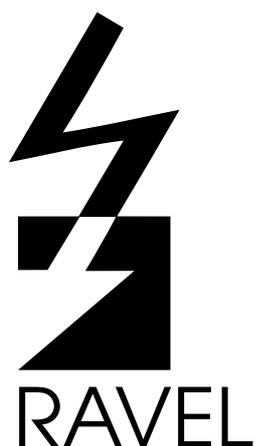


L'épargne énergétique dans les services d'approvisionnement en eau



L'épargne énergétique dans les services d'approvisionnement en eau

Chaque réseau d'adduction en eau potable a ses caractéristiques. Parfois il faut pomper l'eau pour surmonter des différences d'altitude importantes ; dans d'autres cas le service dispose d'eau de source qui coule dans les réservoirs sans pompage. Le captage d'eau de surface demande toujours un traitement laborieux tandis que l'eau de source peut souvent être utilisée sans être traitée. Ces différentes caractéristiques influencent fortement la consommation d'électricité et rendent impossible une comparaison pure et simple de l'énergie consommée par m³. Pour cette raison le programme RAVEL a mis au point deux nouveaux indices :

- l'indice de structure montre dans quelle mesure la situation topographique, surtout la différence d'altitude entre les points de captage et les utilisateurs, conditionne la consommation d'électricité;
- l'indice de qualité indique si les installations (stations de pompage, conduites, réservoirs) du réseau d'adduction sont conçues et travaillent d'une façon performante. L'indice de qualité compare la consommation effective avec le minimum d'énergie nécessaire.

A l'aide de ces indicateurs votre ingénieur vous fera rapidement et avec peu d'argent une analyse préliminaire de votre service. Vous pourrez ainsi apprendre si vous pouvez épargner de l'électricité et de l'argent.

L'épargne énergétique dans les services d'approvisionnement en eau



Programme d'impulsions RAVEL
Office fédéral des questions conjoncturelles

Editeur

Office fédéral des questions conjoncturelles (OFQC), 3003 Berne

Direction

RAVEL, c/o Amstein + Walthert AG, Zurich

Chef du projet

Daniel Spreng, Analyses énergétiques, ETHZ, Zurich

Auteur

Tiziano Pelli, BMP Dr Pelli & Co, Zurich

Commission d'accompagnement

- Prof. Dr D. Spreng, Analyses énergétiques, ETHZ, Zurich
- Prof. Dr W. Gujet, Institut d'hydraulique et d'économie des eaux, ETHZ, Zurich
- U. Kamm, dipl. ing. ETH, SVGW, Zurich
- F. Bonoli, dipl. ing. ETH, Service des eaux, Lugano
- J. Nipkow, dipl. ing. ETH, ARENA, Zurich
- D. Rosemayr, dipl. Ing., ABB Netcom AG, Turgi

Traduction

- Tiziano Pelli, Zurich
- Charles Weinmann, Echallens

Associations de soutien

SSIGE Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux

SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes

UTS Union technique suisse

SDESR Société des distributeurs d'eau de Suisse romande

Mise en pages et photocomposition

- DAC, Lausanne
- City Comp SA, Morges

Cette étude appartient à l'ensemble des projets d'études effectués par des tiers dans le cadre du programme d'impulsion RAVEL. L'Office fédéral des questions conjoncturelles et la Direction du programme autorisent la publication de ce rapport, sous la responsabilité de l'auteur et du chef du domaine concerné.

ISBN 3-905233-87-8

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, décembre 1996. Reproduction autorisée avec mention de la source. Commande auprès de l'Office central fédéral des imprimés et du matériel, Berne (N° de commande 724.394 f).

Form. 724.394 f 01.97 500 U35647

Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le programme d'action «Construction et Energie» se compose des trois programmes d'impulsions suivants :

PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions

RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité

PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Leur but est de favoriser une croissance économique qualitative. Dans ce sens ils doivent conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Le programme RAVEL cherche principalement à améliorer la compétence des professionnels à utiliser l'énergie électrique à bon escient. Outre les aspects de la sécurité et de la production, qui étaient prioritaires jusqu'ici, il est aujourd'hui indispensable de s'intéresser davantage aux rendements. RAVEL a établi une matrice de consommation qui définit dans leurs grandes lignes les thèmes à traiter. Les procédés utilisés dans l'industrie, le commerce et le secteur tertiaire sont à considérer parallèlement aux utilisations de l'électricité dans les bâtiments. Dans ce contexte, les groupes-cibles concernés sont les spécialistes de tous les niveaux de formation et les décideurs qui doivent gérer les investissements en matière d'équipements et de procédés.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Les objectifs de RAVEL sont poursuivis par des projets de recherche et de diffusion des connaissances de base, par des cycles de formation et de perfectionnement, ainsi que par l'information. Le transfert des nouvelles connaissances est orienté vers une mise en pratique dans le travail quotidien. Il repose principalement sur des publications, des cours et des réunions. Une journée d'information annuelle RAVEL permet de présenter et de discuter des nouveaux résultats, développements et tendances de cette discipline fascinante qu'est l'utilisation rationnelle de l'électricité. Les personnes intéressées trouveront dans le bulletin «Construction et Energie» de plus amples informations sur le vaste éventail des possibilités en matière de formation continue offertes aux groupes-cibles. Ce bulletin paraît trois fois l'an et peut être obtenu gratuitement en s'adressant à la Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie», EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne. En outre, chaque participant à un cours, ou autre manifestation du programme, reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être

obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie», EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles, ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend également des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités proposées. Pour la préparation de ces activités, une direction de projet a été mise en place; elle se compose du Dr Roland Walthert, de M. Werner Böhi, du Dr Eric Bush, de MM. Jean-Marc Chuard, Hans-Ruedi Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, du Dr Daniel Spreng, de M. Felix Walter, du Dr Charles Weinmann et de M. Eric Mosimann. Une très large part des activités est confiée à des groupes de travail qui sont responsables du contenu, de même que du maintien des coûts et des délais.

Documentation

La présente documentation traite des principaux aspects liés aux consommations d'électricité dans les réseaux d'adduction en eau potable. L'auteur y présente comment exécuter un diagnostic de l'état de santé du réseau et quelles sont les possibilités d'économies de l'eau et de l'énergie.

Le présent document a été soumis à l'appréciation des participants au premier cours pilote, ce qui a permis aux auteurs d'effectuer les modifications nécessaires. Ceux-ci ont toutefois gardé leur liberté d'appréciation pour les questions où les avis divergeaient. Ils assument donc aussi la responsabilité de leurs textes. Des améliorations sont encore possible et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit au directeur du cours, soit directement à l'Office fédéral des questions conjoncturelles.

Pour terminer nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de la présente publication.

Office fédéral des questions conjoncturelles
Service de la technologie
Dr B. Hotz-Hart
Vice-directeur

Table des matières

1.	Résumé	9
2.	Alimentation en eau et en énergie	15
2.1	Généralités	15
2.2	Le calcul de la consommation énergétique	16
2.3	Facteurs déterminants	19
	<i>Eau de source</i>	19
	<i>La consommation d'eau</i>	20
	<i>Pertes</i>	20
	<i>Emplacement des réservoirs</i>	20
	<i>Rendement des installations de pompage</i>	21
	<i>Pertes de charge</i>	21
3.	Indices énergétiques	23
3.1	Considérations préliminaires	23
3.2	Energie minimale	23
3.3	L'indice de structure	25
3.4	Indice de qualité	25
3.5	Exemples	26
	<i>Exemple 1</i>	27
	<i>Exemple 2</i>	28
	<i>Exemple 3</i>	29
	<i>Exemple 4</i>	29
	<i>Exemple 5</i>	30
	<i>Exemple 6</i>	30
3.6	Caractéristiques des deux indices	32
4.	Installations de pompage	33
4.1	Généralités	33
4.2	Le choix du groupe moteur-pompe	34
4.3	Rendements	36
4.4	L'emploi des groupes moteur-pompe dans des systèmes d'approvisionnement en eau	37
	<i>Possibilités</i>	37
	<i>Considérations énergétiques</i>	39
	<i>Avantages et désavantages économiques</i>	39
4.5	Pompes à vitesse variable	40
5.	Pertes	43
5.1	Généralités	43
	5.1.1 <i>Définition</i>	43
	5.1.2 <i>Données quantitatives</i>	44
5.2	Causes des pertes	45
	5.2.1 <i>Ruptures de conduites</i>	45
	5.2.2 <i>La corrosion interne</i>	46
	5.2.3 <i>La corrosion externe</i>	46
	5.2.4 <i>Non étanchéité</i>	47
5.3	Autres facteurs	47

5.4	La détermination des pertes	49
	5.4.1 <i>Calcul des pertes</i>	49
	5.4.2 <i>Débit de nuit</i>	49
5.5	Surveillance du réseau	50
5.6	Recherche des fuites	50
	5.6.1 <i>Façon de procéder</i>	50
	5.6.2 <i>Prélocalisation</i>	51
	5.6.3 <i>Localisation</i>	51
	Repérage acoustique	51
	L'élaboration de signaux électro-acoustiques	53
	La méthode de corrélation	53
	Mesures de pression	54
6.	Données à relever et leur traitement	55
6.1	Données à relever	55
	<i>Quantités captées et consommation</i>	55
	<i>Autres données</i>	56
	<i>Traitement des données</i>	56
	<i>Remarque</i>	57
6.2	Le minimum d'information nécessaire	57
6.3	L'utilisation d'acquisiteurs de données (data loggers)	58
	<i>Acquisiteurs sans mémoire externe</i>	58
	<i>Acquisiteurs avec mémoire externe</i>	58
	<i>Centrale des données</i>	58
6.4	Les données à relever, leur préparation et leur traitement dans un Service des eaux important et moderne	59
7.	L'analyse énergétique d'un réseau d'adduction	61
7.1	Procédé	61
7.2	Description du service d'alimentation en eau de Lugano-Massagno	61
7.3	Captages, réservoirs et distribution	62
7.4	Utilisation de l'eau et pertes	64
7.5	La consommation d'électricité	64
7.6	Indices énergétiques	66
	E_{min}	66
	$I1$	68
	$I2$	68
7.7	Facteurs déterminants	68
	<i>Réservoirs</i>	68
	<i>Conduites d'adduction aux réservoirs</i>	69
	<i>Pompes</i>	69
	<i>Pertes</i>	70
7.8	Mesures d'économie énergétique	71
7.9	La production d'électricité	71
7.10	Alimentation des réservoirs pendant la nuit	72
8.	Analyse de quelques exemples et interprétation des résultats	75
8.1	Buts de l'analyse	75

8.2	Données	75
8.3	Les indices énergétiques	76
8.4	Amélioration de la gestion énergétique	78
	<i>Economiser de l'énergie</i>	78
	<i>Production d'électricité</i>	78
	<i>Consommation de l'électricité pendant la nuit</i>	79
	<i>Calculs de rentabilité</i>	79
8.5	Procédé à suivre	80
9.	Références	83
	Publications du programmes d'impulsions	
	RAVEL	85

1. RÉSUMÉ

43 % de l'eau potable est produite en Suisse à partir de nappes souterraines, 38 % provient de sources et 19 % des eaux de surface. Pour pomper l'eau jusqu'aux utilisateurs, aux réservoirs ou aux stations de traitement, on utilise généralement de l'électricité dont la consommation dépend directement de la différence de niveau entre l'endroit où l'eau est captée et celui où elle est consommée. Il n'y a pas de consommation d'électricité si la commune dispose de sources dont la hauteur permet d'alimenter les utilisateurs avec une pression suffisante en utilisant la force de gravité.

Des relevés statistiques montrent (voir chapitre 2) qu'en Suisse les réseaux de distribution d'eau potable consomment à peu près 420 Mio de kWh par an. Cela correspond à environ 1 % de la consommation totale d'énergie électrique. Cette valeur augmente considérablement si l'on considère la consommation des réseaux d'adduction privés pour des systèmes de chauffage, de refroidissement, de lavage, d'irrigation ou autres.

Dans de nombreuses communes les Services des eaux sont le plus grand consommateur public d'électricité.

Les résultats des études présentées dans cette publication (études effectuées dans le cadre du programme national RAVEL) montrent de quelle façon on peut épargner de l'énergie dans les réseaux d'adduction d'eau. Ce sujet est traité assez rarement dans les milieux techniques intéressés. On prête généralement plus d'attention au problème de l'optimisation du pompage pour utiliser au maximum l'électricité pendant la nuit quand les tarifs sont les plus bas. Cela permet aux Services des eaux d'épargner de l'argent avec des investissements en général assez modestes. Même si ce cahier ne s'occupe que des aspects énergétiques, la plupart des questions examinées touchent des thèmes d'intérêt général (fonctionnement des pompes, pertes dans les réseaux, mesures, élaboration de données et réglages).

La lecture de cette publication exige au préalable des connaissances au niveau de celles acquises dans une école d'ingénieurs.

Le début du 2^e chapitre est consacré à une brève répétition des notions de base, nécessaires au calcul de l'énergie consommée par le pompage de l'eau. L'énergie demandée par une ligne de pompage est exprimée comme produit de facteurs appelés «facteurs déterminants». Le calcul de l'énergie consommée (quand les facteurs déterminants sont connus) est illustré à l'aide d'un exemple. La dernière partie du chapitre est consacrée à une discussion sur l'importance des différents facteurs en fonction des conditions d'exploitation.

Notions de base

Pour l'examen préliminaire de la consommation énergétique d'un bâtiment on utilise aujourd'hui l'indice énergétique du bâtiment qui

est défini comme le quotient entre l'énergie consommée et la surface chauffée. Il serait souhaitable de pouvoir disposer d'un indice analogue pour les réseaux d'adduction d'eau.

La consommation énergétique d'un bâtiment dépend essentiellement d'une seule grandeur principale, indépendante de la qualité énergétique de la construction : la surface chauffée. En faisant le rapport entre la consommation énergétique et cette grandeur on établit un indice qui reflète bien la qualité énergétique d'une construction. La situation dans un réseau d'adduction d'eau est plus compliquée parce que sa consommation énergétique est fortement liée à plusieurs facteurs indépendants de sa qualité énergétique comme la quantité d'eau pompée et la différence d'altitude entre la consommation et le captage.

Dans le chapitre 3 sont définis deux indices qui reflètent la qualité énergétique d'un réseau d'alimentation en eau et permettent d'estimer rapidement mais d'une façon grossière les possibilités d'épargne énergétique. Le premier exprime surtout l'influence de la structure d'un réseau sur sa consommation d'énergie, indépendamment de la qualité des installations. Nous l'avons appelé **indice de structure**. Le second par contre reflète la qualité énergétique des installations, nous l'avons donc appelé **indice de qualité**.

Indice de structure

Pour définir ces indices nous avons d'abord introduit la notion d'énergie **minimale**, définie comme la quantité minimale d'énergie qui est théoriquement nécessaire (sans aucune perte) pour transporter pendant une année l'eau du captage à l'utilisation et lui fournir une pression de travail normée. L'**indice de structure** est défini comme le quotient entre cette énergie minimale et la quantité annuelle d'eau vendue par les services communaux (ou utilisée par les consommateurs). Cet indice montre dans quelle mesure, d'un point de vue énergétique, l'emplacement des zones de captages est favorable (quand leur altitude est élevée ou défavorable, quand elles se trouvent en basse altitude) par rapport aux surfaces desservies. Plus cet indicateur est élevé et plus importante sera la consommation énergétique. Si pour une zone de pression déterminée l'indice de structure devient négatif, une production d'énergie électrique peut théoriquement être envisagée.

Indice de qualité

Le quotient entre l'énergie de pompage consommée annuellement et l'énergie minimale est défini comme l'**indice de qualité**. Il montre dans quelle mesure les installations utilisées sont énergétiquement performantes.

Caractéristiques des pompes

Le chapitre 4 est consacré aux aspects énergétiques des stations de pompage. La première partie expose les propriétés et en particulier le rendement des pompes centrifuges. Suit une discussion sur les avantages et désavantages énergétiques de leur utilisation dans des réseaux d'adduction d'eau. La dernière partie est consacrée aux pompes à vitesse variable. Des exemples illustrent les cas où leur utilisation est avantageuse.

La première partie du chapitre 5 traite des causes et des facteurs qui influencent les fuites dans les réseaux de distribution. Suit un bref exposé sur les méthodes à utiliser pour déterminer leur ampleur et surveiller leur évolution. La dernière partie est consacrée aux différentes techniques employées aujourd'hui pour découvrir leur emplacement.

Recherche des fuites d'eau

Le 6^e chapitre présente les mesures à effectuer dans un réseau d'alimentation en eau potable en relation avec l'épargne énergétique, pour obtenir entre autres les informations sur les quantités d'eau captées et consommées indispensables à l'exécution d'une analyse énergétique. Une importance particulière doit être attribuée à une élaboration systématique et continue des données recueillies. Une attention particulière est prêtée aux conditions d'exploitation des petits réseaux, pour lesquels on détermine le set minimum de données indispensable pour pouvoir encore exécuter une analyse énergétique. La deuxième partie du chapitre est consacrée à la présentation des différentes possibilités d'enregistrement des données (enregistrement mécanique simple, Data-Logger, cartes à mémoire, transmission par câble ou par téléphone à des centrales) et de leur élaboration.

Acquisition et traitement des données

La procédure utilisée pour effectuer l'analyse énergétique d'un système d'adduction d'eau est illustrée à l'aide de l'exemple de la ville de Lugano (chapitre 7). Dans un premier temps les problèmes rencontrés sont discutés pour obtenir les données nécessaires, entre autres pour le calcul des indices énergétiques. On analyse ensuite les facteurs d'influence et leur impact sur la consommation énergétique, puis on formule les mesures d'épargne énergétique et les mesures pour déplacer une partie de la consommation pendant la période nocturne, permettant aux services communaux d'épargner de l'argent.

Etude du cas de Lugano-Massagno

Les indices définis au troisième chapitre ont été testés à l'aide des données des Services des eaux de plusieurs communes dont les possibilités d'épargne énergétique ont été étudiées assez en détail. Les exemples considérés sont de caractère très varié: d'une part un petit village avec très peu de moyens (Sagno au Tessin) et des conditions topographiques très difficiles et d'autre part la ville de Lugano (réseau ouest) avec 25 000 habitants, 30 000 places de travail et 4000 lits d'hôtels. Un des réseaux étudiés est situé en zone de haute montagne et dessert une région très touristique (St. Moritz), un autre se trouve dans une région plate de caractère agrico-industriel (Diepoldsau). A l'exception du réseau d'adduction d'eau industrielle de Lugano (différent de celui examiné au chapitre 7), tous les réseaux considérés fournissent de l'eau potable.

Dans pratiquement tous les exemples étudiés nous avons constatés des possibilités d'épargne énergétique non négligeables, souvent accompagnées de la possibilité d'épargner de l'argent en déplaçant une partie de la consommation dans la période nocturne. Dans le chapitre 8 les résultats obtenus à l'aide de l'analyse des exemples

Exemples divers

considérés sont présentés dans des tableaux comparatifs qui illustrent l'efficacité et les limites des indices introduits au chapitre 3. Nous concluons par les mesures qui peuvent permettre d'épargner de l'énergie dans un service d'alimentation en eau. Nous les résumons brièvement :

Mesure de la consommation et du captage

Pour épargner de l'électricité il est important que les Services des eaux connaissent la quantité d'eau consommée par leurs abonnés pendant une période déterminée (une année par exemple). Il est aussi important que l'abonné paye l'eau en fonction de la quantité qu'il consomme effectivement et pas en fonction de paramètres résidentiels comme le nombre d'habitants du ménage, le nombre de pièces de l'appartement ou la surface habitée. A cette fin chaque desserte doit être munie d'un compteur et la consommation relevée périodiquement. Ce type de facturation favorise l'épargne d'eau et en même temps celle d'électricité. En Suisse les Services des eaux de nombreuses communes n'ont pas encore équipé leur abonnés avec des compteurs et ne connaissent donc pas la consommation effective de leurs abonnés. Dans ce domaine la situation s'améliore rapidement parce qu'aujourd'hui presque toutes les législations cantonales imposent aux services communaux d'installer des compteurs. Pour les Services des eaux il est aussi important de connaître les volumes d'eau captés. Cela n'est souvent pas le cas pour l'eau provenant de sources (surtout dans les communes petites et moyennes). La connaissance de l'ensemble des eaux captées et des quantités livrées aux abonnés permet de déterminer automatiquement le montant des fuites.

Les pertes en eau

Réduire les pertes signifie très souvent épargner de l'énergie, puisque dans la plupart des cas l'eau avant de fuir d'une conduite a été pompée. Pour diminuer les pertes il faut avant tout les connaître, soit en faisant la comparaison entre quantités captées (desquelles on déduira en général l'eau utilisée pour les fontaines, pour le lavage des filtres et des conduites et pour d'autres besoins communaux) et quantités vendues, ou en mesurant les flux nocturnes (entre 02.00 et 04.00) qui sortent d'un réservoir et entrent dans le réseau de distribution. Une telle mesure, effectuée d'une façon plus ou moins continue, permet de surveiller l'évolution des fuites dans le temps et de prendre rapidement des mesures si la situation l'impose. Si le service communal ne dispose pas d'un équipement adéquat pour la recherche des fuites, il peut faire appel aux prestations de nombreuses sociétés privées disposant en général de méthodes de recherche modernes et efficaces.

Pour diminuer la fréquence des ruptures de conduite ou d'apparition de fuites il est indispensable entre autres de remplacer d'une façon constante et méthodique les conduites trop vieilles ou en mauvais état. Il faudra prêter beaucoup d'attention à la pose de nouvelles conduites pour réduire au maximum la fréquence future des ruptures et des cas de corrosion.

Les installations de pompage

Les installations de pompage utilisent la plus grande partie de l'électricité consommée par les Services des eaux. L'amélioration du rendement de ces installations (c'est-à-dire de celui de la pompe et du moteur électrique qui l'entraîne) fait partie de toute politique d'épargne énergétique dans le domaine. Dans certains cas on utilisera avantageusement des pompes à vitesse variable.

La pression dans le réseau

Du point de vue de l'épargne énergétique, la pression dans les réseaux de distribution doit être la plus faible possible, tout en tenant compte des exigences de pression minimale imposées par les différents types d'utilisateurs. Quand l'eau doit être pompée, l'énergie consommée est proportionnelle au niveau de pression créé. Plus la pression est haute, plus la consommation d'énergie de pompage est élevée. La haute pression augmente en plus l'importance des pertes et accélère la dégradation des vieilles conduites.

En Suisse les zones habitées au bord des lacs et dans les vallées s'étendent souvent sur les pentes des collines ou montagnes avoisinantes. Pour éviter de construire trop de réservoirs, qui sont en général coûteux, les Services des eaux créent parfois des zones de pression où les différences d'altitude sont trop importantes et les pressions trop élevées. Pour réduire la pression et épargner de l'énergie on peut souvent partager ces zones en une zone supérieure et une zone inférieure, séparées par des réducteurs de pression. La zone inférieure pourra être alimentée à l'aide de pompes à vitesse variable et pourra utiliser en cas de nécessité les réservoirs existants de la zone supérieure (à travers les réducteurs de pression).

