

Approvisionnement décentralisé à l'aide des énergies renouvelables

L'énergie dans l'enseignement professionnel
Modules pour les professions de la construction: Module 7

- 1 Introduction: de quoi s'agit-il?**
- 2 Objectifs de la formation**
- 3 Eléments proposés pour le plan des leçons**
- 4 Connaissances de base**
 - Généralités sur l'approvisionnement en énergie décentralisé
 - Bilan énergétique - Aspects d'un système d'approvisionnement
 - L'approvisionnement décentralisé à l'aide des énergies renouvelables, de A à Z
 - Les installations d'approvisionnement décentralisé, étape par étape
 - Les priorités de l'approvisionnement en énergie
 - Petit glossaire pour le module 7
- 5 Exercices et solutions proposées**
- 6 Bibliographie**
- 7 Sources**
- 8 Modèles**



1 Introduction: de quoi s'agit-il ?

La production de l'énergie nécessaire à l'homme implique des interventions au niveau de la nature et a des impacts sur les bases de la vie même. Malgré des progrès technologiques certains, la demande en énergie ne cesse de croître, et avec elle les nuisances pour l'environnement.

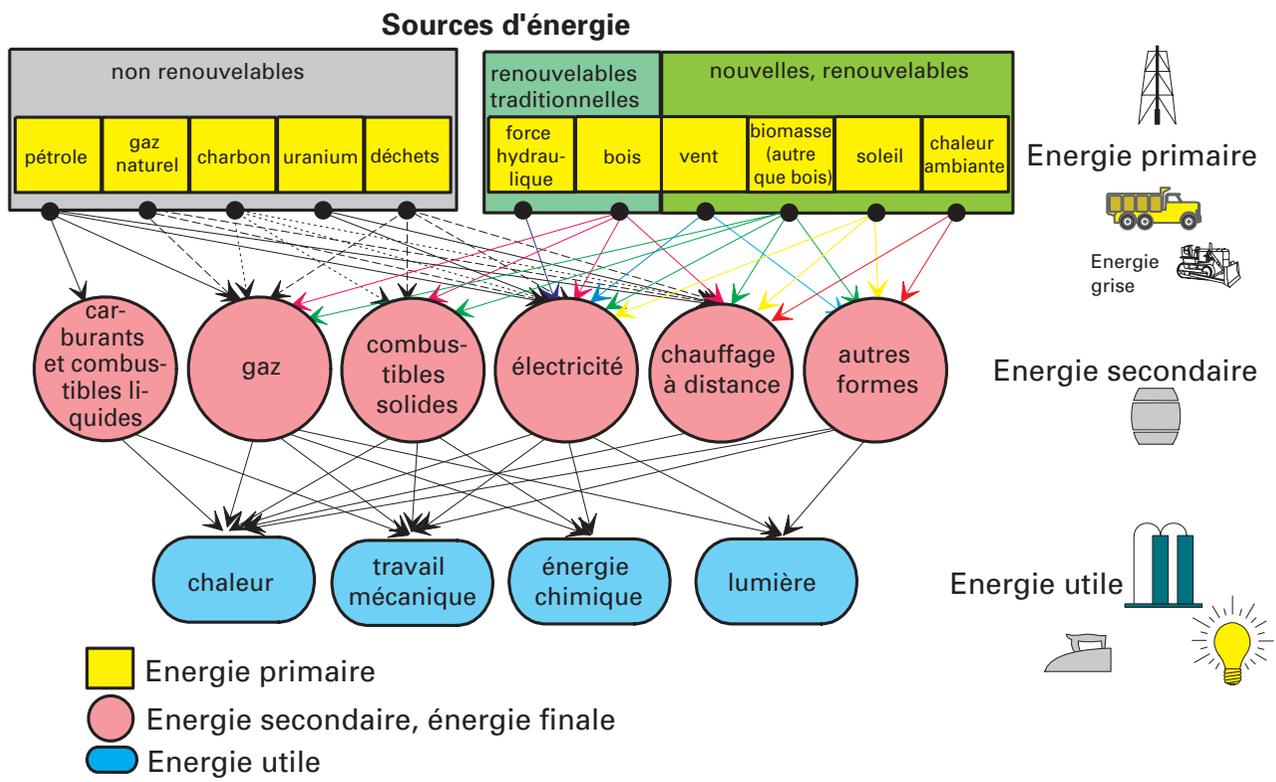
Aussi, l'approvisionnement en énergie devra-t-il être reconsidéré, dans le nouveau millénaire, avant tout sous l'angle de l'économie des ressources et de la protection de l'environnement. Pour les pays industrialisés, cela signifie que l'approvisionnement actuel sera peu à peu complété, puis remplacé par un approvisionnement décentralisé à partir de sources d'énergie renouvelables. Par contre, dans les pays en voie de développement ou en transition, des systèmes d'approvisionnement en énergie décentralisés couvrent aujourd'hui déjà au moins les besoins de base de la population rurale, à partir d'énergie primaire disponible sur place telle, par exemple, le vent, l'eau ou la biomasse (bois, etc.) L'urbanisation et l'industrialisation croissantes dans ces pays demanderont des installations de grande puissance.

