM Input für Amplifikationsberechnungen	Input EKKM pour les calculs d'amplification

Fig. 3.5-31

allemand	français
Position der von Berger & Grundlach (1990) postulierten Störung	Emplacement de la faille postulée par Berger et Gundlach (1990)

Fig. 3.5-32

allemand	français
Position der von Berger & Grundlach (1990) postulierten Störung	Emplacement de la faille postulée par Berger et Gundlach (1990)

Fig. 3.5-34

allemand	français
Position der von Berger & Grundlach (1990) postulierten Störung	Emplacement de la faille postulée par Berger et Gundlach (1990)

Fig. 3.5-36

allemand	français
Position der von Berger & Grundlach (1990) postulierten Störung	Emplacement de la faille postulée par Berger et Gundlach (1990)

Fig. 3.5-39/40

allemand	français
Kilometer	kilomètre

Fig. 3.6-1

allemand	français
Anteil gesamte Absturzrate Flugzeuge > 5.7 t	Proportion par rapport au taux de chute total des avions > 5,7 t
Militärflugzeuge	Avions militaires
Leichtflugzeuge	Avions légers
Mittlere Flugzeuge	Avions de taille moyenne
Grossflugzeuge	Gros porteurs

Fig. 3.6-2

allemand	français
Anteil gesamte Absturzrate Flugzeuge > 5.7 t	Proportion par rapport au taux de chute total des avions > 5,7 t
Zivil Start und Landung	Civil, décollage et atterrissage
Zivil Transit	Civil, vol de croisière
Militär Start und Landung	Militaire, décollage et atterrissage
Militär Transit	Militaire, vol de croisière

Fig. 3.7-2

allemand	français
Felder	travées
800-1000 MVA mit Längs- und Querregelung neu	800-1000 MVA avec nouveau réglage en phase et en quadrature

Fig. 3.7-3

allemand	français
800-1200 MVA (1 oder 2 Stk.)	800 – 1200 MVA (1 ou 2)
Anfahrtrafo	Transformateur de démarrage

Fig. 3.7-7

allemand	français
Mittelwert	Valeur moyenne
Median (MED)	Médiane (MED)
Standard (STD)	Standard (STD)
Anzahl (CNT)	Nombre (CNT)



Resun AG, société de planification commune aux sociétés Axpo-Konzerngesellschaften Nordostschweizerische Kraftwerke AG et Centralschweizerische Kraftwerke AG ainsi qu'à BKW FMB Energie AG.

- 1 **Rapport de sécurité**
- 2 Rapport de sûreté
- 3 Rapport d'impact sur l'environnement
- 4 Rapport relatif à la concordance avec l'aménagement du territoire
- 5 Concept de désaffectation
- 6 Justificatif de l'évacuation des déchets radioactifs