2. ALIMENTATION EN EAU ET EN ÉNERGIE

2.1 Généralités

Selon une estimation faite à l'aide des résultats d'une enquête exécutée par la Société Suisse de l'industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE) chez ses membres (réf. 9), le volume total d'eau captée annuellement en Suisse atteignait en 1990 1162 Mio m³ (dans ce chiffre ne sont pas compris les captages privés) avec une consommation d'électricité spécifique de 0.36 kWh/m³. Il en résulte une consommation totale d'électricité d'environ 420 Mio kWh, ce qui représente à peu près 1 % du montant global de l'électricité consommée en Suisse en 1990. Si l'on y ajoute les volumes captés par des privés pour des besoins industriels et agricoles (refroidissement, chauffage, lavages, irrigation etc.), ce pourcentage devrait être sensiblement plus élevé.

La figure 1 montre la variation de la consommation d'électricité spécifique chez les Services des eaux des communes suisses en 1993.

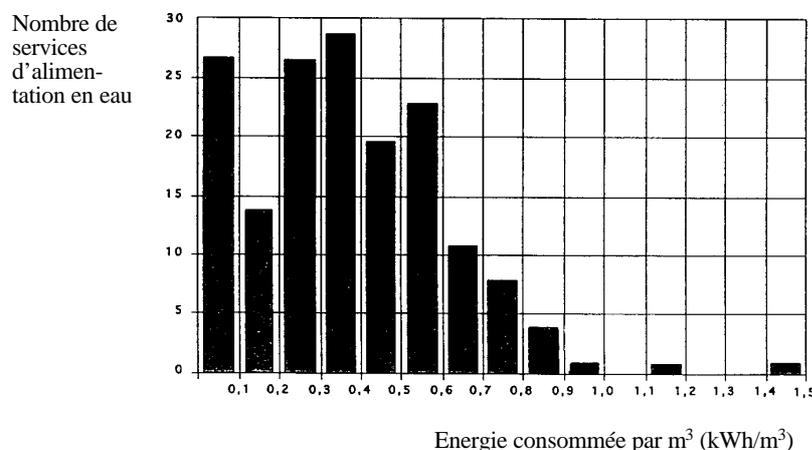


Figure 1
SVGW – Statistique de l'eau potable 1993. Histogramme de la consommation d'électricité par m³ d'eau captée (données de 171 services)

La figure 1 montre que la consommation d'énergie spécifique varie beaucoup d'une commune à l'autre. Cela est dû surtout à la différence d'altitude entre le captage et la consommation qui peut changer d'une façon importante.

Dans un service d'alimentation en eau on utilise l'énergie dans les buts suivants :

- pour le transport et la mise sous pression de l'eau ;
- pour le traitement.

C'est surtout le pompage qui demande des quantités importantes

d'énergie. Dans le traitement l'ozonation et les procédés UV consomment beaucoup d'énergie. Mais ces procédés ne sont pratiquement employés que pour le traitement des eaux de surface, dont le captage ne représente (comme vu plus haut) que 19% du total. En Suisse l'électricité utilisée pour le traitement de l'eau n'atteint que quelques pourcents de la quantité totale consommée par les Services des eaux. Pour cette raison nous limiterons par la suite nos considérations à la consommation énergétique pour le transport et la mise sous pression de l'eau.

L'alimentation en eau des habitants, des entreprises et des bouches d'incendie se fait en plusieurs étapes :

- le captage à partir de sources, d'eaux souterraines ou d'eaux de surface ;
- le traitement ;
- le pompage de l'eau vers des réservoirs ou directement dans le réseau ;
- la distribution de l'eau à l'aide d'un réseau de conduites.

L'énergie est consommée surtout pour le captage et le pompage vers les réservoirs.

Dans les cas de captage de sources ou d'eaux souterraines l'eau n'est parfois pas traitée. Si l'eau peut être captée au-dessus des réservoirs aucun pompage ne sera nécessaire.

2.2 Le calcul de la consommation énergétique

La consommation énergétique d'une ligne de pompage qui transporte l'eau de la hauteur h_s à la hauteur h_d dépend des facteurs suivants :

- la quantité d'eau pompée ;
- la différence ($h_d - h_s$) ;
- la perte de charge dans la conduite de transport ;
- le rendement de l'installation de pompage.

Les formules encadrées permettent de calculer cette consommation en fonction des facteurs énoncés.

Nous admettons que dans une zone de pression l'eau est distribuée à partir d'un seul réservoir et que ce réservoir est alimenté par une seule ligne de pompage. Supposons aussi qu'il n'y ait pas de fuites dans la conduite d'adduction au réservoir.

Soit $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ l'accélération de gravité et $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ la masse spécifique de l'eau. La consommation énergétique annuelle E (en kWh) s'exprime de la façon suivante :

$$E = \frac{2.73 \cdot 10^{-3} (h_d - h_s) \cdot BV \cdot Q_v (1 + p_v/100)}{\eta}$$

D'après la référence 10, p. 382, la puissance P d'une installation de pompage se calcule avec la formule suivante :

$$P = \Delta p Q \eta^{-1}$$

où :

P = Puissance W
 Δp = Pression manométrique $N m^{-2}$
 Q = Débit $m^3 s^{-1}$,
 η = Rendement de l'installation de pompage.

Pour la définition de la pression manométrique voir 10, p. 381.

A partir de cette équation la consommation énergétique E pendant la période t s'exprime de la façon suivante :

$$E = \int \Delta p Q^{-1} dt$$

où t est le temps. L'intégration est faite sur la période de temps Δt .

Pour exprimer d'une façon simple (même si approximée) la consommation énergétique d'une installation de pompage nous utilisons pour Δp et η des valeurs moyennes constantes. A la place de Δp nous introduisons la hauteur manométrique moyenne Δh . On obtient :

$$E \cong \rho g \Delta h W \eta^{-1}$$

où :

E = Energie consommée $Joules$,
 $W = \int Q dt$ quantité pompée m^3 ,
 ρ = Masse spécifique $kg m^{-3}$,
 g = Accélération de gravité $m s^{-2}$,
 Δh = Hauteur manométrique m .

Dans le but d'exprimer la consommation énergétique à l'aide de facteurs utilisés en pratique, nous écrivons :

$$\Delta h = (h_d - h_s) BV$$

où :

h_d = Altitude moyenne du plan d'eau au refoulement
 (dans le réservoir)
 h_s = Altitude moyenne du plan d'eau à l'aspiration
 (au captage)
 BV = Facteur de correction des pertes de charge, exprimé
 comme quotient entre la hauteur manométrique et $(h_d - h_s)$,
 $W = Q_V (1 + pv/100)$

où :

Q_V = Quantité d'eau effectivement utilisée par les abonnés
 pendant une année
 pv = Montant moyen des pertes dans le réseau de la zone
 desservie en pourcent de Q_V

On obtient :

$$E \cong \rho g (h_d - h_s) \cdot BV \cdot Q_V (1 + pv/100) \eta^{-1}$$

où :

E = énergie consommée annuellement en kWh

h_d = niveau moyen du plan de l'eau dans le réservoir en m

h_s = niveau moyen du plan de l'eau au captage en m

BV = facteur de correction pour tenir compte de la perte de charge dans la conduite, exprimé comme quotient entre la hauteur manométrique et $(h_d - h_s)$, voir 10, p. 381.

Q_v = quantité d'eau annuelle effectivement utilisée par les abonnés (quantité d'eau vendue) en m^3

p_v = montant des pertes dans la zone de pression considérée en pourcentage de l'eau effectivement utilisée

η = rendement moyen de l'installation de pompage.

Si une zone de pression est alimentée par plusieurs lignes de pompage la consommation d'énergie totale sera la somme des consommations de chaque ligne.

L'exemple suivant (figure 2) montre comment la formule énoncée est appliquée.

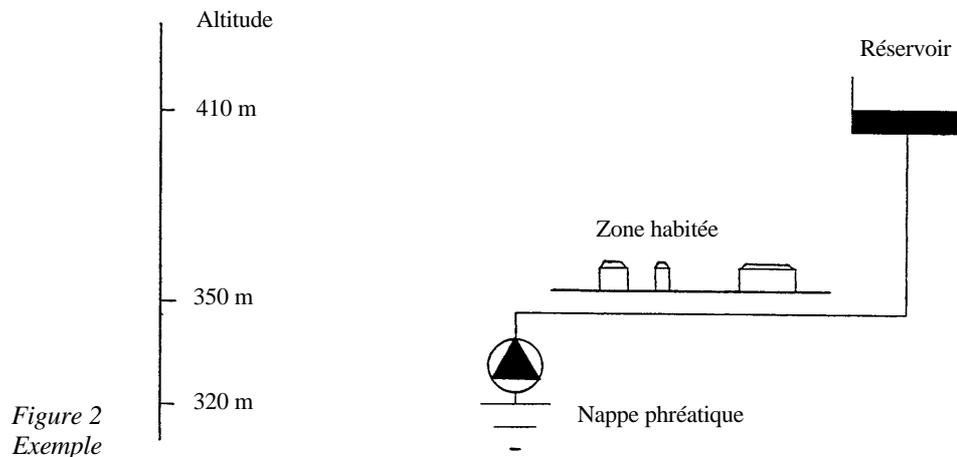


Figure 2
Exemple

Les Services des eaux d'un village de 3000 habitants à une altitude de 350 m captent l'eau dans une nappe souterraine à une altitude moyenne de 320 m. L'eau est pompée sans être traitée jusqu'à un réservoir situé à une altitude de 405 m. La hauteur moyenne de l'eau dans le réservoir est de 5 m. A partir de ce réservoir l'eau est distribuée dans le village. La consommation journalière par habitant est en moyenne de 300 l. Les pertes dans le réseau atteignent 10 % de la quantité fournie aux utilisateurs. L'installation de pompage travaille avec un rendement moyen de 0.65 et le facteur de correction pour les pertes de charge dans la conduite d'adduction au réservoir est de 1.05. Il n'y a pas de fuites dans cette conduite.

La valeur numérique des facteurs intervenant dans la formule énoncée est la suivante :

$$Q_v = 0.3 \cdot 365 \cdot 3000 = 328\,500 \text{ m}^3$$

$$p_v = 10\%$$

$$h_d = 410 \text{ m}$$

$$h_s = 320 \text{ m}$$

$$\eta = 0.65$$

$$BV = 1.05$$

La consommation énergétique annuelle atteint :

$$E \cong 2.73 \cdot 10^{-3} \cdot 3.285 \cdot 10^5 \cdot 1.1 \cdot (410 - 320) \cdot (1/0.65) \cdot 1.05 \\ = 143000 \text{ kWh}$$

La consommation spécifique par habitant est de 47.7 kWh/a et celle par m³ d'eau vendue est de 0.44 kWh/m³.

2.3 Facteurs déterminants

De la formule énoncée au paragraphe 2.2 ressortent les facteurs qui déterminent la consommation énergétique. Dans la suite nous les discutons brièvement.

Eau de source

Nous commençons avec la hauteur h_s du captage. Si cette hauteur dépasse celle du réservoir, l'eau n'est en général pas pompée et il n'y a pas consommation d'énergie pour le transport et la mise en charge de l'eau.

L'utilisation de sources au-dessus de la zone à alimenter est une excellente façon d'épargner de l'énergie. Même si en Suisse le captage de sources est important (38% de l'eau captée provient de sources), on remarque une certaine tendance à ne plus utiliser ou à ne pas mettre en exploitation les sources les moins intéressantes (débits trop faibles et irréguliers, eau qui doit être traitée). Cette tendance se justifie en partie par les coûts élevés de l'entretien ou de la mise en exploitation d'une source. Le débit d'une source connaissant en général des variations saisonnières importantes, l'eau de source ne suffit souvent pas à couvrir à elle seule les besoins en eau pendant toute une année. Les services se voient donc obligés de capter soit la nappe phréatique ou des eaux de surfaces avec des investissements importants, pour le forage de puits ou pour les installations de traitement. La mise en exploitation d'une source représente donc un investissement supplémentaire qui ne peut pas toujours être financé par l'épargne provoquée par la diminution des coûts énergétiques. Les Services des eaux sont donc parfois réticents à effectuer un tel investissement, même si l'eau de source représente une réserve bienvenue en cas de catastrophe ou de guerre.

La consommation d'eau

Même si dans ce travail nous ne nous occupons pas des questions liées à l'économie d'eau chez le consommateur, il faut souligner son importance dans le cadre d'une politique d'économie d'énergie. Sur ce plan, ces derniers temps l'évolution a été positive. La mise en cause publique d'appareils ménagers trop gourmands en eau de la part des associations de consommateurs et la prise de conscience de la population de l'importance des problèmes de l'environnement ont porté à une stabilisation de la consommation. Cette tendance a été renforcée par le comportement des gros consommateurs qui installent de plus en plus des stations de recyclage pour diminuer le coût de l'eau potable (dont le prix comprend souvent aussi les coûts de l'évacuation et du traitement des eaux usées).

Pertes

Le pourcentage pv permet de tenir compte des pertes d'eau dans la formule énoncée. Leur importance est souvent un indicateur de la qualité du réseau de distribution. En tout cas les pertes augmentent si le réseau n'est pas entretenu et renouvelé convenablement. Une politique de contrôle et de diminution des pertes exige une surveillance continue, afin de pouvoir constater rapidement des ruptures importantes de conduites et organiser leur réparation dans des brefs délais. Il est parfois nécessaire d'exécuter une recherche systématique des pertes avec des technologies adéquates. Elle permet de découvrir les fuites peu importantes et de mieux connaître ainsi l'état du réseau. Ce qui est utile pour déterminer les travaux de renouvellement prioritaires.

Les techniques pour surveiller un réseau de distribution et pour exécuter une recherche des pertes sont exposées au chapitre 5.

Emplacement des réservoirs

La consommation d'énergie est directement proportionnelle à la différence ($h_d - h_s$). Dans des régions de montagnes et de collines il arrive assez souvent, parfois pour des raisons historiques, que des réservoirs aient des altitudes trop élevées. Cela cause non seulement une consommation d'énergie de pompage supplémentaire (si l'eau est pompée) mais aussi une pression trop grande dans le réseau de distribution avec comme conséquence une fréquence élevée de ruptures de conduites et des pertes plus importantes que la moyenne.

Dans le but d'épargner de l'énergie les réservoirs devraient être placés le moins haut possible. Pour alimenter une zone habitée plate avec des bâtiments de moins de 20 m de hauteur il suffit par exemple que le réservoir ait une hauteur de 60 m (en admettant un réseau de distribution adéquat).

L'emplacement d'un réservoir ou la pression de travail dans un réseau ne devrait pas être déterminée par des bâtiments d'une hauteur exceptionnelle. Pour alimenter de tels bâtiments, il suffit d'utiliser des pompes de surpression.

Rendement des installations de pompage

Dans les Services des eaux en Suisse l'eau est pompée presque toujours avec des pompes entraînées par des moteurs électriques. Le rendement d'une installation de pompage est le produit des rendements de la pompe (en général une pompe centrifuge) et du moteur. Une pompe doit être choisie de telle sorte que son point de fonctionnement (déterminé par le débit et la hauteur du refoulement) soit proche de celui de son rendement maximum. Le point de fonctionnement d'une pompe peut se déplacer avec le temps, par exemple, si les pertes de charge dans la conduite de raccordement au réservoir augmentent à cause de dépôts sur les parois. Le rendement d'une pompe diminue avec l'usure. Une pompe doit être donc surveillée, entretenue et périodiquement révisée. Les aspects énergétiques des pompes et leur emploi dans des réseaux d'adduction d'eau sont discutés au chapitre 4.

Pertes de charge

Le diamètre trop faible d'une conduite de raccordement entre la station de pompage et le réservoir, ou le réseau de distribution, cause des pertes de charge qui augmente la valeur de BV et ainsi la consommation en énergie du pompage.

3. INDICES ENERGETIQUES

3.1 Considérations préliminaires

Pour alimenter ses abonnés avec de l'eau sous pression, les Services des Eaux d'une commune doivent en général utiliser un minimum d'énergie qui dépend de la différence entre l'altitude des utilisateurs et celle des zones de captage. Ce minimum est l'énergie nécessaire au pompage de l'eau en supposant que le rendement de l'installation de pompage soit égal à 1 et qu'il n'y ait pas de pertes de charge dans les raccordements entre captage et réservoir. Cette énergie minimale peut être exprimée comme la différence entre l'énergie potentielle de l'eau utilisée (ou vendue) chez les abonnés pendant une certaine période (une année par exemple) et l'énergie potentielle de la même quantité d'eau au captage. L'énergie potentielle chez les utilisateurs s'entend avant l'utilisation c'est-à-dire en considérant aussi la pression de travail.

3.2 Energie minimale

Nous appelons E_{\min} l'énergie minimale théorique annuelle nécessaire à l'alimentation des utilisateurs en eau. Nous pouvons aussi exprimer, E_{\min} comme la différence entre l'énergie minimale pour le pompage et l'énergie maximale que l'on peut récupérer de sources placées à une altitude suffisamment élevée. Comme vu plus haut E_{\min} se calcule en tant que différence entre l'énergie potentielle de l'eau effectivement utilisée chez les abonnés (pression de travail comprise) et l'énergie potentielle de la même eau au captage. Nous admettons que l'eau chez les abonnés ait une pression de travail constante normée.

On peut écrire :

$$E_{\min} = E_{pv} - E_{pq} + E_{nd}$$

où :

E_{pv} = Energie potentielle (par rapport au niveau de la mer) de l'eau consommée (ou vendue) pendant une année chez les abonnés en kWh (sans pression de travail).

E_{pq} = Energie potentielle (par rapport au niveau de la mer) de la même eau au captage en kWh.

E_{nd} = Energie minimale nécessaire à la création d'une pression de 6 bar en kWh.

E_{pv} et E_{nd} se calculent en tant que somme des énergies potentielles des différents utilisateurs d'une zone de pression déterminée. De même pour E_{pq} , dont les valeurs doivent être sommées sur tous les captages. Les formules pour calculer ces énergie sont exposées en détail dans l'encadré suivant. La somme de la valeur de E_{\min} pour les différentes zones de pression donne la valeur de E_{\min} pour l'ensemble du réseau d'alimentation.

Cas particulier

Si tous les utilisateurs se trouvent à la même altitude H_V et si l'eau est captée à une altitude H_E , E_{min} (en kWh) s'exprime de la façon suivante :

$$E_{min} = 2.73 \cdot 10^{-3} [Q_V (H_V + 60) - \frac{Q_E H_E}{(1 + pv/100)}]$$

où :

Q_V = Quantité d'eau effectivement utilisée (vendue) en m^3

Q_E = Quantité d'eau captée en m^3

pv = Taux de pertes en pourcentage de Q_V

$$E_{pv} = \rho g 2.78 \cdot 10^{-7} \sum_{i=1}^{i=aa} (Q_V)_i \cdot H_i = 2.73 \cdot 10^{-3} \sum_{i=1}^{i=aa} (Q_V)_i \cdot H_i$$

où :

$(Q_V)_i$ = Eau consommée pendant une année par l'utilisateur i en m^3

H_i = Altitude du consommateur i en m

aa = Nombre de consommateurs (ou points de sortie) dans la zone de pression considérée

g = Accélération de gravité en $m s^{-2}$, $g = 9.81 m s^{-2}$

ρ = Masse spécifique de l'eau en $kg m^{-3}$, $\rho = 1000 kg m^{-3}$

et

$$E_{pq} = \rho g 2.78 \cdot 10^{-7} (1 + pv/100)^{-1} \sum_{k=1}^{k=ae} (Q_E)_k \cdot H_k =$$

$$2.73 \cdot 10^{-3} (1 + pv/100)^{-1} \sum_{k=1}^{k=ae} (Q_E)_k \cdot H_k$$

où :

$(Q_E)_k$ = Quantité d'eau captée pendant une année au captage k en m^3

H_k = Altitude du captage k en m

ae = Nombre de captages (points d'introduction d'eau) dans la zone de pression considérée

pv = Taux de pertes en pourcentage de l'eau effectivement consommée

et

$$E_{nd} = g 2.78 \cdot 10^{-7} \sum_{i=1}^{i=aa} (Q_V)_i \cdot 60 = 163.8 \cdot 10^{-3} \sum_{i=1}^{i=aa} (Q_V)_i$$

Les valeurs $(Q_V)_i$ et $(Q_E)_k$ dans les différentes zones de pression sont en général connues. Les premières sont utilisées pour facturer l'eau, les deuxièmes représentent les captages. Les altitudes peuvent être lues sur les plans du cadastre.

3.3 L'indice de structure

L'énergie minimale reflète bien dans quelle mesure la structure d'un réseau d'alimentation détermine à elle seule l'énergie nécessaire. Nous pouvons donc l'utiliser pour définir un indice de structure. Pour éliminer l'influence des dimensions d'un réseau, nous divisons l'énergie minimale par la quantité d'eau effectivement consommée. L'indice sera donc défini comme il suit :

$$I1 = E_{\min}/Q_V$$

où :

E_{\min} = Energie minimale en kWh. E_{\min} devient négative si l'altitude des captages permet (théoriquement) de produire de l'électricité.

Q_V = Quantité annuelle d'eau consommée effectivement par les utilisateurs en m^3 .

I1 est exprimé en kWh/ m^3 .

L'indice I1 peut toujours être calculé, même quand le réseau d'adduction ne consomme pas d'énergie pour le transport et la mise sous pression de l'eau.

Plus I1 est élevé, plus importante sera la consommation due à la structure du réseau. I1 montre dans quelle mesure l'emplacement des captages par rapport à celui des utilisateurs est énergétiquement favorable ou défavorable.

3.4 Indice de qualité

L'indice de qualité doit en premier lieu indiquer si les installations d'un réseau d'alimentation en eau sont énergétiquement bien conçues et performantes. Un tel indice peut être construit à partir d'une comparaison entre l'énergie effectivement utilisée et l'énergie minimale. Pour que la signification de l'indice soit facilement compréhensible, cette comparaison doit être faite d'une façon très simple.

Nous définissons donc l'indice de qualité I2 comme le quotient suivant :

$$I2 = E/FE_{\min}$$

où :

E = Energie consommée pendant un an pour le transport et la mise sous pression de l'eau (sans déduction de l'énergie éventuellement récupérée avec turbinage de l'eau de sources à haute altitude) en kWh.

FE_{\min} = Energie minimale pour le transport et la mise sous pression de l'eau, en kWh.

Contrairement à E_{\min} , le calcul de FE_{\min} se fait sans déduction de l'énergie récupérable maximale de sources à haute altitude.

I2 a le grand avantage d'être directement proportionnel à E , et par cela aux facteurs $1 + pv/100$, $h_d - h_s$, η^{-1} et BV (voir le paragraphe 2.2). L'influence de ces facteurs sur I2 est donc immédiate : plus les pertes sont importantes par exemple et plus élevé sera I2.