Revenons en arrière de quelques décennies: à l'époque, la structure d'approvisionnement correspondait manifestement à une consommation largement décentralisée. Ce n'est qu'à la création de centres suprarégionaux d'approvisionnement en énergie que disparut l'intérêt pour l'approvisionnement décentralisé. Des centrales hydroélectriques de fai-

ble puissance ont été arrêtées et abandonnées à elles-mêmes, des chauffages au bois ont cédé la place au chauffage central à mazout. Dès qu'on actionnait l'interrupteur, on avait chaud. Cet accroissement du confort dû à la centralisation a entraîné la disparition de la prise de conscience de tout ce qui entoure la production d'énergie. Mais les risques de l'approvisionnement en énergie centralisé, tel que pratiqué actuellement, sont devenus de plus en plus manifestes.

Aussi bien lors de la construction de nouvelles installations d'approvisionnement en énergie décentralisé que pour la rénovation d'autres plus anciennes, utilisant notamment les énergies renouvelables, de nombreuses tâches incombent tant aux propriétaires qu'aux exploitants et aux utilisateurs.

L'objectif de ce module est de montrer aux apprentis les avantages de l'approvisionnement décentralisé en énergies renouvelables et de comparer, par des critères, des illustrations et des explications, les possibilités et domaines d'application des différents systèmes, avec leurs limites.



La multitude des agents énergétiques primaires connus nous offre une excellente panoplie de variantes, susceptibles de couvrir à l'avenir nos besoins en énergie utile, à l'aide d'un système global judicieux d'approvisionnement en énergie, qui privilégie la mise en réseau.

2 Objectifs de la formation

L'apprenti, l'apprentie...

- sait citer les avantages et les inconvénients respectifs des approvisionnements centralisé et décentralisé en énergie
- sait citer les critères à considérer pour l'examen des possibilités d'application des différents modes de production décentralisée d'énergie et peut indiquer leurs limites
- sait décrire et expliquer le principe de fonctionnement de chaque installation et de ses composants
- sait exposer la pertinence et les avantages que les réseaux de chauffage à distance peuvent retirer des sources locales de rejets thermiques (usines d'incinération et stations d'épuration)

Éléments pour les réponses possibles:

- L'approvisionnement centralisé ne permet pas de prendre suffisamment conscience des problèmes énergétiques
- Bilan énergétique d'un système d'approvisionnement (centralisé/décentralisé)
- Durabilité et problématique de la protection de l'environnement, selon le système d'approvisionnement (centralisé/décentralisé)
- Tenir compte des particularités saisonnières, locales et régionales
- Aborder des problèmes techniques tels que la faisabilité, la fiabilité, la maintenance, la durée d'amortissement, etc.
- L'argument de la rentabilité
- Installations en îlot, installations reliées à des réseaux
- Source d'énergie / convertisseur / transformateur / accumulateur / ligne de transmission / consommateur
- Possibilité d'acheminer l'énergie à basse température dans des conduites non isolées en combinaison avec des pompes à chaleur
- Pas d'infrastructure coûteuse au départ; le propriétaire du réseau prend ces frais à sa charge

3 Eléments proposés pour le plan des leçons

Visites guidées

d'installations décentralisées d'approvisionnement en énergie à partir de sources d'énergie renouvelables

En général

- ADER, Association pour le développement des énergies renouvelables, Sévelin 36, 1004 Lausanne, tél. 021 626 38 23, e-mail: ader@bluewin.ch, www.ader.ch
- AEE, Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, case postale 61, 1001 Lausanne, tél. 021 310 30 30, fax 021 310 30 40, e-mail: contact@aee.ch, www.renovelable.ch

Biomasse (autre que bois)

- CIB, Centre d'information biomasse, c/o EREP SA, chemin du Côteau, 1123 Aclens, tél. 021 869 98 87, fax 021 869 01 70, e-mail: biomasse@erep.ch, www.biomasseenergie.ch

Bois

- Energie-bois Suisse, chemin de Mornex 6, 1001 Lausanne, tél. 021 310 30 35, fax 021 310 30 38, e-mail: info@energie-bois.ch, www.energie-bois.ch

Force hydraulique

- ADUR, Association des usiniers romands, c/o Secrétariat, chemin du Crépon, Baugy, 1815 Clarens, tél./fax 021 964 42 21, e-mail: chenalr@mhyllab.com, www.iskb.ch

Energie éolienne

- Suisse Eole, Association pour la promotion de l'énergie éolienne en Suisse, c/o Planair, Crêt 108A, 2314 La Sagne, tél. 032 933 88 40, fax 032 933 88 50, e-mail: info@planair.ch, www.suisse-eole.ch

Energie solaire

- SWISSOLAR, Le réseau pour la chaleur et l'électricité du soleil, case postale 9, 2013 Colombier, tél. 032 843 49 90, fax 032 843 49 85, e-mail: info@swissolar.ch, www.swissolar.ch

Chaleur ambiante

- GSP, Groupement promotionnel pour les pompes à chaleur, chemin de Mornex 6, 1001 Lausanne, tél. 021 310 30 15, fax 021 310 30 40, e-mail: info@pac.ch, www.pac.ch

Géothermie

- SSG, Société suisse pour la géothermie, Centre romand de promotion, chemin du Fau-Blanc 26, 1009 Pully, tél./fax 021 729 13 06, e-mail: jules.wilhem@geothermal-energy.ch, www.geothermal-energy.ch

Adresses Internet, recherches sur Internet

Les adresses Internet suivantes se prêtent à une recherche en groupe permettant d'aborder différents aspects de l'approvisionnement décentralisé en énergie:

- OFEN, Office fédéral de l'énergie, www.suisse-energie.ch
- CRDE, Conférence romande des délégués à l'énergie, www.crde.ch
- PENTA PROJECT, Cours modulaires de perfectionnement dans le domaine des énergies renouvelables, www.pentaproject.ch
- SSES, Société suisse pour l'énergie solaire, www.sses.ch
- WWF, World-Wildlife-Fund Suisse, www.wwf.ch/centre-formation

Essai

La stéatite est connue pour son excellente capacité de stockage de la chaleur. Un simple test illustre cela: un morceau de stéatite de la taille d'une main est échauffé pendant deux minutes dans de l'eau bouillante. 40 minutes après en avoir été retiré, il est encore brûlant au toucher, et c'est seulement au bout d'une heure qu'on peut tenir la pierre dans la main. La stéatite convient parfaitement au stockage de la chaleur dans un poêle. Mais attention! A cause des conditions d'extraction de la stéatite et de son transport sur de longues distances, son utilisation semble délicate du point de vue écologique.

Questionnaire

Pour obtenir des informations, on peut lancer une enquête. Un questionnaire élaboré par les élèves permettra d'établir combien de personnes seraient prêtes à s'engager en faveur d'un approvisionnement en énergie décentralisé. Cela permettra du même coup d'identifier un certain nombre de préjugés. On élaborera le questionnaire en groupe.

Journal des questions énergétiques

En s'appuyant sur un aide-mémoire, on peut, par exemple, parcourir le bâtiment scolaire à la recherche de gaspillages d'énergie évidents. On attribuera de préférence à chacun un domaine particulier à traiter. Important: programmer des rendez-vous/entretiens réguliers pour échanger les connaissances acquises et préparer les étapes suivantes. Question: Comment interpréter les résultats acquis, sous l'angle d'un éventuel recours à un approvisionnement en énergie décentralisé ?