FE_{\min} est calculé, de même que E_{\min} , comme la somme de l'énergie potentielle de l'eau pompée arrivée aux utilisateurs (en considérant toujours une pression de travail de 6 bar), déduite de l'énergie potentielle de la même quantité d'eau aux captages. Nous écrivons :

$$FE_{\min} = FE_{pv} - FE_{pq} + FE_{nd}$$

Soit Q_E l'alimentation annuelle de la zone de pression en eau. Nous pouvons l'exprimer comme la somme :

$$Q_E = Q_{EP} + Q_{EQ}$$

où :

Q_{EP} = Alimentation annuelle avec de l'eau pompée

Q_{EQ} = Alimentation annuelle avec de l'eau non pompée

Nous pouvons écrire :

$$FE_{pv} = E_{pv} \cdot Q_{EP} / Q_E$$

$$FE_{nd} = E_{nd} \cdot Q_{EP} / Q_E$$

FE_{pq} se calcule comme E_{pq} (voir l'encadré correspondant), mais la somme est faite seulement sur les captages où l'eau est pompée.

Si l'ensemble de l'eau consommée est pompée, on a :

$$E_{\min} = FE_{\min}$$

Si l'indice de qualité est calculé pour l'ensemble du réseau d'alimentation, alors les valeurs de E et FE_{\min} doivent être sommées sur toutes les zones de pression.

3.5 Exemples

Nous illustrons le calcul et le mode d'emploi des indices énergétiques I1 et I2 à l'aide de quelques exemples simples.

Exemple 1

La zone desservie se trouve à 500 m d'altitude. L'eau est captée dans un lac à une altitude de 300 m, après son traitement elle est pompée dans un réservoir situé à une altitude de 560 m (figure 3a). Dans la zone desservie habitent 1000 personnes consommant en moyenne 250 l par jour. La consommation annuelle des deux stations de pompes peut être calculée à l'aide des données suivantes :

	Pompage au captage	Pompage après le traitement
$h_d - h_s$	200 m	60 m
BV	1.05	1.07
Q_v	91'250 m ³	91'250 m ³
p_v	1.15	1.15
η	0.65	0.62

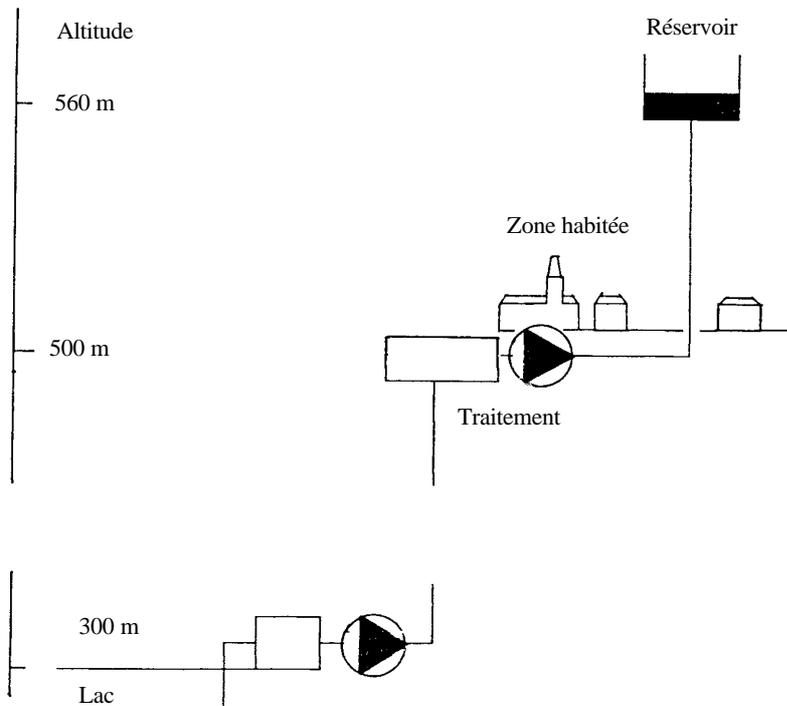


Figure 3a

D'après la formule énoncée au paragraphe 2.2, E se calcule comme il suit :

$$E \cong 2.73 \cdot 10^{-3} \cdot 91'250 (1 + 0.15) [200 \cdot 1.05/0.65 + 60 \cdot 1.07/0.62] \\ = 122'200 \text{ kWh}$$

Le calcul des indices énergétiques donne :

$$E_{\min} = 2.73 \cdot 10^{-3} [91'250 \cdot 560 - 91'250 \cdot 300] = 64'750 \text{ kWh} \\ I1 = 64'750/91'250 = \mathbf{0.71 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}} \\ I2 = 122'200/64'750 = \mathbf{1.89}$$

Exemple 2

La zone desservie et le réservoir se trouvent aux mêmes altitudes que dans l'exemple 1, mais le captage se fait dans une nappe phréatique à une altitude de 470 m (voir la figure 3b). L'eau effectivement consommée atteint la quantité de l'exemple 1. L'état du réseau d'alimentation est énergétiquement moins bon que celui de l'exemple 1 : le taux de pertes et la perte de charge dans la conduite d'adduction au réservoir sont plus élevés et le rendement des installations de pompage est plus faible. L'énergie consommée annuellement peut se calculer à partir des données suivantes :

	Pompage au captage	Pompage après le traitement
$h_d - h_s$	30 m	60 m
BV	1.1	1.1
Q_v	91'250 m ³	91'250 m ³
p_v	1.30	1.30
	0.6	0.6

D'après la formule du paragraphe 2.2, E se calcule comme il suit :

$$E \cong 2.73 \cdot 10^{-3} \cdot 91'250 \cdot 1.3 [30 \cdot 1.1/0.6 + 60 \cdot 1.1/0.6] = 53'450 \text{ kWh}$$

Le calcul des indices énergétiques donne :

$$E_{\min} = 2.73 \cdot 10^{-3} [91'250 \cdot 560 - 91'250 \cdot 470] = 22'400 \text{ kWh}$$

$$I1 = 22'400/91'250 = \mathbf{0.25 \text{ kWh/m}^3}$$

$$I2 = 53'450/22'400 = \mathbf{2.39}$$

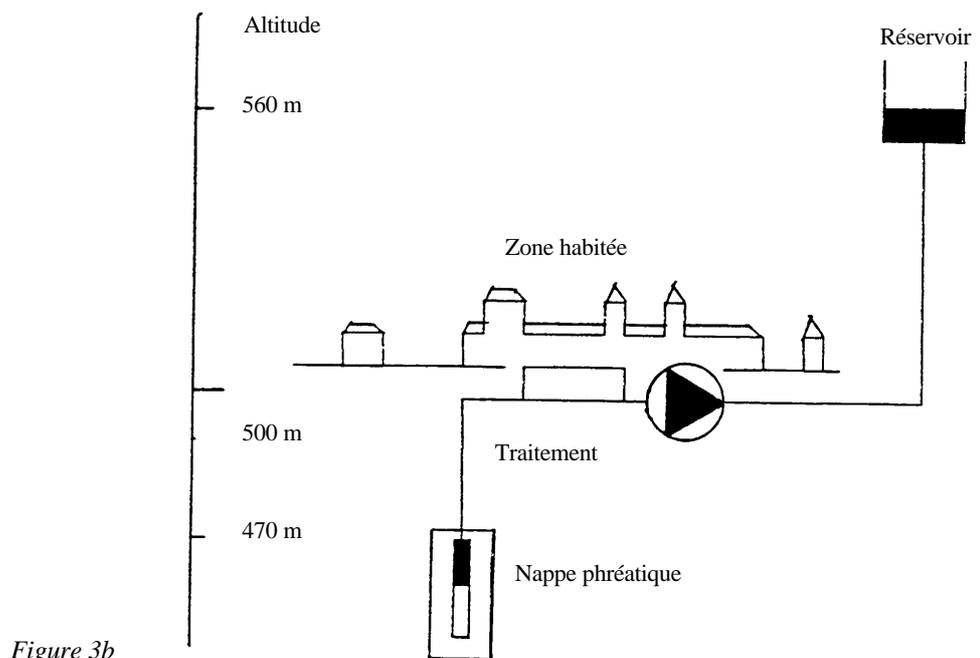


Figure 3b

Exemple 3

Dans la zone illustrée dans la figure 3c, les Services des eaux alimentent une zone de 2000 habitants à une altitude de 400 m. La consommation moyenne par habitant (consommation des services et des industries comprise) est de 400 l par jour. 1/4 de l'eau captée est de source, les autres 3/4 sont pompés à partir d'un puits dans la nappe phréatique. La source a environ la même altitude que le réservoir. Les pompes dans le puits et celles après le traitement ont le même rendement, qui est de 0.5. Le facteur de correction pour les pertes de charge est aussi le même pour les deux conduites de raccordement (entre le puits et le traitement et entre le traitement et le réservoir). Il atteint 1.05. Les pertes dans le réseau de distribution sont de l'ordre de 20%.

On a:

$$Q_V = 292'000 \text{ m}^3$$

$$E \cong 2.73 \cdot 10^{-3} \cdot 219'000 \cdot 1.2 \cdot 90 \cdot 1.05 / 0.5 = 135'560 \text{ kWh}$$

$$E_{\min} = 2.73 \cdot 10^{-3} [292'000 \cdot 460 - (219'000 \cdot 370 + 73'000 \cdot 460)] = 53'800 \text{ kWh}$$

$$FE_{\min} = 2.73 \cdot 10^{-3} [292'000 \cdot 460 \cdot 0.75 - 219'000 \cdot 370] = 53'800 \text{ kWh}$$

$$I1 = 53'800 / 292'000 = \mathbf{0.18 \text{ kWh/m}^3}$$

$$I2 = 135'560 / 53'800 = \mathbf{2.52}$$

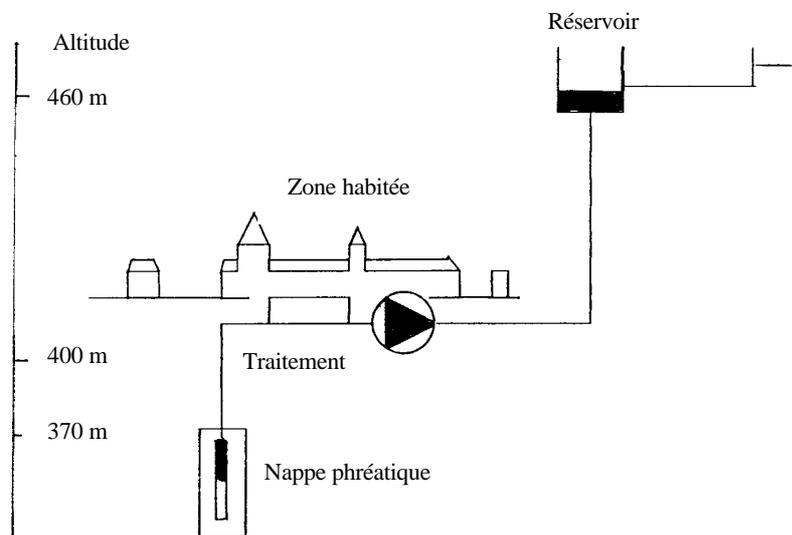


Figure 3 c

Exemple 4

L'exemple 4 (figure 3d) est semblable au précédent, mais la zone desservie se situe ici sur deux plans: la moitié de la population vit à une altitude de 400 m et l'autre moitié à 440 m. Le réservoir et le captage de la source sont situés plus haut que dans l'exemple précédent. Ils se trouvent à 490 m. La consommation totale, le montant des pertes, la perte de charge dans les conduites de raccordement et le rendement des stations de pompage sont les mêmes que dans l'exemple précédent.

Nous obtenons :

$$\begin{aligned}
 Q_V &= 292'000 \text{ m}^3 \\
 E &\cong 2.73 \cdot 10^{-3} \cdot 219'000 \cdot 1.2 \cdot 120 \cdot 1.05 / 0.5 \\
 &= 180'740 \text{ kWh} \\
 E_{\min} &= 2.73 \cdot 10^{-3} [146'000 \cdot 460 + 146'000 \cdot 500 - (219'000 \cdot 370 \\
 &\quad + 73'000 \cdot 490)] = 63'800 \text{ kWh} \\
 FE_{\min} &= 2.73 \cdot 10^{-3} [(146'000 \cdot 460 + 146'000 \cdot 500) \cdot 0.75 \\
 &\quad - 219'000 \cdot 370] = 65'800 \text{ kWh} \\
 I1 &= 63'800 / 292'000 = \mathbf{0.22 \text{ kWh/m}^3} \\
 I2 &= 180'740 / 65'800 = 2.75
 \end{aligned}$$

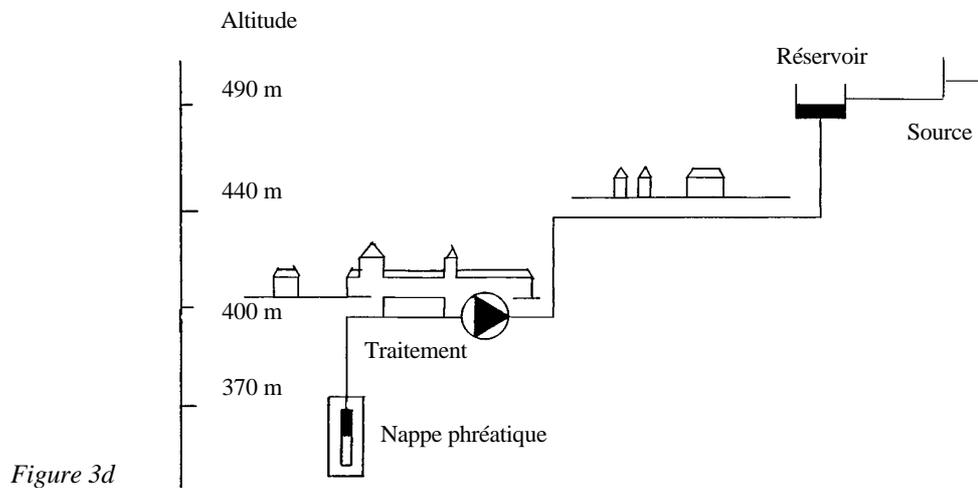


Figure 3d

Exemple 5

Le service d'alimentation en eau de la figure 3e ne consomme pas d'énergie. L'eau est captée en haute altitude. La zone desservie consomme 200 000 m³ par an. L'alimentation de la source atteint 240 000 m³. Les pertes atteignent donc 20%.

On a :

$$\begin{aligned}
 Q_V &= 200'000 \text{ m}^3 \\
 E &= 0 \\
 E_{\min} &= 2.73 \cdot 10^{-3} [200'000 \cdot 460 - 200'000 \cdot 600] = -76'400 \text{ kWh} \\
 I1 &= -76'400 / 200'000 = \mathbf{-0.38 \text{ kWh/m}^3}
 \end{aligned}$$

Exemple 6

Dans cet exemple (voir figure 3f) 1/4 de l'eau est captée dans la nappe souterraine et 3/4 proviennent d'une source à haute altitude. Les autres données nécessaires au calcul des indices énergétiques sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 Q_V &= 300'000 \text{ m}^3 \\
 p_v &= 40\% \\
 \eta &= 0.5 \\
 BV &= 1.1
 \end{aligned}$$

Il s'en suit :

$$E = 2.73 \cdot 10^{-3} \cdot 90 \cdot 0.25 \cdot 300'000 \cdot 1.4 \cdot 1.1/0.5$$

$$= 57'000 \text{ kWh}$$

$$E_{\min} = 2.73 \cdot 10^{-3} [300'000 \cdot 460 - (300'000 \cdot 600 \cdot 0.75 + 300'000 \cdot 370 \cdot 0.25) = -67'000 \text{ kWh}$$

$$FE_{\min} = 2.73 \cdot 10^{-3} [300'000 \cdot 460 \cdot 0.25 - 300'000 \cdot 370 \cdot 0.25]$$

$$= 18'400 \text{ kWh}$$

$$I1 = -0.22 \text{ kWh/m}^3$$

$$I2 = 3.1$$

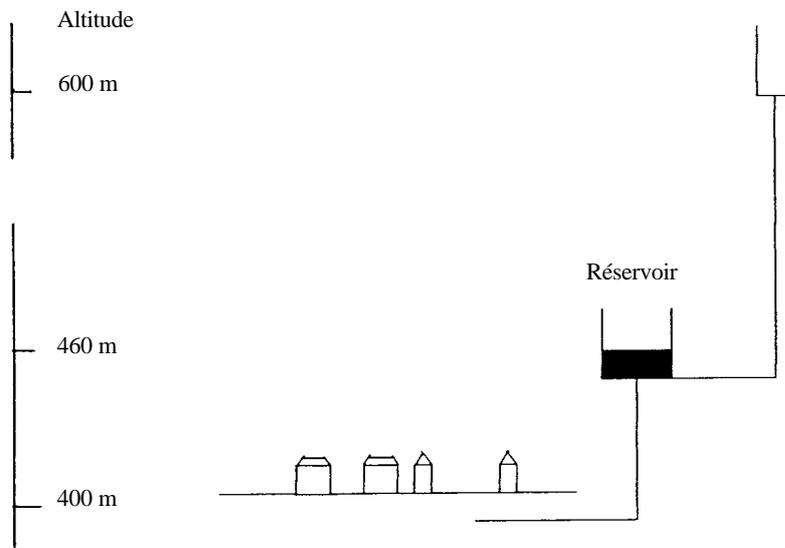


Figure 3e

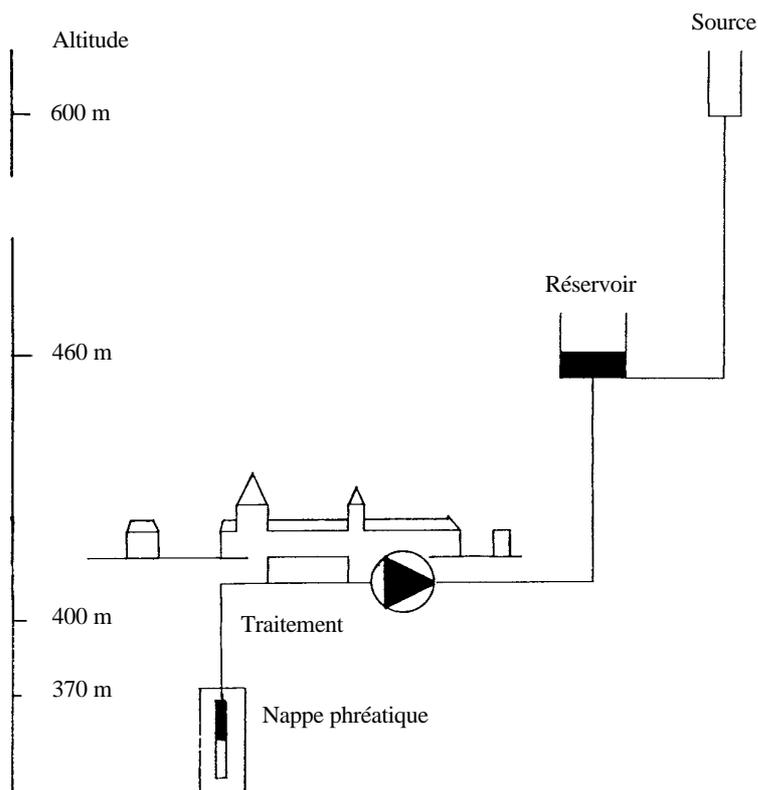


Figure 3f

3.6 Caractéristiques des deux indices

L'indice de structure montre dans quelle mesure l'emplacement des captages par rapport à la zone desservie influence la consommation énergétique.

Dans l'exemple 1, l'emplacement du captage par rapport à la zone habitée se trouve bien plus bas que dans l'exemple 2. La consommation énergétique dans le premier exemple est nettement plus élevée que dans le second. De même pour l'indice de structure, qui reflète parfaitement la différence entre les deux services d'alimentation. Cela indépendamment de la qualité énergétique des installations qui, dans l'exemple 1, sont nettement plus performantes que dans l'exemple 2.

Une zone de pression dont les différences d'altitude sont importantes aura en général une consommation énergétique plus élevée qu'une zone plate, où les utilisateurs se trouvent tous à la même altitude. L'indice de qualité y sera souvent aussi plus élevé. Dans le premier type de zone, on ne peut pratiquement pas éviter qu'il y ait des endroits où la pression est trop élevée (exemples 3 et 4).

Si l'eau est captée en haute altitude, il n'y a pas de consommation d'énergie et I_1 devient négatif. Une valeur négative de l'indice de structure indique qu'il y a la possibilité théorique de récupérer de l'énergie (exemple 5). Une récupération peut être aussi possible malgré que I_1 soit positif. Il se peut qu'à côté de captages à basse altitude il y en ait aussi à une altitude élevée avec un potentiel important d'énergie récupérable.

Nous pouvons donc constater que l'indice de structure I_1 sert à indiquer dans quelle mesure l'emplacement des captages par rapport à la zone desservie est énergétiquement favorable ou pas. Plus I_1 est grand et plus cet emplacement est défavorable.

L'indice de qualité reflète en général dans quelle mesure les installations d'un service d'alimentation (stations de pompage, conduites de raccordement, emplacement des réservoirs et réseau de distribution) sont énergétiquement bien conçues et performantes. La règle suivante est valable : plus I_2 est grand et moins bonne est la qualité énergétique des installations.

4. INSTALLATIONS DE POMPAGE

4.1 Généralités

A l'exception des cas où l'alimentation peut se faire à partir de sources situées à des altitudes suffisamment élevées, l'eau captée dans des puits ou dans des lacs doit toujours être pompée. Une installation de pompage est composée essentiellement par des pompes entraînées par des moteurs électriques. En Suisse, les Services des eaux utilisent en général des pompes centrifuges où l'eau est accélérée et mise sous pression par un mouvement rotatif. La figure 4 illustre le fonctionnement d'une telle pompe.