L'énergie au théâtre

On pourrait jouer une brève pièce de théâtre satirique sur le thème de l'énergie. L'énergie au théâtre permet d'intégrer des jeux de rôles en vue d'approfondir la discussion critique de différentes formes d'énergie. Mais ce ne sera pas nécessairement une pièce de théâtre. Pour les jeux de rôles, on peut distribuer à chaque acteur une carte à jouer avec un certain nombre d'indications à respecter.

Exemples:

1. Jeu de la table ronde improvisée (organisée p. ex. à l'occasion d'une manifestation politique).
Sur la carte, on inscrit le nom et la fonction de la personne et la position qu'elle doit défendre sur le sujet.
2. Le suspense augmente si seule une partie de la classe participe à ce «meeting» et qu'elle conduit le débat en se plaçant en cercle au milieu de la salle de cours. Les autres font les spectateurs, mais peuvent faire irruption dans le cercle dès qu'ils ont un nouvel argument à proposer (il y a en permanence une chaise vide), ou alors ils peuvent remplacer un des intervenants (règle du jeu à fixer par l'animateur!).
3. Il est aussi possible d'organiser un jeu de rôles représentant une table familiale. L'occasion suscitant la discussion sera un article de journal relatant que, lors d'une manifestation de protestation de Greenpeace, une personne a été blessée (on peut laisser planer le doute sur l'appartenance de cette personne à Greenpeace). Le père travaille comme chercheur dans le domaine de l'énergie nucléaire, la fille est membre actif de Greenpeace et le fils ne témoigne pas le moindre intérêt pour la question.
4. Une commune souhaite poser des capteurs solaires et l'association de protection du patrimoine s'y oppose pour des motifs d'esthétique. Le débat a lieu p. ex. à la Municipalité (l'animateur définit les dicastères des intéressés et le parti auquel ils appartiennent).

Une documentation pas comme les autres

Les apprentis disposent sur une table divers livres, documents ou matériel(s) de démonstration, sur le thème de l'approvisionnement en énergie décentralisé au moyen d'énergies renouvelables.

Brochures et matériel à disposition:

- Notice Soleil&Co., Chauffage et eau chaude (4 p.)
- Notices Soleil&Bois, Soleil&Gaz naturel, Soleil&Mazout, Soleil&PAC (4 p.)
- Soleil&Minergie, La cohérence globale (4 p.)
- Auto-construction d'installations solaires thermiques Solar Support/Sebasol (4 p.)
- Electricité solaire à portée de main (4 p.)
- Photovoltaïque. Du soleil, du courant (8 p.)
- Sous le soleil, exactement ..., capteurs solaires pour l'eau chaude et le chauffage (12 p.)
- Faites (votre place) au soleil ! L'énergie solaire accessible à tous (30 p.)
- Qui a peur des installations solaires ? CRDE*
- Le Soleil. Chaleur et Lumière dans le bâtiment. SIA D056*

L'ensemble du matériel (excepté *) peut être commandé auprès de:

SWISSOLAR, Case postale 9, 2013 Colombier

4 Connaissances de base

4.1 Généralités sur l'approvisionnement en énergie décentralisé

L'utilisation d'énergie implique l'exploitation de ressources. Notre façon de gérer l'énergie est-elle durable? Notre consommation est presque exclusivement basée sur des ressources non renouvelables. Le système énergétique actuel doit donc être considéré comme hautement non durable. La question de l'utilisation durable des ressources naturelles est au fond le fil conducteur de toute étude de l'approvisionnement en énergie renouvelable. On ne raisonne pas en unités spatiales fixes. Celles-ci peuvent englober, selon les cas, un ménage individuel, une zone d'affectation comme un village, une unité régionale comme une vallée ou le bassin versant d'une rivière.

Caractéristiques de l'approvisionnement en énergie décentralisé

Toute étude d'un approvisionnement en énergie renouvelable décentralisé implique d'aborder et de comprendre la dimension spatiale. Le concept de décentralisation implique aussi une certaine autonomie détachée de structures d'approvisionnement en énergie existantes.

Si nous prenons la nature pour modèle, nous pouvons bien observer comment l'énergie et la matière sont transformées de façon décentralisée. Ainsi c'est grâce à l'énergie solaire que se crée, dans les cellules des plantes, de la biomasse de façon décentralisée, laquelle sera utilisée, c'est-à-dire décomposée à son tour de façon décentralisée par des consommateurs.