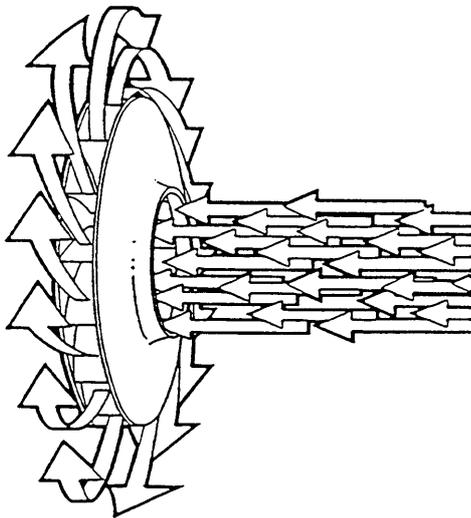


Figure 4
Fonctionnement d'une pompe centrifuge (réf. 11)

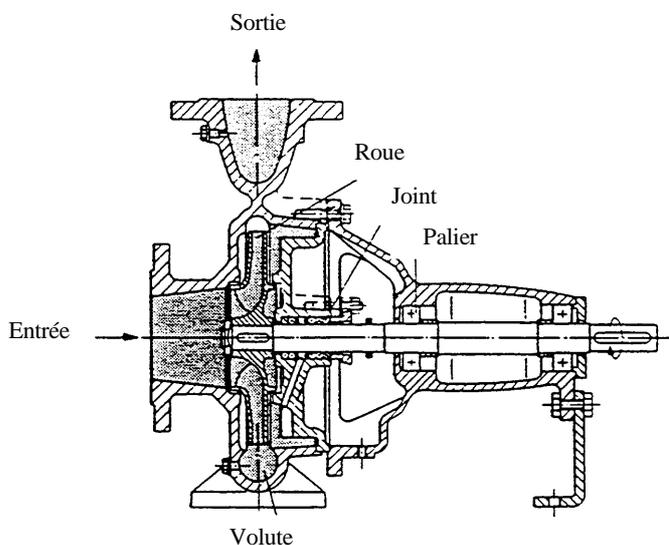


Figure 5
Section d'une pompe centrifuge (réf. 12)

Les parties principales d'une pompe centrifuge sont :

- la roue ;
- le corps ;
- l'arbre de transmission.

L'eau est aspirée à travers une conduite qui l'amène à la roue de la pompe centrifuge où elle est accélérée et mise sous pression au début de la conduite de refoulement.

4.2 Le choix du groupe moteur-pompe

Dans une pompe centrifuge, le débit varie en fonction de la hauteur manométrique. Pour employer une pompe centrifuge d'une façon optimale, il faut connaître ses courbes caractéristiques qui illustrent entre autres la variation de la hauteur manométrique et du rendement en fonction du débit. Dans la figure 6 sont illustrées, à titre d'exemple, les courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge.

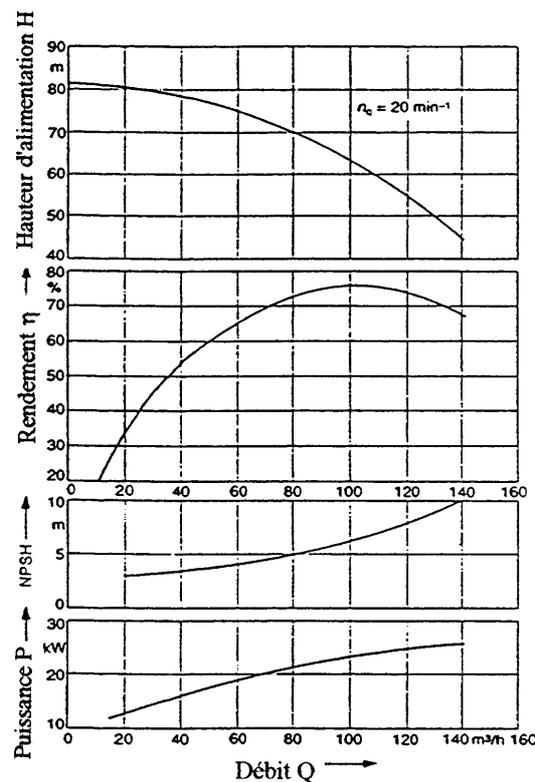


Figure 6
Courbes caractéristiques d'une
pompe centrifuge (réf. 12)

Les courbes caractéristiques dépendent, entre autres, des facteurs suivants :

- le diamètre de la roue ;
- autres caractéristiques de la roue ;
- la vitesse de rotation.

La figure 6 montre que le rendement d'une pompe centrifuge varie sensiblement en fonction du débit. Pour optimiser la consommation énergétique, il faut choisir dans la multitude des pompes disponibles celle qui, pour la hauteur manométrique demandée et le débit voulu, possède le rendement le plus élevé.

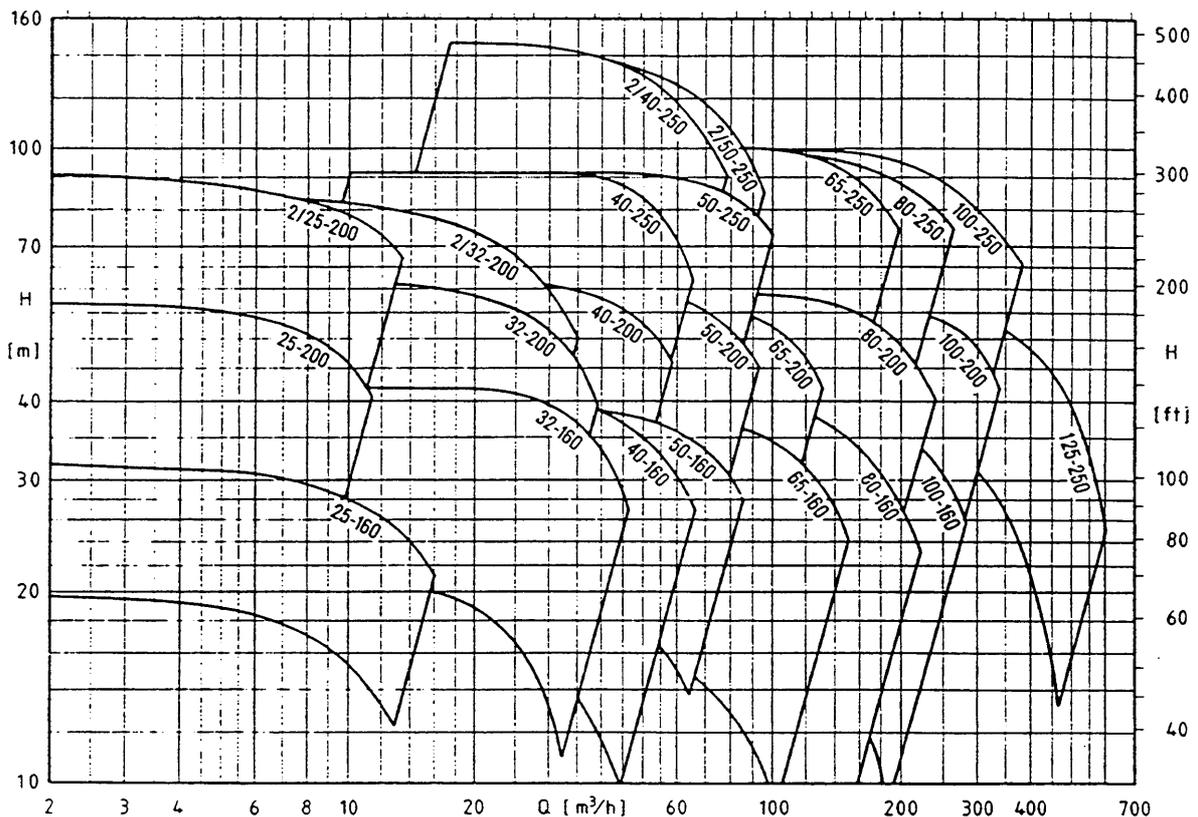
Pour créer des hautes pressions on a recours, surtout pour des débits peu importants, à des pompes à plusieurs étages où l'eau est accélérée par un nombre déterminé de roues en série.

Pour mieux satisfaire les besoins de leurs clients les constructeurs réalisent des séries de types de pompes en fonction de la hauteur manométrique et du débit requis. Le choix de la pompe avec le meilleur rendement se fait à l'aide d'abaques sur lesquels pour chaque type de pompe est indiquée la portion du plan du diagramme hauteur manométrique/débit où le rendement est intéressant (figure 7). De tels abaques existent pour les vitesses de rotation usuelles.

Les chiffres utilisés dans la figure 7 pour désigner le type de pompe indiquent des caractéristiques de ces pompes. Leur signification, illustrée à l'aide de la pompe 2/32-200, est la suivante :

- 2 : nombre d'étages ;
- 32 : diamètre nominal de la tubulure de refoulement ;
- 200 : diamètre nominal de la roue.

Figure 7
Champs de puissance des pompes à volute PN 10.
Type AZ (Sulzer Pumpen AG)



4.3 Rendements

Le rendement d'un groupe moteur-pompe est caractérisé par le quotient entre la puissance hydraulique et la puissance absorbée.

Dans la figure 8 sont représentées des valeurs indicatives du rendement de pompes en fonction de la hauteur d'élévation et du débit. On y constate que pour la même hauteur d'élévation, le rendement augmente avec le débit.

Avec des pompes à plusieurs étages on peut obtenir un rendement acceptable (50-60%) aussi pour des débits en dessous de 20 m³/h (5.5 l/s) et des hauteurs d'élévation de 100 m.

Le rendement d'un groupe moteur-pompe est le produit des rendements de la pompe et du moteur. Dans la figure 9 est comparé le rendement d'un moteur électrique standard avec celui d'un moteur à haut rendement (High-Efficiency-Motor) en fonction de la charge. Avec les moteurs à haut rendement on peut épargner environ 5%. Puisque les pompes des services d'approvisionnement en eau fonctionnent pendant une bonne partie du temps, il est souvent utile d'examiner si l'emploi d'un moteur à haut rendement est financièrement intéressant. Pour des renseignements supplémentaires dans ce domaine, nous renvoyons le lecteur à la référence 8.

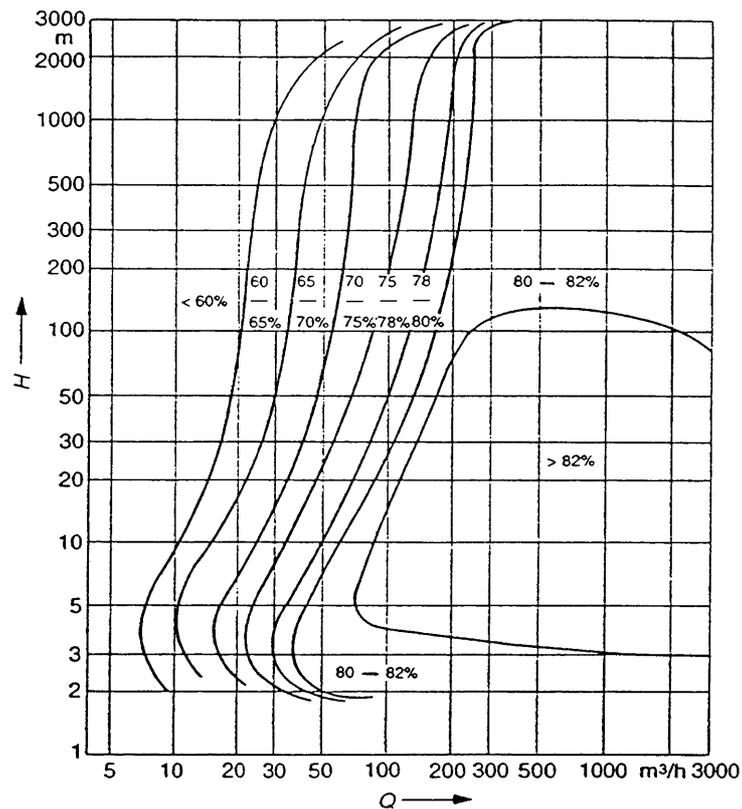


Figure 8
Valeurs indicatives des rendements
de pompes (d'après la réf. 12)

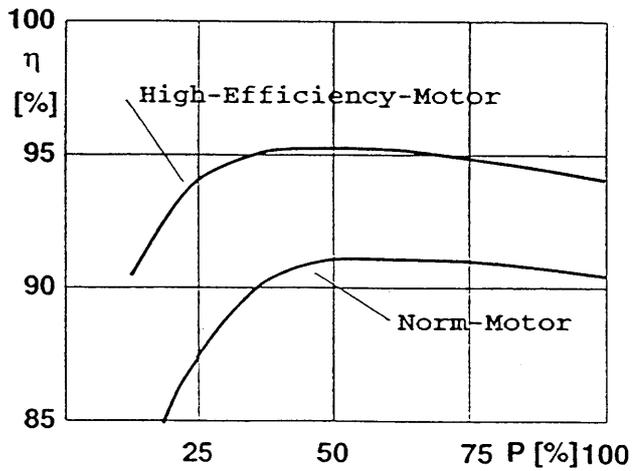


Figure 9
Rendement en fonction de la charge de moteurs électriques asynchrones. Puissance nominale de 37 kW (d'après la réf. 8).

4.4 L'emploi des groupes moteur-pompe dans des systèmes d'approvisionnement en eau

Possibilités

Dans des systèmes d'alimentation en eau, les groupes moteur-pompe sont utilisés selon les trois types principaux (d'un point de vue énergétique) illustrés dans les figures 10a, 10b et 10c.

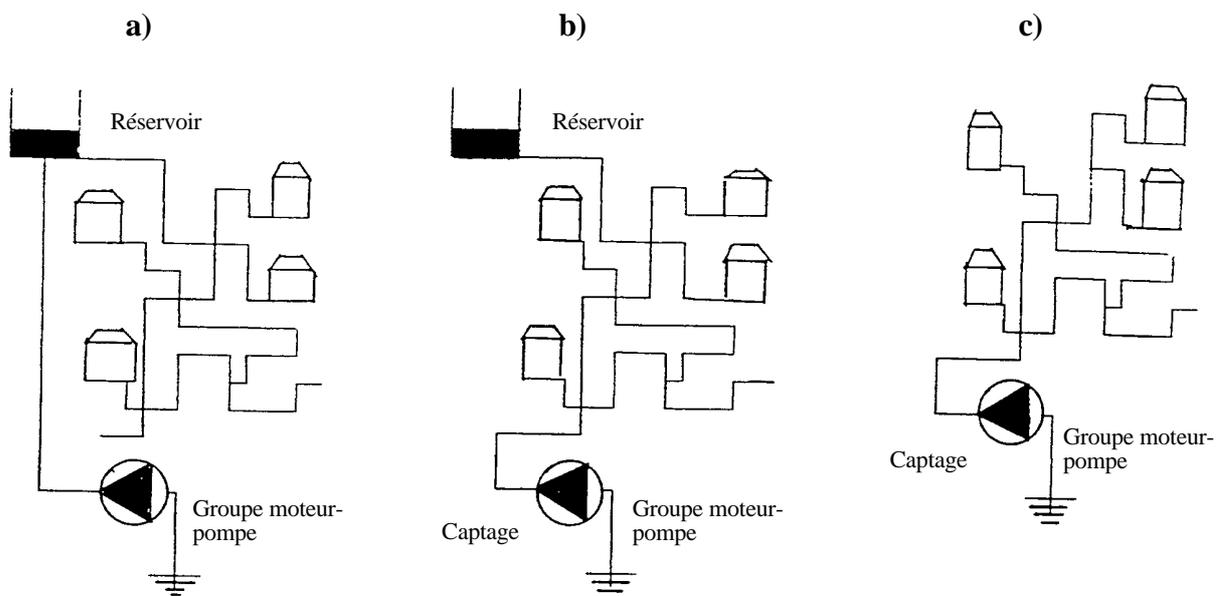


Figure 10
Types d'utilisation d'un groupe moteur-pompe dans des systèmes d'approvisionnement en eau

Dans le premier cas (figure 10a) l'eau est pompée à partir d'un captage (eaux souterraines, traitement, réservoir) à une station de traitement ou à un réservoir. La hauteur du plan de l'eau au captage et celle du plan de refoulement varient peu et le débit de la pompe est plus ou moins constant.

La mise en route et l'arrêt de la pompe se font en fonction de la demande caractérisée en général par la hauteur du plan d'eau au réservoir. Pour choisir la meilleure pompe, il faut avant tout connaître le débit, la hauteur d'élévation (en considérant les pertes de charge dans la conduite de raccordement), les conditions d'aspiration et la consommation d'électricité prévue. On étudiera ensuite les abaques des constructeurs pour voir quelles sont les pompes pouvant être prises en considération. L'étude des courbes caractéristiques et l'analyse d'autres informations importantes permettront enfin de choisir la pompe dont le rendement, le prix, la durée de vie et les coûts d'entretien sont économiquement les plus intéressants.

Dans le deuxième cas (figure 10b) l'eau est pompée directement dans le réseau, qui dispose d'un ou plusieurs réservoirs.

La demande d'eau d'un réseau (ou d'une zone de pression) varie fortement dans le temps, en fonction de l'heure (jour et nuit) et de la saison (hiver, été). La pompe peut être choisie de telle sorte que son débit énergétiquement optimal soit plus élevé que la consommation de pointe du réseau. Le groupe moteur-pompe travaillera alors comme dans le premier cas (figure 10a) : quand la pompe est en fonction, il y aura toujours de l'eau qui arrivera au réservoir. Ce type d'emploi rend le choix de la pompe facile et le point de fonctionnement de celle-ci sera toujours proche de l'optimum. Son désavantage est la pression élevée que la pompe doit fournir pour être en mesure de toujours alimenter le réservoir et la consommation d'énergie qui en résulte.

Une solution énergétiquement meilleure peut être réalisée en choisissant une pompe avec un débit nominal inférieur à la consommation de pointe : dans des situations de forte demande, le débit de la pompe dépassera sa valeur nominale et sa hauteur d'élévation diminuera en correspondance (figure 6). Le réseau de distribution sera alors alimenté par la pompe et le réservoir en même temps. Cette façon d'employer une pompe est énergétiquement intéressante mais rend le choix de la pompe plus difficile. Pour obtenir une prestation énergétiquement encore meilleure on peut employer une pompe à vitesse variable (c'est-à-dire une pompe dont on peut régler le nombre de tours) qui permet d'augmenter le débit sans trop diminuer le rendement. La pompe sera choisie pour travailler d'une façon optimale pour un débit correspondant à la demande moyenne du réseau. La vitesse de la pompe peut être réglée en fonction de la hauteur de l'eau dans le réservoir. Si celle-ci diminue fortement, la vitesse de la pompe est augmentée pour adapter le débit aux exigences d'une demande accrue.

Dans le troisième cas (figure 10c), le réseau de distribution est alimenté directement (sans réservoir). Puisque l’approvisionnement en eau doit être assuré même en cas de coupure de courant, l’installation de pompage doit disposer d’un groupe électrogène autonome. Le débit doit pouvoir être réglé entre le minimum (le montant des pertes) et la consommation de pointe (en tenant compte des situations d’incendie). Avec une telle variation, des rendements acceptables ne peuvent être obtenus qu’à l’aide de plusieurs pompes de capacité différente (et si possible à vitesse variable) installées en parallèle. L’alimentation directe du réseau de distribution est peu fréquente en Suisse. Elle est utilisée avec des avantages financiers considérables dans des régions plates (à Genève et à Diepoldsau par exemple).

Considérations énergétiques

L’alimentation directe d’un réseau avec réservoir (figure 10b) permet d’économiser de l’énergie, même si l’économie qu’on peut réaliser n’est souvent pas beaucoup plus grande que les pertes de charge dans une conduite de raccordement entre la station de pompage et le réservoir. L’énergie requise est plus faible que dans un emploi du type illustré dans la figure 10a parce qu’une partie de l’eau ne doit pas être pompée jusqu’au réservoir. L’économie est diminuée par le fait que le rendement de la pompe est en général moins bon que dans la figure 10a parce que son débit varie d’une façon assez importante. Avec l’utilisation de pompes à vitesse variable, l’économie énergétique est supérieure, même si le modulateur de fréquence utilise à lui seul de 1 à 2 % de l’énergie totale requise. L’alimentation directe d’un réseau ne permet donc d’économiser que quelques pourcents de l’énergie absorbée par le type d’emploi illustré dans la figure 10a. L’avantage d’une alimentation directe est surtout économique dans la mesure où elle permet de diminuer les coûts de raccordement.

Du point de vue du management énergétique, les réservoirs ont le grand avantage de pouvoir être remplis pendant la nuit. Dans beaucoup de régions suisses la consommation nocturne en été est très faible et les tarifs de l’électricité y sont particulièrement favorables. Les Services des eaux qui possèdent des réservoirs d’une capacité suffisante peuvent économiser des sommes importantes en pompant la nuit et en utilisant l’eau stockée pendant la journée. Il y a ici évidemment une contradiction entre la solution la plus économique et celle qui permet d’épargner le plus d’énergie (alimentation directe du réseau dans les périodes de plus grande consommation).

Avantages et désavantages économiques

L’alimentation directe du réseau avec réservoir (figure 10b) permet d’éviter la construction d’une conduite de raccordement entre la station de pompage et le réservoir (figure 10a). Un raccordement entre la station de pompage et le réseau de distribution est en général moins coûteux. La solution la meilleure dépend de données locales comme l’emplacement du captage, du réservoir, des utili-

sateurs ou éventuellement de la présence de conduites utilisables pour les raccordements nécessaires.

L'alimentation directe sans réservoir (figure 10c) permet d'éviter la construction d'un réservoir haut placé et des conduites pour le raccorder à la station de traitement et au réseau de distribution. Cela représente un avantage important surtout dans des régions plates. D'autre part une telle situation entraîne des coûts plus élevés pour :

- les groupes électrogènes et les équipements annexes ;
- l'installation de capacités de pompage importantes avec plusieurs pompes à vitesse variable travaillant en parallèle ;
- la construction de réservoirs pour l'eau traitée ou bien le surdimensionnement de la station de traitement.

En outre l'alimentation directe sans réservoir ne permet pas de déplacer une partie de la consommation d'électricité dans la période nocturne. L'électricité doit donc être payée au tarif diurne qui est souvent bien plus élevé que celui de nuit.

4.5 Pompes à vitesse variable

Comme illustré au paragraphe 4.2, la hauteur d'élévation d'une pompe dépend souvent assez fortement du débit. En plus, si le débit s'écarte de sa valeur nominale, le rendement diminue rapidement. Ces deux caractéristiques importantes des pompes centrifuges font en sorte qu'il est parfois intéressant d'utiliser des pompes à vitesse variable, qui permettent de travailler avec un rendement à peu près constant même si :

- le débit change alors que la hauteur de refoulement reste constante (cas d'un réseau de distribution) ;
- la hauteur de refoulement change alors que le débit doit rester constant (cas par exemple du captage d'une nappe phréatique dont le plan d'eau varie beaucoup).

Nous illustrons à l'aide d'un exemple comment employer des pompes à vitesse variable. Considérons un service d'approvisionnement en eau potable alimentant une commune se trouvant sur la pente d'une colline. Le réseau de distribution est alimenté par gravité à partir de réservoirs situés en hauteur. La différence d'altitude entre la partie haute et la partie basse de la commune est importante et le réseau de distribution est partagé en deux zones de pression raccordées entre elles par des réducteurs de pression. L'eau est captée dans une nappe phréatique située dans la partie basse de la commune et pompée ensuite dans les réservoirs. La consommation énergétique spécifique est particulièrement élevée à cause surtout de la différence d'altitude entre les réservoirs et la partie basse. Pour économiser de l'énergie, le Service des eaux décide d'alimenter cette partie directement en installant un nouveau groupe de pompes et en construisant les raccordements nécessaires. Puisque la demande d'eau varie d'une façon importante, des pompes à vitesse

variable sont choisies. En cas de consommation extraordinaire ou de coupure de courant, l'alimentation de la partie basse est assurée, à travers les réducteurs de pression, par de l'eau provenant des réservoirs comme c'était le cas précédemment. Une telle solution permet au Service des eaux d'économiser des quantités importantes d'électricité.

5. PERTES

5.1 Généralités

5.1.1 Définition

Les réseaux de distribution ont des fuites qui causent un gaspillage d'eau parfois important et augmentent la consommation d'énergie par unité d'eau effectivement utilisée. En effet, l'eau, avant de s'échapper des conduites, a souvent été pompée. Pour réduire les pertes il faut avant tout les évaluer, surveiller leur évolution, les localiser et enfin les supprimer.

Les pertes d'eau se calculent comme la différence entre la quantité d'eau captée et celle effectivement utilisée. On distingue entre les pertes effectives et les pertes apparentes (figure 11).

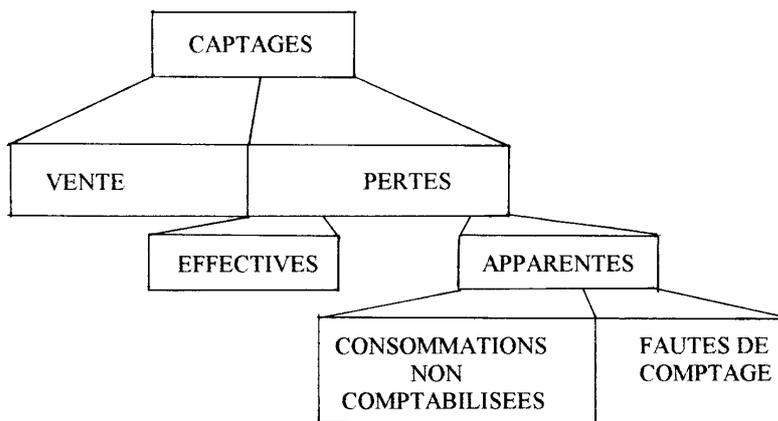


Figure 11
Définition des pertes dans un réseau

Les pertes apparentes sont causées par le fonctionnement imprécis de compteurs (souvent surdimensionnés) pour des débits faibles et par l'utilisation d'eau non comptabilisée par des services communaux (fontaines, pompiers, nettoyage de conduites, de réservoirs et de filtres).

Les pertes effectives sont les quantités d'eau qui, introduites dans le réseau, n'atteignent pas l'utilisateur. L'eau s'échappe de trous ou de fissures dans les tuyaux, de fêlures dans les armatures ou de joints non étanches. Les conduites sont souvent soumises à des tensions provoquées par les mouvements du terrain qui sont à l'origine de ruptures. La paroi des tuyaux est souvent affaiblie par des processus de corrosion.

5.1.2 Données quantitatives

D'habitude les pertes sont chiffrées en pourcent de la quantité d'eau captée. Dans un travail sur l'économie d'énergie, il nous semble plus logique de les exprimer en fonction de la quantité d'eau effectivement utilisée par les abonnés.

L'expression des pertes en fonction de l'eau captée ou vendue n'est pas très utile pour décrire l'état d'étanchéité d'un réseau de distribution et pouvoir faire des comparaisons avec d'autres réseaux, car elle ne permet pas de tenir compte de la longueur des conduites d'un réseau, grandeur qui influence d'une façon déterminante le taux de pertes. L'état d'étanchéité d'un réseau est mieux exprimé avec l'**indice linéaire de perte** V_{sp} , défini comme :

$$V_{sp} = Q_{vr} / (8760 \cdot L_r) \text{ (en m}^3 / \text{h} \cdot \text{km)}$$

où :

Q_{vr} = pertes annuelles (m³/an)

L_r = longueur totale des conduites (km).

D'après des enquêtes faites auprès des Services des eaux de villes allemandes, les pertes spécifiques varient en fonction du terrain comme illustré dans la figure 12. Des pertes avec une valeur située dans la partie inférieure de cette figure sont considérées comme acceptables. Si leur montant se trouve dans la partie supérieure il est recommandé de prendre des mesures pour les réduire.

SPECIFIC WATER LOSS

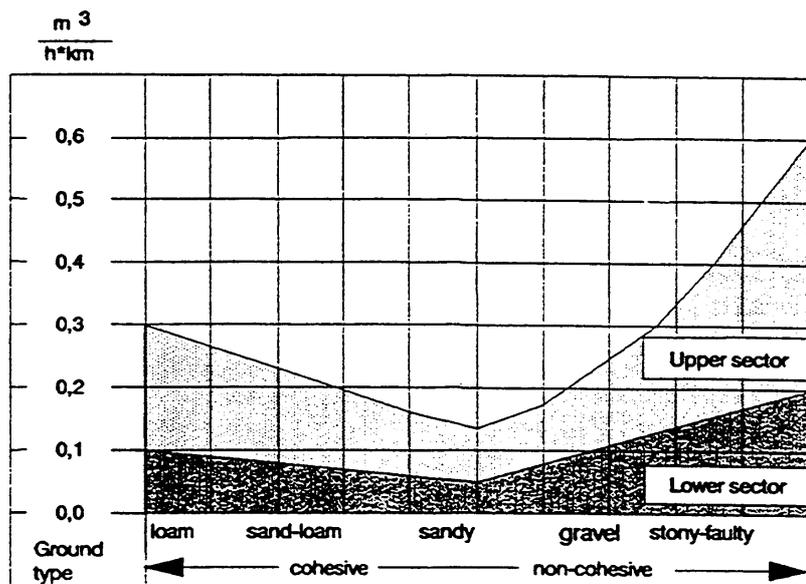


Figure 12: Domaines de variation des pertes dans des villes allemandes en fonction du type de terrain (d'après la réf. 17)

A cause des variations importantes d'altitude, de la présence de nombreuses constructions en pente et de terrains non homogènes, les pertes des petites et moyennes communes suisses sont plus élevées que celles des villes allemandes. Des pertes totales (consommations non comptabilisées comprises) se situant entre 10 % et 15 % sont considérées comme faibles. Selon notre expérience, leur taux atteint souvent de 20 % à 30 % de la quantité effectivement consommée.

Selon la référence 14, page 35, les pertes apparentes dues à des compteurs imprécis sont de l'ordre de 0.1-0.2 m³/km·h et elles peuvent atteindre 3 % de la consommation. Les consommations non enregistrées sont plus difficiles à estimer. Elles dépendent fortement des situations locales, en particulier de la demande des fontaines et des services communaux.

En général on estime que le taux de pertes apparentes se situe entre 2 % et 5 % de la consommation.

5.2 Causes des pertes

5.2.1 Ruptures de conduites

Les pertes ont pour origine des ruptures de conduites dues à des tensions, des trous dans les parois des tuyaux causés par des phénomènes de corrosion et des défauts d'étanchéité dans les joints et les armatures.

Les variations saisonnières de l'humidité du sol, peuvent causer des tassements et affaissements du terrain. Dans des situations de sécheresse ou de gel, le terrain peut se rétracter d'une façon plus ou moins importante, provoquant le fléchissement de conduites et dans certains cas leur rupture (surtout avec les tuyaux en matière peu élastique comme la fonte grise et les plastiques durs). Des glissements de terrain en pente ou des déplacements causés par des constructions peuvent avoir les mêmes effets.

Les conduites de raccordement dans un réseau d'adduction sont presque toujours posées sous le tracé d'une route et ainsi exposées aux tassements de terrain et aux secousses dues au trafic routier, qui peuvent endommager la paroi extérieure d'une conduite (surtout dans les cas d'une pose mal faite, par exemple dans un lit de déblais) et être à l'origine de ruptures.

La rupture de conduites est la cause la plus importante des pertes d'eau dans un réseau de distribution (figure 13).

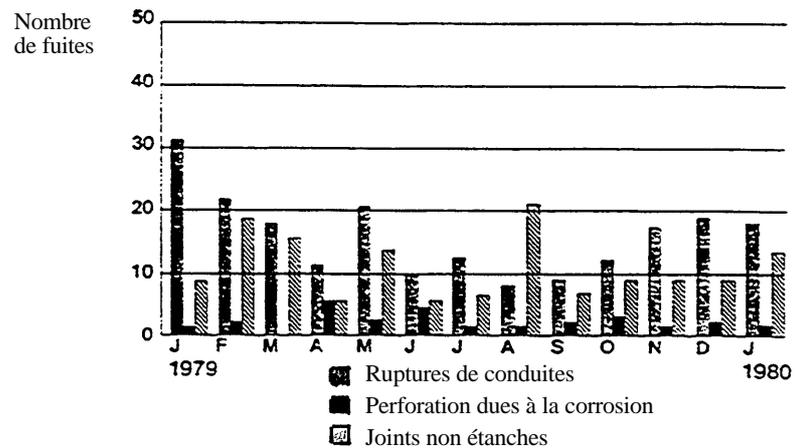


Figure 13
Histogramme des fuites découvertes
à Stuttgart pendant une année
(d'après la réf. 16)

Pour éviter ou diminuer les ruptures de conduites, deux mesures sont particulièrement efficaces :

- l'emploi de tuyaux en matière ductile ;
- la pose des tuyaux dans un lit adéquat rempli de sable ou de gravier non blessant.

5.2.2 La corrosion interne

La composition de l'eau utilisée pour alimenter le réseau de distribution peut donner lieu à des dépôts sur les parois internes des conduites ou les corroder. Les deux phénomènes peuvent poser des problèmes importants, même si le dépôt d'une couche mince de minéraux calcaires ou ferreux peut avoir un effet de protection. Ces phénomènes de dépôt et de corrosion peuvent être facilement évités à l'aide de traitements bien connus (voir 18).

En Suisse il est assez fréquent de trouver dans l'eau captée un pourcentage assez élevé de CO_2 dissous mais non lié, qui rend l'eau agressive. Ce pourcentage peut être réduit par exemple avec de la soude caustique ou en filtrant l'eau à travers des couches de matière dolomitique traitée.

Pour éviter la corrosion interne on protège la paroi avec une couche de matière adéquate. En Suisse on utilise beaucoup, aujourd'hui, des tuyaux revêtus de plastique à l'intérieur .

5.2.3 La corrosion externe

L'inhomogénéité de la composition des matériaux utilisés pour le lit d'une conduite peut causer la formation de potentiels électrolytiques importants qui peuvent être à l'origine de courants de ions à la surface extérieure de la conduite qui avec le temps la corrodent. Ces transports de ions sont facilités par la présence de liquides plus ou moins agressifs comme de l'eau salée.

Les courants vagabonds, importants dans les villes suisses avec des réseaux de tramways (qui fonctionnent avec du courant continu), sont canalisés par les conduites d'eau, grâce à leur haute conductivité, engendrant de fortes différences de potentiel et des courants ioniques entre les conduites elles-mêmes et leur lit.

Dans le passé, les conduites d'eau ont souvent été utilisées pour la mise à terre des installations électriques d'un bâtiment. Ces mises à terre sont encore aujourd'hui à l'origine de phénomènes de corrosion importants. Pour des informations supplémentaires sur la corrosion externe, voir les références 19 et 20.

Les conduites d'eau peuvent être protégées contre la corrosion externe à l'aide des mesures suivantes (réf. 21):

- application d'un mélange bitumineux sur la surface externe;
- enveloppement du tuyau avec un bandage imprégné;
- protection avec des feuilles en plastique;
- pose d'un lit en matériau homogène et de faible conductivité (sable, gravier pour béton);
- réalisation d'une protection cathodique.

5.2.4 Non étanchéité

Les joints entre les tuyaux ou les armatures ont toujours été des points faibles dans un réseau de distribution. S'ils ne sont pas parfaitement étanches, ils se dégradent assez rapidement: s'il y a une petite fuite, l'eau qui en sort, plus ou moins agressive, érode les surfaces en contact et agrandit la fuite.

Les armatures aussi peuvent avoir des pertes. Quand elles sont rarement utilisées, leur emploi peut les rendre non étanches (c'est le cas par exemple des bouches d'incendie).

5.3 Autres facteurs

Le taux de pertes est aussi déterminé par des facteurs de caractère général que nous voulons encore commenter brièvement:

Type de terrain

Il est important de souligner l'importance de la structure et de la composition minéralogiques du terrain. Leur effet sur le montant des pertes, étudié en Allemagne, est illustré dans la figure 12.

Pression hydrostatique

L'usure des installations d'un service d'approvisionnement en eau augmente avec l'accroissement de la pression hydrostatique. Celle-ci a une grande influence sur le taux de pertes: en particulier sur le nombre de pertes, leur dimension et la vitesse de sortie de l'eau. La

figure 14 illustre les résultats d'une enquête réalisée en Angleterre (réf. 24) qui a montré que les pertes augmentent d'une façon plus que proportionnelle en fonction de la pression hydrostatique d'un réseau de distribution. Les résultats de cette étude sont valables probablement seulement pour certains types de réseaux; d'autres auteurs n'ont constaté qu'une dépendance linéaire.

Age des conduites

En règle générale, le taux de pertes dépend fortement de l'état des conduites, qui est en relation avec leur âge et la politique de renouvellement du réseau adoptée par les responsables de son exploitation. On estime que les villes allemandes remplacent en moyenne 2% des conduites de distribution par an. En Angleterre ce pourcentage est nettement inférieur (22). Pour les villes allemandes, le montant des pertes effectives se situe entre 5% et 15%. Celui des villes anglaises est bien plus important, il atteint dans la plupart des cas des valeurs supérieures à 25%.

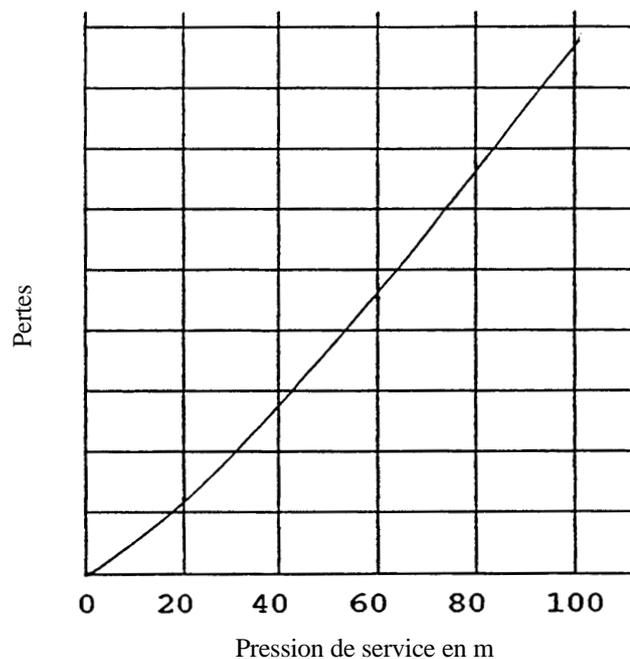


Figure 14
Les pertes en fonction de la pression hydrostatique (réf. 24)

5.4 La détermination des pertes

5.4.1 Calcul des pertes

Les pertes totales sont calculées en faisant la différence entre la quantité captée annuellement et celle distribuée aux abonnés. Pour faire un bilan de ce type il faut que :

- les quantités d'eau distribuées aux abonnés soient relevées par des compteurs. En Suisse cela n'est pas toujours le cas. Il y a encore des communes où les abonnés payent l'eau selon un forfait en fonction de la surface habitée ou du nombre de personnes desservies. Heureusement ces derniers temps la tendance à facturer l'eau selon la consommation effective s'est nettement imposée ;
- les quantités captées soient mesurées. L'eau pompée est pratiquement toujours mesurée. Les captages de sources sont malheureusement moins connus ;
- les pertes apparentes soient connues. Les Services des Eaux en général les surestiment pour réduire le montant des pertes et améliorer l'image de leur service. En général les pertes apparentes sont mal connues. On se limite très souvent à mesurer le débit des fontaines.

Les compteurs sont relevés d'habitude une ou deux fois par an. En pratique le taux de pertes ne peut être déterminé que pour une année. Son calcul n'est pas toujours très précis. Il faut considérer que la lecture des compteurs demande un certain temps et elle n'est pas toujours organisée de façon qu'entre deux dates de lecture il y ait exactement un an de différence. Pour ne pas être trop imprécis il faut essayer d'exécuter les relevés dans des périodes de faible consommation.

Pour avoir un aperçu fiable de l'état d'un réseau, il est utile de connaître l'évolution des pertes sur plusieurs années.

Même si le calcul des pertes comme différence entre l'eau captée et celle distribuée ne permet d'obtenir que la valeur moyenne annuelle, il est important de le faire et de recueillir systématiquement les données nécessaires à cette fin. Le résultat sert entre autres pour des comparaisons avec d'autres réseaux d'approvisionnement en eau, qui seront faites avec avantage à l'aide de l'indice linéaire de perte introduit au début du chapitre.

5.4.2 Débit de nuit

Pour connaître le taux de pertes à un moment déterminé d'une partie du réseau on mesure le débit de nuit, quand la quantité d'eau utilisée par les abonnés est très faible (entre 2.00 - 4.00 heures). Pour obtenir le taux de pertes on enlève de ce débit la consommation des entreprises travaillant la nuit ou utilisant de l'eau d'une façon conti-

nue. Cela peut être le cas pour des restaurants ou des usines travaillant par équipe de relève. Pour déterminer cette consommation il faut contacter les entreprises en question.

Le débit de nuit de l'ensemble d'une zone de pression peut être déterminé d'une façon continue avec la lecture d'un compteur installé à la sortie d'un réservoir (en supposant qu'il soit assez précis). S'il n'y a pas de compteur, la conduite de sortie peut être équipée d'un by-pass sur lequel on installera un petit compteur qu'on fera fonctionner seulement la nuit.

Pour déterminer le débit de nuit d'un secteur plus ou moins limité d'une zone de pression, on utilise normalement un véhicule laboratoire équipé d'une chaîne débitométrique qui mesure le débit entre deux bornes hydrant reliées par une conduite.

Si les données relevées par un service d'approvisionnement en eau ne permettent pas de calculer les pertes, celles-ci peuvent être déterminées avec la mesure du débit de nuit, complétée par le relevé des consommations nocturnes particulières évoquées plus haut.

5.5 Surveillance du réseau

Pour empêcher que les pertes dans un réseau augmentent il faut le surveiller. Si une nouvelle fuite intervient, elle doit être découverte et réparée rapidement. La meilleure façon de surveiller un réseau est de mesurer son débit de nuit (ou ses débits de nuit) d'une façon continue. Les valeurs obtenues doivent être reportées sur des diagrammes en fonction du temps. Cela permet de voir s'il y a un changement soudain qui peut être causé par l'apparition d'une fuite. Les données mesurées peuvent être enregistrées et traitées avec un PC, qui permettra avec le temps de caractériser le débit de nuit des différentes zones de pression. La connaissance des débits de nuit permet en outre de vérifier si les réparations ont été effectuées d'une façon efficace.

5.6 Recherche des fuites

5.6.1 Façon de procéder

La localisation et la réparation d'une rupture de conduite quand l'eau apparaît à la surface du terrain ne posent en général aucun problème et peuvent être exécutées rapidement. Si le calcul annuel du total des pertes ou le relevé des débits nocturnes montrent une augmentation, il faut se décider tôt ou tard à faire une recherche systématique des fuites. Dans ce but on peut procéder de deux façons : on inspecte chaque tuyau (au moins dans les zones où on a constaté le plus de fuites), avec des méthodes d'écoute ou de cor-

relation acoustique, ou on prélocalise d'abord les secteurs où il y a des pertes avec la mesure des débits nocturnes. Dans un deuxième temps on procède à la localisation exacte de l'emplacement des fuites.

5.6.2 Prélocalisation

Pour délimiter d'une façon approximative l'endroit où il y a des pertes (voir 13-17) on partage la zone intéressée en secteurs pouvant être isolés en fermant un certain nombre de vannes de sorte que chaque secteur puisse être alimenté avec une seule conduite d'amenée. A l'aide d'une installation mobile, (figure 15) on mesure le débit de nuit de chaque secteur en reliant deux bornes hydrant, l'une dans l'autre hors de la zone. A partir de ces débits et du relevé des consommations nocturnes particulières (voir 5.4.2) on détermine les pertes par secteur. L'opération est répétée en partageant les secteurs en sous-secteurs jusqu'à pouvoir délimiter l'emplacement d'une perte avec assez de précision.

5.6.3 Localisation

La technique de prélocalisation, décrite au paragraphe précédent, permet de déterminer sur quels tronçons se situe la fuite cherchée. La localisation précise se fait avec des techniques de repérage, que nous exposons brièvement dans ce qui suit (16).

Repérage acoustique

L'eau sortant d'une fuite d'une certaine importance fait un bruit qui peut être repéré acoustiquement avec des appareils adéquats. L'intensité et le type du bruit (en tant que signal acoustique) dépendent du terrain, du genre de tuyau utilisé et des caractéristiques de la fuite. L'écoute était faite autrefois avec des géophones à membrane qui ont été remplacés aujourd'hui par des appareils électro-acoustiques où le signal acoustique est amplifié électroniquement. Avec ces appareils, une première localisation se fait en écoutant sur les conduites ou les armatures les signaux qui y sont transmis. Pour la localisation précise, on passe à l'écoute des vibrations du terrain à proximité de la fuite (figure 16). Le succès de cette méthode dépend beaucoup de l'expérience de l'auditeur. En outre elle ne peut être appliquée qu'en l'absence d'autres bruits (trafic routier, vent, ruisseaux) qui empêchent une réception claire.

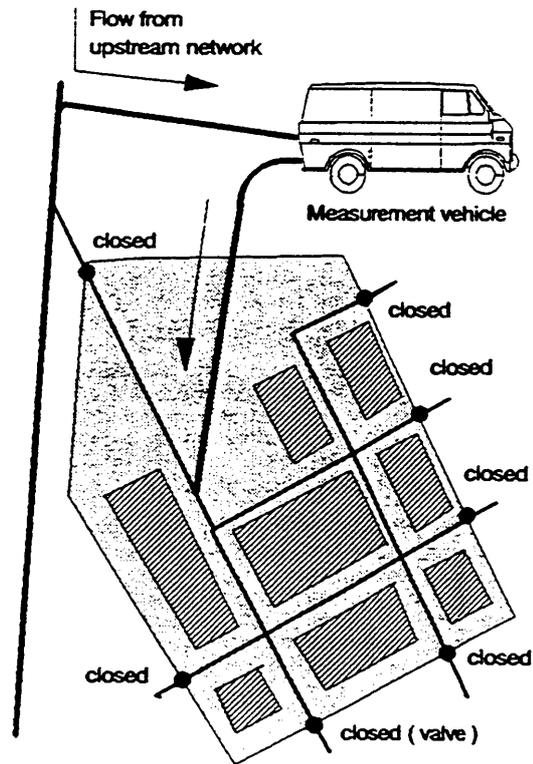
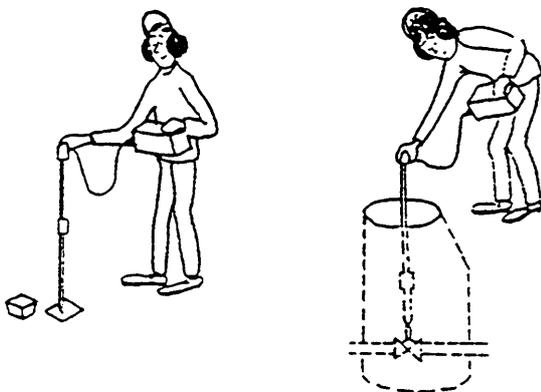


Figure 15
Prélocalisation d'une fuite (réf. 17)

Ecouteur électro-acoustique

Le bruit de la fuite est écouté à travers les vibrations (amplifiées) d'une conduite ou d'une armature



Géophone

Le bruit de la fuite est écouté à travers les vibrations du sol

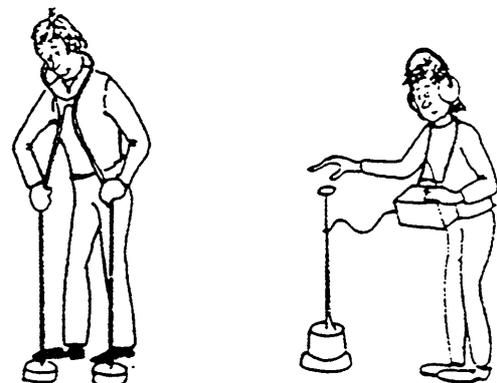
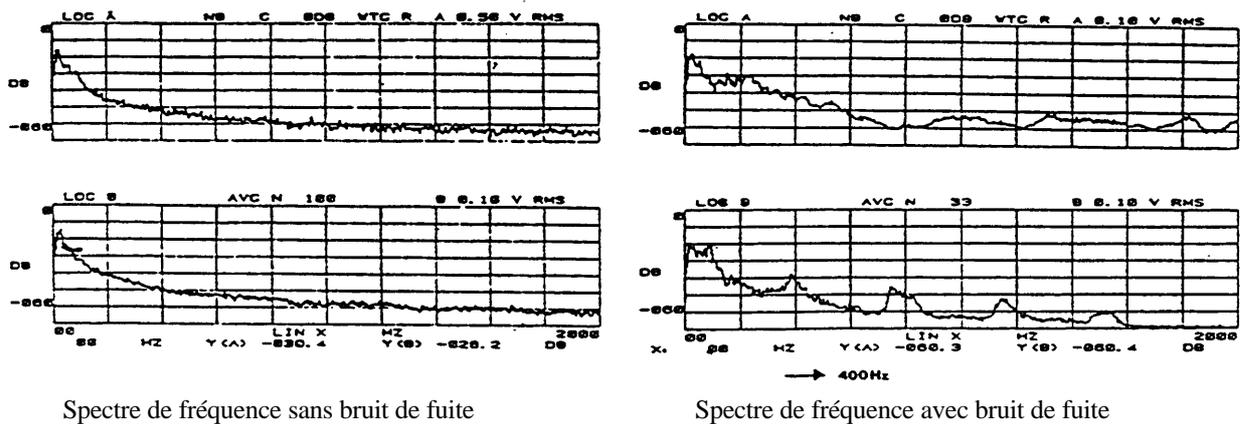


Figure 16
Utilisation d'appareils acoustiques
et électro-acoustiques pour
la recherche d'une fuite
(d'après réf. 16)

L'élaboration de signaux électro-acoustiques

A la place d'amplifier le bruit de sortie de l'eau d'une fuite et de le redonner acoustiquement avec un haut-parleur, les vibrations des tuyaux ou des armatures, transformées en signaux électriques, peuvent être soumises à une **analyse de fréquence** à l'aide d'un ordinateur. A partir de la forme du spectre de fréquence on peut voir s'il y a une fuite dans les environs ou pas.



Spectre de fréquence sans bruit de fuite

Spectre de fréquence avec bruit de fuite

Figure 17

Résultat d'une analyse de fréquence pour la recherche de fuites (réf. 16)

La méthode de corrélation

Sur le tuyau que l'on veut examiner (et où on pense qu'il y a une fuite) on place deux capteurs accélérométriques (éloignés entre eux), qui transforment les vibrations du tuyau en signaux électriques. Avec un ordinateur (voir par exemple 25) ces deux signaux sont comparés. En calculant leur corrélation on détermine dans quelle mesure leur différence n'est due qu'à un changement de phase. Si pour une phase déterminée les signaux sont très proches, on peut admettre que le bruit transmis provient d'une seule source qui peut être la fuite recherchée. D'après la différence de phase, la connaissance de la vitesse du son dans le tuyau examiné et la distance entre les deux capteurs, on peut déterminer exactement l'emplacement de la source de bruit (la fuite). Un avantage important de cette méthode est son indépendance par rapport aux bruits environnants. Si le bruit de sortie de l'eau de la fuite est faible ou la transmission du son dans le tuyau est mauvaise (tuyaux en plastique), les chances de découvrir une fuite diminuent.

Dans un réseau de conduites d'eau, il n'y a pas que des bruits causés par des fuites. Pour affaiblir l'influence de bruits d'autres origines, les signaux acoustiques sont filtrés avant d'être traités. C'est-à-dire que certaines fréquences pouvant provenir d'autres types de bruit sont supprimées dès le départ. Cela permet de baisser le niveau du bruit de fond et d'obtenir des corrélations plus faciles à interpréter.

Mesures de pression

Parfois l'importance d'une fuite peut être déterminée aussi avec des méthodes hydrauliques. En fermant des vannes on peut isoler le secteur avec le tronçon défectueux et on mesure avec un manomètre la chute de pression en fonction du temps. Connaissant le volume des conduites en jeu, on peut calculer le débit de la fuite (23). Si la fuite se trouve sur un tronçon en pente situé plus haut que le manomètre, la pression finale permet de localiser la fuite d'une façon précise.

La fonction de corrélation $F(\tau)$ entre deux signaux $S_1(t)$ et $S_2(t)$ est définie de la façon suivante (voir aussi réf. 25):

$$F(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S_1(t) \cdot S_2(t + \tau) dt$$

En pratique on choisit pour T une période de temps suffisamment grande.

Si $S_1(t)$, $S_2(t)$ sont égaux mais déphasés, il existe une valeur τ pour laquelle $S_1(t) = S_2(t + \tau)$ pour tout t . Pour cette valeur de τ , appelée «différence de phase» on aura $S_1(t) \cdot S_2(t + \tau) \geq 0$ pour tout t et donc $F(\tau) > 0$. Pour toutes les autres valeurs de τ , la valeur de la fonction $F(\tau)$ sera bien plus petite ou négative.

6. DONNEES A RELEVER ET LEUR TRAITEMENT

6.1 Données à relever

Quantités captées et consommation

Le calcul des indices énergétiques et l'élaboration de mesures d'économie d'énergie exigent la connaissance d'une série de données d'un service d'alimentation en eau. Il est particulièrement important de pouvoir disposer au moins des quantités annuelles captées et consommées (par chaque utilisateur), et cela pour chaque zone de pression. Il est aussi utile de déterminer la variation saisonnière du débit des sources (minimum, maximum) et de la hauteur de la nappe phréatique dans les puits.

Les quantités captées dans des puits ou dans les eaux de surfaces sont pratiquement toujours connues parce qu'elles sont pompées et chaque pompe est en général munie d'un compteur. Dans les petites et moyennes communes, le débit capté des sources n'est souvent pas relevé. Dans certains cas il peut être déterminé en faisant la différence entre la quantité livrée au réseau de distribution et celle pompée dans un réservoir. Malheureusement les débits de sortie des réservoirs sont rarement relevés.

La détermination des valeurs annuelles de débits, captages et consommations pose parfois des problèmes parce que des compteurs sont défectueux ou les relevés nécessaires ne sont pas effectués. Pour être bien sûr que les données relevées reflètent la réalité, il est très utile de pouvoir disposer d'une série de données sur plusieurs années, qui permettrait de faire des comparaisons. L'appréciation des consommations non comptabilisées est souvent particulièrement difficile (fontaines, nettoyage des filtres, des tuyaux etc.).

La connaissance des valeurs annuelles des captages et des consommations permet de déterminer le taux de pertes en pourcentage (pv) de chaque zone de pression (voir le paragraphe 6). Ce pourcentage est un indicateur important de l'état d'un réseau.

En plus des captages et des consommations annuelles il est utile de connaître aussi les valeurs suivantes (toujours pour chaque zone de pression) :

- consommation horaire maximale du réseau (pertes comprises);
- consommation horaire minimale du réseau (pertes comprises);
- consommation journalière maximale du réseau (pertes comprises).

D'un point de vue énergétique la connaissance de ces valeurs est utile pour les raisons suivantes :

- détermination du diamètre de la conduite de raccordement qui amène l'eau au réservoir ;
- choix du groupe moteur-pompe ;
- réglage du groupe moteur-pompe ;
- détermination de la capacité du réservoir et de la stratégie de son utilisation.

Autres données

Pour le calcul de l'énergie minimale E_{\min} il est nécessaire de connaître l'altitude des abonnés, qui peut être déterminée à partir des plans du cadastre (si on connaît l'emplacement de chaque abonné). Pour l'étude de changements qu'on désire apporter au réseau (par exemple si on veut partager une zone de pression), il faut disposer de toutes les données nécessaires à l'élaboration d'un projet ou à une simulation (diamètres et longueurs des conduites, coefficients de rugosité etc.)

Pour déterminer la consommation d'énergie, les pertes de charge et les rendements il faut encore connaître :

- la consommation d'électricité ;
- la hauteur de refoulement des groupes moteur-pompe ;
- les débits pompés.

Dans les installations de pompage des petites et moyennes communes il y a souvent un seul compteur d'électricité. On ne peut pas calculer le rendement de chaque pompe à partir de la connaissance de la consommation totale d'électricité, même si le débit de chacune est bien connu. Dans ces cas il est nécessaire d'exécuter des relevés particuliers en faisant fonctionner une seule pompe à la fois.

Traitement des données

Pour faire des comparaisons d'une année à l'autre et pouvoir prévoir l'évolution future, il est important (au moins du point de vue énergétique) d'élaborer les données relevées d'une façon systématique pendant plusieurs années et selon un plan préparé à l'avance. Les élaborations peuvent être faites manuellement à l'aide de formulaires ou avec un ordinateur. Pour chaque zone de pression il faudrait chaque année déterminer au moins les grandeurs suivantes :

- quantité effectivement consommée par chaque abonné ;
- quantité horaire maximale demandée par le réseau ;
- quantité horaire minimale demandée par le réseau ;
- quantité journalière maximale demandée par le réseau ;
- quantités captées ;
- minimum et maximum datés des débits des sources ;
- minimum et maximum datés de la hauteur de l'eau dans les puits ;
- pourcentage de pertes ;
- quantités pompées par les différents groupes moteur-pompes ;

- consommation d'électricité ;
- hauteurs de refoulement maximales ;
- pertes de charge pour les hauteurs de refoulement maximales ;
- rendements des groupes moteur-pompe ;
- indices énergétiques I1 et I2.

Remarque

Les données énumérées plus haut sont celles dont on a besoin pour une analyse énergétique. Il va de soi que la gestion d'un réseau d'alimentation en eau exige aussi la connaissance d'un nombre élevé d'autres données sur les conduites, les branchements, les armatures, les puits, qui ne nous intéressent pas directement ici.

Dans ce contexte nous citerons seulement l'importance (aussi pour un assainissement énergétique) d'une documentation sur les fuites intervenues, constamment mise à jour .

6.2 Le minimum d'information nécessaire

Dans les réseaux moyens et grands, équipés de moyens modernes, les données mesurées localement sont communiquées en temps réel à une centrale qui les traite et les utilise pour des tâches de réglage et la préparation de statistiques.

La réf. 7 décrit les données qu'il faut relever dans un service d'approvisionnement en eau de taille moyenne.

Dans des Services des eaux plus petits, les besoins sont réduits et les moyens à disposition aussi. En règle générale des relevés complets avec transmission et traitement automatique des données ne peuvent pas être pris en considération.

Aujourd'hui, en Suisse, il y a des services (surtout ceux qui disposent de quantités importantes d'eau de source en haute altitude) qui ne relèvent pratiquement pas de données (même pas les consommations des abonnés). D'autres connaissent les consommations, parce qu'ils les utilisent pour facturer l'eau, mais non les quantités captées. D'autres encore déterminent les consommations, les captages et les pertes mais non la demande horaire ou journalière maximale.

Il faut considérer que les compteurs, leur entretien et leur surveillance coûtent cher, les installations de transmission et de traitement des données aussi. Les appareils utilisés ainsi que les relevés à effectuer et à traiter doivent être adaptés aux moyens de chaque service.

Pour pouvoir étudier les possibilités d'économie énergétique il faudrait que chaque zone de pression soit au moins équipée avec les appareils suivants :

- compteurs pour la mesure des captages des sources avec enregistrement du minimum et du maximum ;

- compteurs chez les abonnés ;
- compteurs pour la mesure des quantités pompées ;
- manomètre pour la mesure de la hauteur de refoulement ;
- compteurs d'électricité ;
- compteurs pour la surveillance des débits de nuit.

L'organisation des relevés, leur enregistrement dans des formulaires (si c'est le cas) et le traitement des données selon un plan bien déterminé sont au moins aussi importants que les mesures elles-mêmes.

6.3 L'utilisation d'acquisiteurs de données (data loggers)

Acquisiteurs sans mémoire externe

Les acqui-siteurs sont des petits calculateurs qui enregistrent des données (en transformant éventuellement un signal analogique en digital), peuvent exécuter des opérations (le calcul du minimum et du maximum par exemple) et mémoriser un certain nombre d'informations. Ils disposent en général d'un petit clavier, d'un petit écran et de plusieurs entrées pour les signaux provenant des appareils de mesure. Leurs possibilités de mémorisation sont souvent assez limitées. Dans les services d'approvisionnement en eau les acqui-siteurs peuvent être employés pour tout type de travail. Ils ont le grand avantage de permettre d'utiliser au maximum l'information livrée par des compteurs ou autres appareils de mesure (ils sont indispensables par exemple pour déterminer la variation d'un débit de nuit). Si un acqui-siteur est équipé d'une imprimante il peut redonner graphiquement l'évolution d'une grandeur dans le temps. Ce qui facilite beaucoup le travail de surveillance.

Acquisiteurs avec mémoire externe

Un acqui-siteur peut être muni d'une mémoire externe (disquette, cassette, carte à mémoire) sur laquelle peuvent être enregistrées toutes les données qu'il reçoit ou transforme et qui seront traitées périodiquement avec un PC pour le calcul des valeurs dont le Service des eaux a besoin (débits horaires, journaliers, mensuels, débit minimum, maximum etc.).

Ces acqui-siteurs sont bon marché, robustes et faciles à utiliser. Il sont installés localement auprès des compteurs. S'il ne sont pas reliés à une centrale, les données qu'ils ont mémorisées et traitées doivent être recueillies de temps en temps par un employé du Service des eaux.

Centrale des données

Les réseaux d'alimentation importants et complexes doivent pouvoir être surveillés en temps réel. Dans ce but les appareils de mesure sont reliés par câble, téléphone ou radio à une centrale qui entre autres remplit les tâches suivantes :

- description de l'état des installations en temps réel (à l'aide de dessins, schémas, graphiques ou de séries de valeurs);
- description de l'évolution passée avec des représentations graphiques;
- contrôle d'un dépassement éventuel de valeurs limites;
- émission de signaux d'alarme;
- réglage de pompes, réservoirs, vannes et clapets;
- élaboration de statistiques (voir réf. 7).

6.4 Les données à relever, leur préparation et leur traitement dans un Service des eaux important et moderne

Un grand Service des eaux avec plusieurs points de captage, différentes installations de pompage, plusieurs stations de traitement et de nombreux réservoirs doit être aujourd'hui surveillé, réglé et géré à partir d'une centrale. Cela permet entre autres de gérer les réservoirs d'une façon économiquement optimale en pompant quand les tarifs électriques sont les plus bas. Les données à relever, préparer, transmettre et traiter peuvent atteindre un degré de complexité remarquable. Le traitement des données est rendu encore plus difficile par les exigences de transmission de signaux pour les réglages locaux et les techniques utilisées pour garantir une fiabilité élevée.

Les systèmes de contrôle et de réglage du service d'approvisionnement en eau de Zurich, par exemple, travaillent sur 4 plans (réf. 26) interconnectés :

1) Plan des appareils et instruments : se compose de soft- et hardware, avec les unités de travail de base comme moteurs, pompes, vannes, clapets etc., leur état de fonctionnement, les possibilités de réglage etc.

2) Plan des installations : contient les informations sur des installations complètes (composées d'un nombre déterminé d'appareils et instruments) comme les filtres, les installations d'ozonation et de pompages, les réservoirs etc.

3) Plan des ordinateurs d'usine : il s'agit d'ordinateurs locaux qui gèrent les données de plusieurs installations, les traitent et les communiquent à l'ordinateur central, duquel ils reçoivent les informations pour le réglage des installations gérées.

4) Plan de la gestion centralisée : c'est le cœur du système dont les tâches peuvent être résumées comme il suit (26) :

- surveillance permanente et réglage de la qualité et des quantités d'eau distribuées;
- visualisation des états de fonctionnement;
- gestion d'états particuliers et d'alarme;

- élaboration de statistiques, bilans et rapports ;
- archivage.

L'alimentation en eau doit être assurée dans chaque situation. La disponibilité du système est garantie par une série de mesures, comme les suivantes :

- l'ordinateur central est doublé ;
- un système d'information et de transmission de données indépendant peut remplacer des liaisons défilantes entre ordinateur central et ordinateurs locaux ;
- les installations locales peuvent fonctionner automatiquement d'une façon indépendante ;
- le fonctionnement automatique des installations locales peut être remplacé par un fonctionnement manuel.

La mise en place d'un système de réglage et de gestion nouveau dans un grand service d'alimentation en eau est toujours problématique, parce qu'elle doit être faite en parallèle avec le système ancien encore en place, qui garantit lui, pendant la période d'essai, le fonctionnement du service.

7. L'ANALYSE ENERGETIQUE D'UN RESEAU D'ADDITION

7.1 Procédé

Dans ce chapitre nous montrons, à l'aide d'un exemple, comment il faut procéder pour faire une analyse des possibilités d'économie énergétique dans un service d'alimentation en eau. Nous avons choisi un service assez grand (celui de Lugano-Massagno) pour être en mesure d'illustrer d'une façon exhaustive les difficultés qui peuvent se présenter et les résultats que l'on peut obtenir. L'analyse est faite en plusieurs phases. On expose d'abord le fonctionnement du réseau d'adduction dans ses grandes lignes, avec ses captages, stations de pompage, stations de traitement, réservoirs et zones de pression. Dans un deuxième temps, on calcule les indices énergétiques (une attention particulière est prêtée à la recherche et préparation des données nécessaires à ces calculs). La dernière phase est consacrée à l'analyse des facteurs qui déterminent la consommation énergétique ainsi qu'à l'élaboration de mesures pour économiser de l'énergie et en diminuer les coûts.

7.2 Description du service d'alimentation en eau de Lugano-Massagno

Le territoire desservi par ce service s'étend entre le Cassarate (une rivière), le lac et le sommet de la colline située entre la ville de Lugano et la plaine du Vedeggio (voir la figure 18).

Dans cette région se trouvent :

- 25 200 habitants ;
- 29 900 places de travail ;
- 3800 lits d'hôtels ou de maisons de vacances.

Le territoire de la ville de Lugano à l'est du Cassarate n'est pas desservi par ce réseau d'adduction. Il s'agit des anciennes communes de Castagnola, Aldesago et Brè, intégrées il y a plus de vingt ans dans la ville de Lugano et qui ont conservé leur ancien service d'approvisionnement.

L'altitude des zones desservies par le réseau d'adduction en question varie entre 270 m (hauteur du plan de l'eau du lac) et 420 m. Pour éviter des pressions de service trop élevées l'ensemble du réseau est partagé en plusieurs zones de pression (figure 18), dont la plus importante est la Zona Bassa avec le centre de Lugano et le bord du lac. Le nord, au fond de vallée, à l'ouest du Cassarate, est occupé par les deux zones de Cornaredo et Cornaredo ridotta. La Zona Media couvre la partie inférieure de la pente de la colline sur laquelle s'étend la ville. L'altitude de cette zone varie d'une façon assez importante et dans ses endroits les plus bas, les pressions de

service dépassent 10 bar. La zone Alta ridotta dessert un petit territoire au-dessus de la ligne de chemin de fer et de la gare, son altitude varie peu et la pression de service y atteint à peine 7 bar. La zone Alta est topographiquement irrégulière. La pression de service peut y être élevée et varie entre 9 et 13 bar.

7.3 Captages, réservoirs et distribution

Les services d'approvisionnement en eau de Lugano utilisent de l'eau de source et de la nappe phréatique. La première, provenant des sources Cusello du Monte Tamaro, est recueillie avec un système étendu de captages et transportée le long de la vallée du Vedeggio jusqu'au réservoir de Massagno (figure 18).

L'eau souterraine est captée à l'aide des puits Manno I et Manno II dans la plaine du Vedeggio (à l'ouest de Lugano). En 1992 il n'y avait pratiquement que le puits de Manno II qui fonctionnait.

En 1992 les quantités suivantes ont été captées :

- eaux souterraines 6 347 000 m³
- eaux de source 2 505 000 m³

L'ensemble de l'eau captée passe à travers des filtres de matériau dolomitique traité pour neutraliser l'agressivité de l'anhydride carbonique dissoute. L'eau souterraine est filtrée en partie dans la station de traitement de Massagno et en partie dans celle de Bioggio. La première s'écoule ensuite dans le réservoir de Massagno, l'eau traitée à Bioggio est pompée dans celui de Gemmo (figure 19).

La capacité de filtrage est importante, elle suffit pour couvrir la demande horaire maximale de l'ensemble du réseau de distribution. Bioggio a une capacité de filtrage de 600 l/s et Massagno de 500 l/s.

Les Services des eaux de Lugano approvisionnent en eau non seulement le territoire des communes de Massagno et de Lugano mais également plusieurs communes proches de la ville. La figure 19 montre à partir de quel point du réseau l'eau est fournie à ces communes. En 1992 la part de l'eau captée a été de 8 852 000 m³ dont 2 947 000 m³ ont été vendus aux communes avoisinantes. La demande du réseau étudié a été donc de **5 905 000 m³**.

Comme il a déjà été évoqué, l'eau des sources Cusello et une partie de l'eau captée dans le puits de Manno II sont traitées à Massagno et alimentent à partir de ce réservoir la zone Media et le réservoir Ronchetto par écoulement gravitaire. A travers un certain nombre de réducteurs de pression entre les zones Media et Bassa (figure 19), la même eau peut atteindre aussi la zone Bassa. D'autre part l'eau du réservoir de Massagno est pompée dans celui de San Rocco, qui alimente les zones Alta et Alta ridotta ainsi qu'un cer-

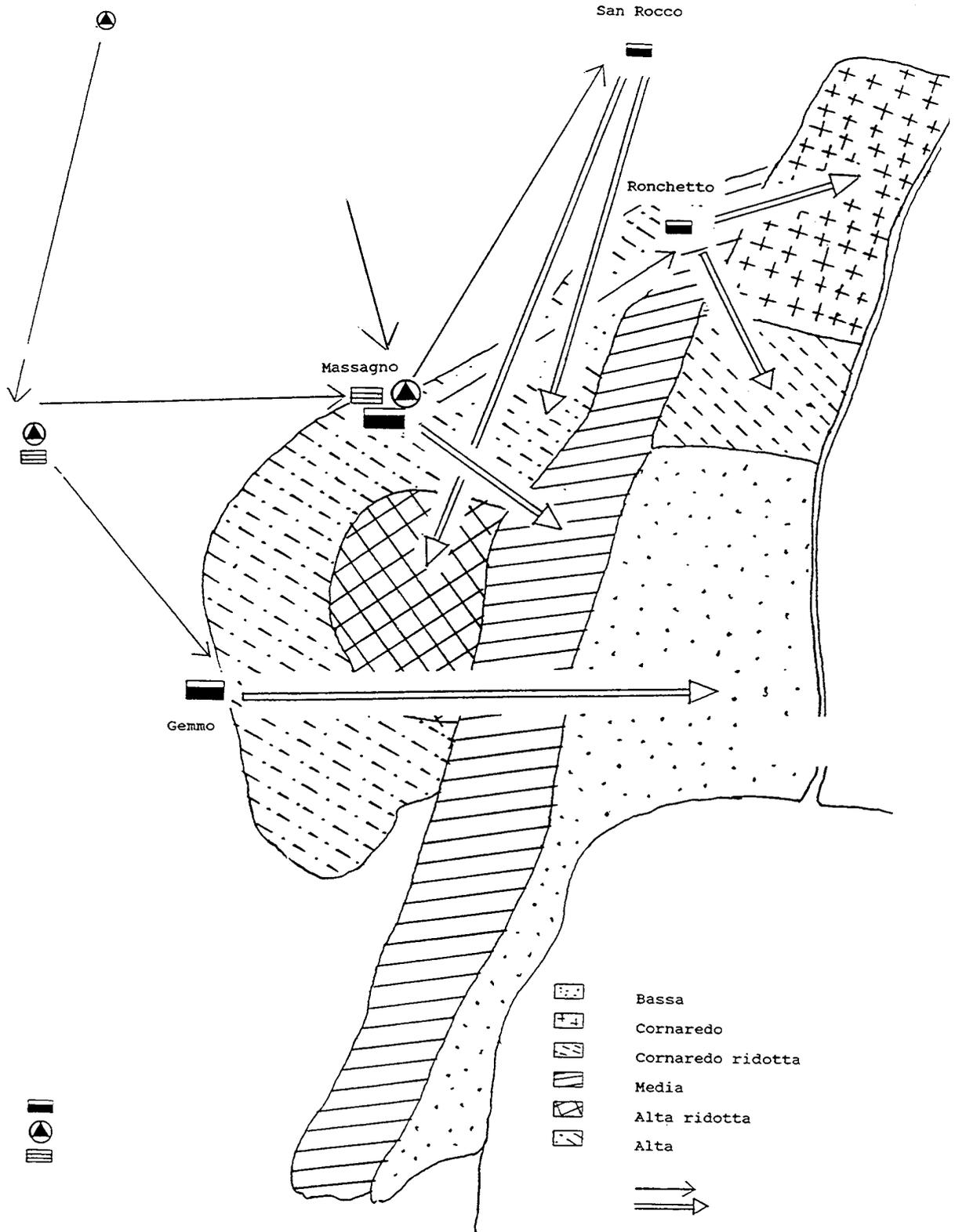


Figure 18
 Service d'alimentation en eau de
 Lugano-Massagno
 Zones de pression, réservoirs,
 stations de pompage de traitement

tain nombre de communes avoisinantes. Le réservoir de Ronchetto dessert les zones de Cornaredo et de Cornaredo ridotta.

Le reste de l'eau captée à Manno II est pompé au réservoir de Gemmo, qui alimente en eau la Zona Bassa. Le réseau d'adduction de Lugano-Massagno (territoire à l'ouest du Cassarate) dispose en tout de 4 réservoirs dont les caractéristiques sont présentées dans la référence 31, Annexe 1.

7.4 Utilisation de l'eau et pertes

Les quantités d'eau vendues aux abonnés peuvent être déduites de la réf. 1. Avec les données à disposition il ne nous a pas été possible de déterminer la consommation publique comptabilisée du réseau d'adduction considéré, car cette consommation est connue seulement pour l'ensemble du territoire de Lugano-Massagno qui comprend deux services d'alimentation en eau : celui à l'ouest du Cassarate et celui à l'est (voir le paragraphe 7.1). Nous l'avons calculée en admettant que les consommations publiques comptabilisées des deux réseaux sont proportionnelles aux quantités d'eau vendues à leurs abonnés. Pour 1992 nous avons ainsi obtenu une consommation totale de **4 911 000 m³** (comme consommation totale nous entendons la somme des quantités reçues et comptabilisées par les utilisateurs).

En faisant la différence entre la quantité d'eau introduite dans le réseau et celle reçue par les utilisateurs, nous avons pu déterminer le montant annuel des pertes, qui a été en 1992 de **20.2%** (quantités consommées et non comptabilisées comprises).

7.5 La consommation d'électricité

Les stations de pompage du réseau d'adduction étudié ont consommé en 1992 les quantités d'électricité suivantes :

- Station de Manno II 581 505 kWh
- Station de Bioggio 3 243 040 kWh
- Station de Massagno 1 975 170 kWh

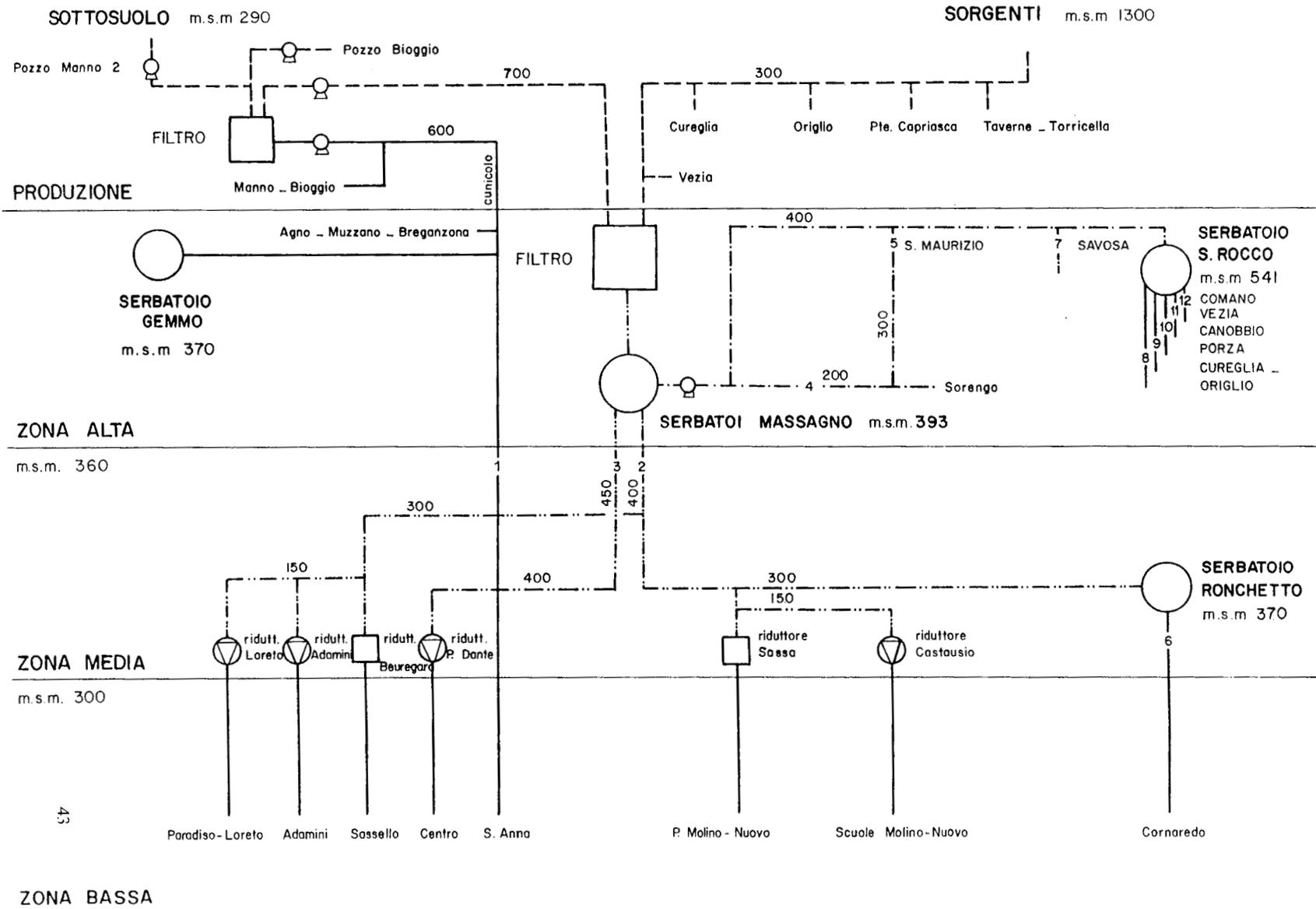


Figure 19
Schéma du service d'alimentation en eau de Lugano-Massagno

Dans ces quantités est aussi comprise l'énergie de pompage des volumes d'eau vendus aux communes avoisinantes. 34% de l'eau pompée à Manno II et à Bioggio leur est destinée. Dans la station de pompage de Massagno ce pourcentage augmente à 58%. En déduisant des totaux de chaque station l'énergie consommée proportionnelle à ces pourcentages on obtient :

Station de Manno II	$581\,505 \cdot 0.66$	$=$	384 000 kWh
Station de Bioggio	$3\,243\,000 \cdot 0.66$	$=$	2 140 000 kWh
Station de Massagno	$1\,975\,000 \cdot 0.42$	$=$	829 000 kWh
Total			<u>3 353 000 kWh</u>

Tant la station de Manno II que celle de Bioggio achètent leur électricité à l'Azienda elettrica Lugano. Cette société ainsi que les Services des eaux appartiennent au groupe Aziende industriali Lugano. A cause de cela les Services des eaux ne payent pas l'électricité (c'est-à-dire ils ne la payent que symboliquement avec un centime le kWh). Par contre la station de pompage de Massagno, située sur le territoire de cette commune et desservie par l'Azienda elettrica Massagno, doit payer l'électricité selon aux tarifs habituels.

L'énergie consommée pour le traitement de l'eau est comprise dans les quantités indiquées plus haut. Une simple estimation montre qu'elle ne dépasse pas 2 ou 3% du total.

7.6 Indices énergétiques

E_{min}

Selon le chapitre 3, l'énergie minimale E_{min} est définie comme il suit :

$$E_{min} = E_{pv} - E_{pq} + E_{nd}$$

où :

E_{pv} = Energie potentielle (par rapport au niveau de la mer) à la consommation, de l'eau effectivement utilisée par les abonnés (sans volumes non comptabilisés), en kWh

E_{pq} = Energie potentielle (par rapport au niveau de la mer) au captage, de l'eau effectivement utilisée par les abonnés (sans volumes non comptabilisés), en kWh

E_{nd} = Energie théorique pour mettre l'eau utilisée à une pression de 6 bar chez l'utilisateur, en kWh.

Pour calculer l'énergie minimale E_{min} (voir le chapitre 3), nous avons d'abord estimé les consommations par nœud du réseau pour 1992 à partir de celles de 1984 (publiées dans la réf. 2) et de l'évolution de la consommation totale entre 1984 et 1992.

L'énergie potentielle totale E_{pv} se calcule en sommant les énergies potentielles des consommations à chaque nœud (voir chapitre 3, formules encadrées). Le tableau suivant donne les consommations et les énergies potentielles à la consommation pour chaque zone de pression (année 1992).

Zone	Quantités utilisées Q_V (en 1000 m ³)	E_{pv} (en 1000 kWh)
Bassa	2154	1720
Cornaredo rid.	484	386
Cornaredo	329	272
Media	874	788
Alta rid.	110	109
Alta	960	1059
Total	4911	4332

Tableau 1
Energie potentielle E_{pv} chez les consommateurs de l'eau effectivement utilisée

Nous avons donc :

$$E_{pv} = 4332 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

Pour calculer l'énergie potentielle E_{pq} (au captage) des quantités d'eau effectivement consommées, il est indispensable de connaître l'altitude précise des captages. La détermination du niveau moyen du plan de l'eau dans le puits de Manno II nous a posé quelques difficultés, parce que le rabattement varie fortement en fonction de la saison et du débit capté. Nous avons été obligés de nous satisfaire d'une estimation assez grossière (276 m.). Les quantités d'eau captées sont indiquées dans le tableau 2.

Le calcul de E_{pq} a été fait à partir des données des deux premières colonnes du tableau 2 (les valeurs de $(Q_E)_k$ et de H_k). Pour l'eau de source, provenant du Tamaro nous avons admis comme hauteur de captage celle du réservoir de Massagno. Les pertes en pourcentage de l'eau effectivement utilisée pv ont été en 1992 de 20.2% (comme calculé précédemment).

	Eau captée (en m ³)	Altitude (en m)	Energie potentielle (en 1000 kWh)
Eau souterraine (Manno II)	4 190 000	276	2673
Eau de source (Massagno)	1 647 000	393	1496
Sorengo (Echange)	68 000	340	54
Total			4223

Tableau 2
Energie potentielle aux captages (1992)

Nous obtenons :

$$E_{pq} = 4223 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

$$E_{nd} = 4911 / 3.6 \cdot 60 \cdot 9.81 = 803 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

Il s'ensuit:

$$E_{\min} = E_{pv} - E_{pq} + E_{nd} = (4332 - 4223 + 803) \cdot 10^3 = 912 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

FE_{\min} se laisse calculer d'une façon analogue (voir chapitre 3):

$$FE_{\min} = (3609 - 3323 + 679) \cdot 10^3 = 965 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

D'après 7.4:

$$E = 3.353 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

I1

Selon le chapitre 3, l'indice I1 est défini comme il suit:

$$I1 = E_{\min} / Q_v$$

Il en résulte :

$$I1 = 912 / 4911 = \mathbf{0.19 \text{ kWh/m}^3}$$

I2

D'après le chapitre 3 :

$$I2 = E / FE_{\min}$$

Il en résulte :

$$I2 = 3.353 / 965 = \mathbf{3.47}$$

7.7 Facteurs déterminants

I2 indique le rapport entre l'énergie effectivement utilisée et celle qu'il faut en tout cas dépenser pour le transport et la mise en charge de l'eau, même si les rendements sont égaux à 1 et les pertes nulles.

Comme exposé au paragraphe 2.2, un certain nombre de facteurs, qu'on appelle «facteurs déterminants» influencent d'une façon décisive la consommation énergétique et par cela l'indice I2. Une analyse de ces facteurs nous permettra d'expliquer la valeur de I2 et d'élaborer un certain nombre de mesures d'économie énergétique.

Réservoirs

La zone de pression la plus importante, la Zona Bassa, se trouve à une altitude moyenne de 280 m. Elle est surtout desservie à partir du réservoir de Gemmo à l'altitude de 370 m. Cette différence d'altitude est trop importante et cause une surconsommation d'énergie importante. La position élevée de Gemmo est due au fait que l'eau captée dans la plaine du Vedeggio doit être transportée au-dessus de la colline entre la ville de Lugano et le puits de captage. La hauteur de la colline détermine celle du réservoir de Gemmo. De même pour les zones de pression de Cornaredo et

Cornaredo ridotta qui se trouvent à une altitude d'environ 290 m et sont desservies par le réservoir de Massagno dont l'altitude est de 393 m.

La Zona Alta, à une altitude moyenne de 390 m, et la Zona Alta ridotta sont alimentées par le réservoir San Rocco, qui fournit aussi l'eau à plusieurs autres communes des alentours. San Rocco est situé à une altitude de 541 m, altitude qui est beaucoup trop élevée pour les deux zones alimentées.

La structure du réseau d'adduction en eau de Lugano avec le transport de l'eau sur la colline qui sépare la vallée du Cassarate de celle du Vedeggio et l'altitude nettement trop élevée du réservoir San Rocco ont un effet négatif sur la consommation énergétique.

Conduites d'adduction aux réservoirs

Les conduites d'adduction aux réservoirs ont un diamètre largement suffisant. Même avec un débit qui atteint la demande horaire maximale du réseau, leur perte de charge est très faible (voir le tableau suivant).

Conduite d'adduction	Capacité (l/s)	Perte de charge (bar)	Rugosité (mm)
Manno II - Bioggio	800	0.3	1.0
Bioggio - Massagno	400	0.4	1.0
Bioggio - Gemmo	250	0.9	1.0
Massagno - Ronchetto (300 mm)	90	1.1	0.5
(150 mm)	20	0.8	0.5
Massagno - San Rocco (sans alimentation directe du réseau)	150	0.6	0.5
Massagno - San Rocco (avec les alimentations directes suivantes: - au réd. San Maurizio: 40 l/s - au réd. Massagno: 70 l/s)	90	0.3	0.5

*Tableau 3
Capacité et perte de charge des
conduites d'adduction*

Les pertes de charge en cas de pompage ont une certaine importance seulement pour la conduite de raccordement entre Bioggio et Gemmo. Il en résulte qu'elles ont très peu d'influence sur la valeur de l'indice I2.

Pompes

Nous avons déterminé les valeurs moyennes annuelles des rendements des stations de pompage à partir de la quantité pompée et de l'électricité consommée. Les données concernant les caractéristiques des groupes moteur-pompe utilisés sont indiquées dans l'annexe 2 de la réf. 31.

Le plan d'eau du puits de Manno II varie beaucoup, et d'une façon mal connue, en fonction des quantités pompées. Il est dans ces conditions difficile de déterminer le rendement moyen annuel de la station de pompage de Manno II. Nous nous sommes limités à une estimation en supposant une hauteur de refoulement de 22 m. En 1992, 6 357 000 m³ d'eau furent pompés et la consommation électrique atteignit 581 705 kWh. Cela donne un rendement moyen de 0.67. Si l'on compare ce rendement à ceux de la figure 8 (chapitre 4) on voit que théoriquement il pourrait être augmenté de 10% (toujours en supposant que nos estimations soient correctes).

Dans la station de Bioggio, il y a deux groupes moteur-pompe. Le premier alimente en eau le réservoir de Massagno et le deuxième celui de Bioggio. A Massagno en 1992, 3 760 000 m³ ont été pompés avec une hauteur de refoulement de 114 m. A Bioggio, 2 560 000 m³ avec 99 m de hauteur de refoulement. Le comptage de ces volumes avait posé des problèmes en 1992 et les valeurs obtenues ne sont probablement pas très précises. La consommation d'électricité fut de 3 243 040 kWh (dans ce montant est comprise l'énergie pour le lavage des filtres et l'entraînement des ventilateurs). Il en résulte un rendement global et moyen légèrement supérieur à 0.58. Une mesure instantanée du rendement a donné une valeur de 0.61, en accord avec les valeurs moyennes calculées sur toute l'année. En comparaison avec les données de la figure 8 (chapitre 4) ce rendement nous semble relativement bas surtout en tenant compte des débits qui sont assez importants.

La station de Massagno a pompé 2 803 000 m³ dans le réservoir de San Rocco, ou directement dans le réseau, avec une hauteur d'alimentation de 155 m. La consommation d'électricité a été de 1 975 170 kWh, ce qui donne un rendement moyen des groupes moteur-pompe de 0,61. Ici aussi le rendement moyen effectif est sûrement supérieur, parce que l'énergie utilisée par la station de traitement n'a pas été comptée séparément. Une mesure instantanée du rendement a donné une valeur de 0.64.

L'analyse des rendements des stations de pompage montre que ceux-ci peuvent être améliorés. En cas de remplacement, les possibilités effectives devraient être précisées à l'aide d'une étude approfondie.

Pertes

Au paragraphe 7.3 les pertes ont été estimées à 20.2% des quantités d'eau *effectivement utilisées*. Cette estimation n'est pas précise à cause de l'incertitude dans l'attribution à l'un des deux réseaux des quantités d'eau (comptabilisées) consommées par les services communaux, qui ne sont connues que globalement. Nous rappelons que l'ensemble du territoire de la ville est desservi par deux réseaux: celui de Lugano-Massagno (étudié ici) et celui de Castagnola - Aldesago - Brè. En plus nous ne connaissons pas les quantités d'eau consommées par les services communaux et non comptabilisées (fontaines etc.), qui s'ajoutent ici aux pertes.

Si une analyse approfondie confirme que les pertes atteignent 20.2% il faudrait faire un effort pour les réduire (voir chapitre 5).

7.8 Mesures d'économie énergétique

Le réservoir de San Rocco se trouve à une altitude trop élevée pour approvisionner en eau les zones Alta et Alta ridotta. Celles-ci pourraient être alimentées directement à partir du réservoir de Massagno avec des groupes moteur-pompe à vitesse variable. Elles resteraient raccordées aux réservoir de San Rocco par des réducteurs de pression mis en service en cas de nécessité (interruption de courant, incendie, situation de forte demande etc.).

En 1992 la station de pompage de Massagno a consommé 829 000 kWh pour alimenter les zones Alta et Alta ridotta. Un approvisionnement direct avec des pompes à vitesse variable pourrait permettre d'économiser **500 000 kWh**. Les investissements nécessaires pour la partie centrale et la partie ouest de ces zones seraient faibles. Par contre pour la partie est (hôpital) il faudrait poser une nouvelle conduite principale.

Dans le but de pouvoir régler le débit pompé, les Services des eaux vont installer prochainement des pompes à vitesse variable dans la station de Manno II. Cela permettra probablement aussi d'augmenter les rendements, qui aujourd'hui ne sont pas optimaux à cause de la variation importante de la hauteur du niveau d'eau dans le puits.

En vue du remplacement éventuel des groupes moteur-pompe de la station de Bioggio, il faudrait étudier dans quelle mesure la consommation d'électricité peut être réduite en utilisant des moteurs électriques et des pompes à haut rendement.

Une recherche systématique des fuites et le remplacement des conduites vieilles et abîmées devraient permettre de réduire les pertes. Dans le cadre de la nouvelle centrale de traitement des données et de commande dont la réalisation est prévue, il faudrait relever et enregistrer les débits de nuit de chaque partie du réseau pour permettre de surveiller l'évolution des pertes dans le temps.

7.9 La production d'électricité

En 1992 la demande journalière moyenne de l'ensemble du réseau a été de 16 200 m³. Le rapport entre la demande journalière maximale et celle journalière moyenne a été d'environ 1.5. C'est-à-dire la demande journalière maximale a atteint 24 300 m³ ou en moyenne 281 l/s.

Entre les sources de Cusello et le réservoir de Massagno il y a une différence d'altitude importante. Son utilisation pour produire de

l'électricité a déjà fait l'objet d'études approfondies et nous ne nous occuperons pas de cette question ici (nous avons d'ailleurs admis pour notre analyse que le captage de l'eau de source se fait au réservoir de Massagno).

Sur la conduite de raccordement entre le réservoir de Gemmo et la Zona Bassa est installé aujourd'hui un réducteur de pression pour diminuer la pression de service. Il faudrait étudier si à la place de ce réducteur on ne pourrait pas installer un groupe turbine-générateur pour récupérer de l'électricité. Le débit moyen est de 80 l/s et la différence de niveau utilisable est d'environ 20 m. En admettant un rendement de 0.7 un tel groupe pourrait produire annuellement : $80 \cdot 20 \cdot 0.7 \cdot 9.8 \cdot 24 \cdot 365 / 1000 \cong 96\,000 \text{ kWh}$

Nous pensons que le raccordement du réservoir de Massagno avec celui de Ronchetto se prête moins bien à une opération de ce genre : il est trop long et les pertes de charge sont trop élevées.

Il est peut-être aussi possible de récupérer de l'électricité sur les raccordements entre le réservoir de San Rocco et les réseaux d'alimentation en eau des communes avoisinantes.

7.10 Alimentation des réservoirs pendant la nuit

A l'aide des données de la réf. 2 on peut déterminer la demande journalière moyenne de chaque zone de pression. En admettant que le rapport entre la demande horaire maximale et la demande horaire moyenne de la journée avec la demande maximale soit de 1.5, nous pouvons aussi déterminer pour chaque zone la demande horaire maximale. Les résultats de ce calcul sont exposés dans le tableau suivant :

Zone	Demande journalière moyenne (m ³)	Demande horaire maximale (l/s)
Bassa	7109	185
Cornaredo rid.	1591	41
Cornaredo	1080	28
Media	2870	75
Alta rid.	363	10
Alta	3187	83
Total	16 200	422

La comparaison entre les tableaux 3 et 4 ainsi que la prise en considération d'autres données montrent que la capacité des installations de pompage, de traitements et des conduites de raccordements peut satisfaire sans problème les demandes horaires maximales des différentes zones. Aussi les exigences imposées par la lutte contre les incendies peuvent être satisfaites directement sans recourir aux

Tableau 4
Demande des différentes zones de pression de Lugano-Massagno

réservoirs (réf. 4). Dans ces conditions, une bonne partie de la capacité de ces derniers peut être utilisée pour déplacer une partie appréciable de la consommation d'électricité dans la période nocturne.

La Zona Bassa soutire au réservoir de Gemmo en moyenne 5000 m³ par jour. Le réservoir a aussi une capacité de 5000 m³. Cela veut dire que lors d'une journée moyenne, il suffit que l'alimentation du réservoir soit faite pendant la nuit. Cela vaut aussi (dans une moindre mesure) pour le réservoir Ronchetto.

L'eau de source coule dans le réservoir de Massagno. Pour éviter un trop plein il faut que son alimentation par les pompes soit réglée en conséquence.

Au réservoir San Rocco (et directement dans le réseau) on pompe en moyenne 7 660 m³ par jour avec une hauteur de refoulement de 155 m. Cette quantité diminue de moitié si on pompe directement dans le réseau avec des pompes à vitesse variable. Le réservoir a une capacité de 3 800 m³. Il faut déterminer, en collaboration avec les communes avoisinantes, dans quelle mesure le pompage peut être fait de nuit.

La société de distribution de l'électricité de la ville de Lugano applique aux consommateurs publics les tarifs suivants :

	Eté	Hiver
Jour	16 cts/kwh	17 cts/kwh
Nuit	9.5 cts/kwh	10.5 cts/kwh

A partir de ces tarifs le déplacement d'une partie de la consommation diurne d'électricité dans la période nocturne pourrait permettre d'épargner entre Fr. 100 000.– à Fr. 200 000.– par an.

8. ANALYSE DE QUELQUES EXEMPLES ET INTERPRETATION DES RESULTATS

8.1 Buts de l'analyse

L'étude d'exemples concrets devait permettre de :

- mieux connaître les difficultés qui se présentent quand on veut se procurer les données nécessaires pour calculer des indices énergétiques et rechercher les possibilités d'économiser de l'énergie. Quelles sont les données qui manquent le plus souvent ?
- déterminer dans quelle mesure les indices présentés au chapitre 3 livrent des informations utiles à l'analyse de la consommation énergétique ;
- déterminer les mesures les plus importantes aptes à diminuer et à mieux gérer la consommation d'énergie.

L'intérêt économique des possibilités d'économie énergétique (analyse des coûts et bénéfiques), même si c'est important, ne faisait pas partie des questions étudiées et ne devait pas être déterminé quantitativement. Son analyse aurait nettement dépassé les moyens mis à disposition pour ce travail.

Nous avons considéré les services d'alimentation en eau suivants : Lugano-Massagno, Castagnola-Aldesago-Brè, Acquedotto industrielle Lugano, Sagno, St. Moritz, St. Moritz Dorf-Bad et Diepoldsau. L'analyse du réseau d'adduction de Lugano-Massagno a été présentée dans le chapitre 7. Les calculs faits et les résultats obtenus pour Sagno et pour l'Acquedotto industrielle Lugano sont exposés dans les annexes 3 et 4 de la réf. 31.

8.2 Données

Nous avons choisi seulement des exemples pour lesquels on possédait un minimum d'information sur le fonctionnement des réseaux. Une analyse énergétique ne peut pas être faite (voir chapitre 6) si par exemple les quantités d'eau fournies aux consommateurs ne sont pas connues. Malgré cela, les données et relevés que l'on a pu se procurer n'ont pas toujours permis d'exécuter les calculs prévus sans recourir à des estimations plus ou moins précises. Nous avons rencontré entre autres les difficultés suivantes :

- la fourniture d'eau d'une zone de pression à une autre à travers des réducteurs de pression est rarement mesurée ;
- les compteurs ne fonctionnent pas toujours. Il est important de vérifier si un comptage n'a pas été interrompu (pour une raison ou pour une autre) lors de la période considérée ;
- les consommations des services publics sont comptabilisées d'une façon irrégulière ;

- le captage d'eau de source n'est souvent pas mesuré;
- il se peut que l'électricité consommée soit comptée seulement globalement et que la consommation d'un appareil déterminé (un groupe moteur-pompe par exemple) ne soit pas connue;
- la variation dans le temps du niveau de l'eau dans un puits n'est pas connue en fonction du débit.

La fiabilité et l'utilité des résultats d'une analyse augmentent si on dispose de données sur plusieurs années. Les données recueillies pour exécuter une simulation du fonctionnement du réseau sont particulièrement utiles.

8.3 Les indices énergétiques

Les indices énergétiques des exemples étudiés sont présentés dans le tableau 5.

L'indice de structure devient particulièrement grand s'il y a une différence importante entre l'altitude du captage et celle de la consommation (à Sagno cette différence est de plus de 300 m). Il devient petit ou négatif si une production d'électricité est théoriquement possible.

Réseau d'adduction	E_{\min} (100 kWh)	Indice de structure I1 (KWh/m ³)	Indice de qualité I2	Eau consomm. et compt. Q_v (100 m ³)	Electricité demand. (1000 kWh)
Massagno-Lugano	911	0.19	3.47	4911	3353
Castagnola-Aldesago-Brè	305	0.31	2.56	975	791
Sagno	13	0.73	3.2	18	43
Acquedotto ind. Lugano	677	0.17	1.6	3869	1077
St. Moritz réseau complet	-140	-0.09	4.27	1477	557
St. Moritz, Dorf-Bad	72	0.06	4.47	1176	494
Diepoldsau	67	0.18	4.2	369	282

Tableau 5
Indices énergétiques
des exemples considérés

Pour l'ensemble du réseau de St. Moritz E_{\min} est négatif. Cela indique des possibilités de production d'électricité qui dans le cas de St. Moritz ne sont pas encore exploitées.

Le tableau 6 montre les valeurs des facteurs déterminants des différents exemples qui expliquent la variation de l'indice de qualité.

Réseau d'adduction	Rendement pompage, η	Pertes en %, pv	h_d-h_s
Massagno-Lugano	entre 0.6 et 0.7	20%	dans une zone > 140 m
Castagnola-Aldesago-Brè	entre 0.6 et 0.7	11%	adéquat
Sagno	entre 0.5 et 0.55	43%	en partie élevée
Acquedotto ind. Lugano	non connu	non connues	très bas
St. Moritz réseau complet	un peu plus de 0.5	34%	parfois élevée
St. Moritz, Dorf-Bad	un peu plus de 0.5	29%	élevée > 130 m
Diepoldsau	bas > 0.45	50%	bonne

*Tableau 6
Caractéristiques des facteurs
déterminants*

Les données des tableaux 5 et 6 indiquent que le cumul de deux facteurs déterminants défavorables peut faire monter l'indice de qualité au-dessus de 4. C'est le cas dans le service d'approvisionnement en eau de Diepoldsau, dont les pertes (consommations non comptabilisées comprises) atteignent 50% des quantités d'eau vendues et dont le rendement des groupes moteur-pompes est faible.

L'indice de qualité le plus bas des 7 exemples considérés est celui de St. Moritz Dorf-Bad. Cela est principalement dû au fait que ce réseau d'adduction est composé d'une seule zone qui s'étend sur un territoire dont l'altitude varie fortement.

La valeur la plus basse a été déterminée pour l'Acquedotto industrielle Lugano. Cela est dû au fait que ce réseau d'adduction travaille avec une pression de service particulièrement faible, nettement inférieure à celle requise pour un service d'approvisionnement en eau potable, utilisable aussi pour la lutte contre le feu. Faute de données, les calculs l'Acquedotto Industriale di Lugano ont aussi été effectués en admettant que les pertes sont nulles. Ce qui n'est probablement pas vrai à 100%.

L'indice de qualité I2 reflète très bien la qualité technique d'un réseau d'adduction (du point de vue de l'économie énergétique). Pour les systèmes d'approvisionnement en eau potable il a la signification suivante :

Indice de qualité I2

Etat du réseau
(du point de vue énergétique)

en dessous de 2
2 - 2.5
2.5 - 3.0
3.0 - 4.0
au-dessus de 4.0

très bien
bien
assez bien
peut être amélioré
doit être amélioré

8.4 Amélioration de la gestion énergétique

Economiser de l'énergie

L'analyse des exemples a montré que tous les facteurs déterminants évoqués dans le chapitre 2 peuvent avoir une influence importante sur la consommation énergétique. Nous citerons ici en plus le captage de nouvelles sources qui permet d'économiser de l'énergie et est aussi parfois rentable. Comme il fallait s'y attendre, l'assainissement du réseau (conduites principales, armatures, branchements) joue un rôle particulièrement important. Non seulement il permet de diminuer les pertes, mais il augmente aussi la sûreté d'approvisionnement et la possibilité de lutter efficacement contre le feu (Sagno).

La différence d'altitude entre le réservoir et les abonnés a aussi une influence déterminante sur la consommation énergétique (Lugano-Massagno, Sagno, St. Moritz Dorf-Bad). C'est un aspect dont il faut tenir compte pendant l'étude d'une modification importante ou d'un nouveau projet.

Des différences d'altitude trop grandes peuvent assez souvent être réduites avec le partage d'une zone de pression, accompagné de l'emploi de groupes moteur-pompe à vitesse variable. Dans les exemples considérés l'emploi de ce type de pompe a pu être envisagé dans les cas suivants :

- séparation d'un réservoir existant, placé à une altitude trop élevée, de la zone desservie. Alimentation directe de la même zone avec des groupes de pompes à vitesse variable (Zona Alta à Lugano-Massagno, St Moritz Dorf-Bad);
- pompage de l'eau d'un puits avec variation importante du niveau de l'eau (Lugano-Massagno: Manno II);
- alimentation directe sans réservoir (Acquedotto industriale Lugano, Diepoldsau).

Le rendement des groupes moteur-pompe des exemples étudiés est en général inférieur à celui des groupes moteur-pompe offerts sur le marché aujourd'hui.

Production d'électricité

Dans un pays montagneux comme la Suisse, il est souvent théoriquement possible de produire de l'électricité avec de l'eau captée en haute altitude et utilisée en basse altitude par un service d'approvisionnement en eau. Le problème qui se pose est celui de la rentabilité, car la production d'électricité, même avec une mini-centrale, demande toujours des investissements assez importants. Dans les exemples étudiés dans le cadre de ce travail, une production d'électricité pourrait être prise en considération dans les cas suivants :

- en aval des sources Cusello (Lugano-Massagno);
- sur la conduite de raccordement entre le réservoir Gemmo et la

Zona Bassa à la place du réducteur de pression de St. Anna (Lugano-Massagno);

- en amont du réservoir Cavalorgna à Sagno si les sources qu'on envisage de capter en haute altitude ont un débit suffisant;
- en aval des raccordements entre les sources Alp Giop et Alp Nova et les réservoirs du réseau d'adduction de St. Moritz.

Dans le cadre des programmes nationaux PACER et DIANE la Confédération a financé plusieurs études et réalisations de mini-centrales utilisant l'eau captée par des services d'approvisionnement en eau.

Le lecteur particulièrement intéressé pourra approfondir ce thème en consultant les publications (27), (28) et (29) ainsi que la brochure (30).

Consommation de l'électricité pendant la nuit

Dans le paragraphe 4.4 nous avons vu que le pompage direct dans le réseau de distribution demande moins d'énergie que de pomper l'eau d'abord dans un réservoir et de la distribuer ensuite. Même s'il faut plus d'énergie, remplir les réservoirs de nuit et alimenter le réseau de jour avec l'eau stockée peut apporter aux Services des eaux un avantage financier considérable, parce que le coût de l'électricité la nuit est souvent bien plus faible que pendant le reste de la journée.

Dans le cas de Lugano-Massagno par exemple, les stations de Manno II et Bioggio ne pompent pas directement dans le réseau de distribution mais dans les réservoirs de Gemmo et Massagno. A cause d'un fléchissement de la demande d'eau, les Services des eaux disposent aujourd'hui d'une capacité de stockage importante, qui leur permettrait de déplacer une bonne partie de la consommation d'électricité dans la période nocturne avec un avantage considérable.

Calculs de rentabilité

Une valeur élevée de l'indice de qualité ne signifie pas encore que des mesures d'économie énergétique peuvent être réalisées avec une rentabilité acceptable. Un service d'approvisionnement en eau peut avoir un indice de qualité élevé et en même temps utiliser très peu d'énergie. L'indice de qualité montre seulement dans quelle mesure l'énergie consommée est bien utilisée. Il ne dépend pas de la quantité d'énergie consommée, dont l'importance dépend surtout de l'indice de structure. Pour la zone Dorf-Bad de St. Moritz, par exemple, l'indicateur de qualité est élevé mais la quantité d'énergie consommée effectivement est assez faible par rapport à l'eau pompée (0.36 kWh/m³). Dans une telle situation, la rentabilité des investissements pour réaliser des mesures d'assainissement est souvent insuffisante parce qu'elle dépend fortement de la quantité d'énergie économisée. Ce n'est pas donc évident, a priori, que dans la zone Dorf-Bad à St. Moritz les mesures d'économie envisagées soient économiquement acceptables. Les possibilités de réa-

lisation de mesures d'économie ou de production d'électricité dépendent fortement de deux facteurs :

- le montant des investissements ;
- la quantité d'énergie économisée ou produite.

L'analyse préliminaire d'un service d'approvisionnement en eau se limite à indiquer s'il y a des possibilités effectives d'économie ou de production d'électricité. C'est seulement dans un deuxième temps, avec une analyse approfondie, qu'on pourra déterminer leur rentabilité et les chances de les réaliser pratiquement.

8.5 Procédé à suivre

Pour voir si des mesures d'économie ou de production d'énergie sont possibles, un service d'approvisionnement en eau doit dans un premier temps déterminer la valeur des indices de structure et de qualité pour l'ensemble du territoire et pour les différentes zones de pression.

Si l'indice de structure pour une de ces zones est négatif, il est peut-être possible de produire de l'électricité.

Si l'eau captée en haute altitude ne peut pas être entièrement utilisée, examiner la possibilité de la vendre à une commune voisine.

Si le captage se fait dans la nappe phréatique ou dans les eaux de surface, voir s'il n'y a pas la possibilité de capter des sources en haute altitude.

Si dans une zone de pression l'indice de qualité est plus grand que 3, il y a des chances de pouvoir économiser de l'énergie. Dans ce cas il faut procéder de la façon suivante :

- déterminer les rendements des groupes moteur-pompe. S'ils sont trop bas il faut les réviser ou les remplacer par des appareils plus modernes et performants ;
- déterminer la perte de charge dans les conduites de raccordements. Si elle est trop importante il faut peut-être remplacer certains tronçons ;
- calculer les pertes en faisant le bilan entre quantités captées et quantités vendues pour chaque zone de pression. Si ce n'est pas possible, mesurer les débits de nuit. Si dans certaines zones de pression les pertes dépassent 15 %, étudier d'abord les causes et prendre ensuite des mesures pour réduire les fuites (recherche des fuites, réparation, remplacement de conduites principales, branchements et armatures, introduction d'un traitement adéquat de l'eau etc.) ;
- vérifier la pression de service. Si à certains endroits elle est trop élevée, étudier de quelle façon on peut la réduire (avec un partage de la zone, par exemple).

A côté de l'étude et de la réalisation de mesures d'économie énergétique, il est peut-être possible de déplacer au moins une partie de la consommation dans la période nocturne. Cela dépend surtout de la capacité des réservoirs. Un tel déplacement est intéressant si les Services des eaux obtiennent de la société qui leur fournit l'électricité des tarifs de nuit favorables (surtout l'été). Il faut aussi que les investissements nécessaires puissent être amortis convenablement.

9. REFERENCES

- 1 Aziende industriali della città di Lugano: «Rapporto tecnico amministrativo 1992», Lugano, 1993.
- 2 Ingenieurbüro K. Lienhard AG: «Technischer Bericht zur Rohrnetzberechnung der Wasserversorgung von Lugano-Massagno», Buchs-Aarau, 1986.
- 3 Ingenieurbüro K. Lienhard AG: «Rohrnetzberechnung Castagnola und Brè», Buchs, 1993.
- 4 Dipartimento delle finanze del Canton Ticino: «Direttive per i comuni concernenti le infrastrutture necessarie alla lotta contro gli incendi», Bellinzona, 1989.
- 5 Rovelli: «Il nuovo acquedotto comunale di Castagnola e Viganello», Comune di Castagnola.
- 6 Mackay et M. L.: Adams, Franklin Institute Research Laboratories, Power, Juli 1971, S. 60/61.
- 7 SVGW: «Empfehlungen betreffend Datenerfassung und -auswertung bei mittleren Wasserversorgungen» Zurich, 1979.
- 8 Reichert, R. E, Neubauer, H. Reiche, F.W. Berg: «Elektrische Antriebe», RAVEL, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1993. Traduction française : Jufer M., Rufer A., Bongard M.: «Entraînements électriques, automatisation et processus électriques», RAVEL N° 724.331.1f, Berne, 1996.
- 9 SVGW: «Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz», Zürich, 1992.
- 10 Grombach, Haberer, Merkl et Trüeb: «Handbuch der Wasserversorgungstechnik», Oldenbourg Verlag, München, 1933
- 11 Lobanoff et R.R. Ross: «Centrifugal Pumps», Gulf Publishing Company, Houston, 1992.
- 12 Wagner: «Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen». Vogel Buchverlag, Würzburg, 1994.
- 13 Bolte O.G.: «Senkung der Wasserverluste in öffentlichen Versorgungen und Industrieanlagen» Expert Verlag, Ehningen, 1987.
- 14 Hoch W.: «Früherkennung von Leckstellen in Wasserrohrnetzen» Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft. Oldenbourg, 1987.
- 15 WAR: «Wasserverteilung und Wasserverluste» Verein zur Förderung des Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung TH Darmstadt. Darmstadt 1985.
- 16 Weimer D.: «Lecksuche und Ortung in Wasserverteilnetzen» Technische Werke der Stadt Stuttgart AG.

- 17 Weimer D.: «Leakage Control» Water Supply. Vol. 10, N. 1, S. 169-176, 1992.
- 18 L. Legrand et P. Leroy: «Prevention of corrosion and scaling in water supply systems», Ellis Horwood, Chicester, England, 1990.
- 19 F. E. Tanner et R. O. Müller: «Streustrom, Korrosion» Gas - Wasser - Abwasser, Vol. 70, Nr. 8, 1990, Zürich.
- 20 C. Skarda: «Aussenkorrosion und Wasserrohrnetzerhaltung» Gas - Wasser - Abwasser, Sonderdruck.
- 21 SGK: «Richtlinien zum Korrosionsschutz von erdverlegten metallischen Anlagen» Gas - Wasser- Abwasser, Vol. 73, Nr. 10, 1993, Zürich.
- 22 D.G. Shore: «Economic optimization of distribution leakage control» Journal of the Institution of Water and Environment Management. Vol 2, Nr. 5, 1988.
- 23 M. Fuchsloch: «Ermittlung der Wasserverluste: Hydraulische Methode» In «Wasserverluste» SVGW, A.G.H.T.M, Paris, 1981.
- 24 W.F. Ridley: «Progress in Leakage Control» Technical Papers IWSA Congress, Zurich, 1982, Special subject, SS 16.
- 25 H. Schwarze: «Rechnergestütztes Messsystem zur automatisierten Rohrnetzüberwachung und Lecksuche» Technisches Messen, Vol. 55, Heft 7/8, S.279, 1988.
- 26 F. Geering: «Generationenwechsel bei den Steuerungs- und Ueberwachungssystemen der Wasserversorgung Zürich» gwa, 2, 1992, Zurich.
- 27 J.-M. Chapallaz: «Elektrizität aus Trinkwasser-Systemen» JMC Engeenering, 1993, Ste-Croix.
- 28 J.-M. Chapallaz et P. Eichenberger: «Petites centrales hydrauliques» Office fédéral des questions conjoncturelles, 1993, Berne.
- 29 M. Hintermann: «L'eau potable. Génératrice d'électricité» Programme Diane, Energie 2000, 1994, Berne.
- 30 J.-M. Chapallaz: «Petites centrales hydrauliques», Office fédéral des questions conjoncturelles, 1993, Berne.
- 31 T. Pelli: «Energiesparen in der Wasserversorgung» Office fédéral des questions conjoncturelles, Programme RAVEL, 1995, Berne.

Associations de soutien

SSIGE

Société suisse
de l'industrie du gaz et des eaux

SIA

Société suisse
des ingénieurs et des architectes

UTS

Union technique suisse

SDESR

Société des distributeurs
d'eau de Suisse romande