Aucune technique ne permet, à elle seule, de satisfaire aux exigences complexes d'un système de production d'énergie durable. Aussi est-il raisonnable de rechercher, par une mise en réseau des différentes techniques, une couverture des besoins adaptée aux utilisateurs. On recourra alors, selon le service énergétique demandé, aux techniques les mieux adaptées qualitativement et quantitativement.

Le concept d'utilisation décentralisée n'est pas synonyme d'utilisation locale. Le réseau électrique européen interconnecté est un approvisionnement dit centralisé, bien qu'il englobe une multitude d'installations implantées de façon décentralisée. Un poêle à bois, par contre, alimenté par du bois de feu en provenance de la forêt voisine, est un système d'approvisionnement en énergie dit fortement décentralisé et localement circonscrit.

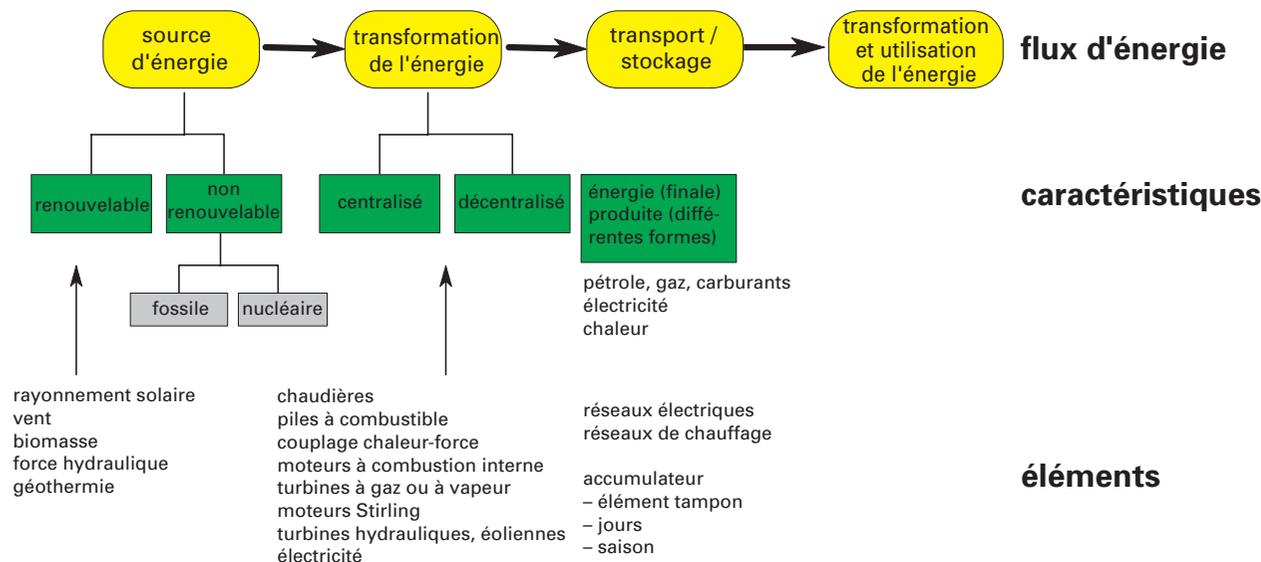


Fig. 1 Schéma de principe de l'approvisionnement en énergie

Pourquoi faut-il un approvisionnement en énergie décentralisé ?

Grâce au développement technologique, beaucoup de sources d'énergie renouvelables sont désormais prêtes à être utilisées. Pour l'approvisionnement d'habitations rurales dispersées, ce sont souvent les sources d'énergie renouvelables décentralisées qui constituent la solution pour l'approvisionnement en énergie la plus rentable et la plus écologique. L'inconvénient de l'approvisionnement centralisé en énergie, dans ces cas, est qu'une quote-part importante de l'énergie se perd carrément «en route». La conséquence: une décentralisation globale, tenant compte des aspects énergétiques, entraînera une diminution des déchets, des eaux usées, des polluants de l'atmosphère et des pertes de transmission occasionnées par le transport de l'énergie. On sollicitera moins les capacités de transport, et de façon générale on enregistrera une moindre dépendance.

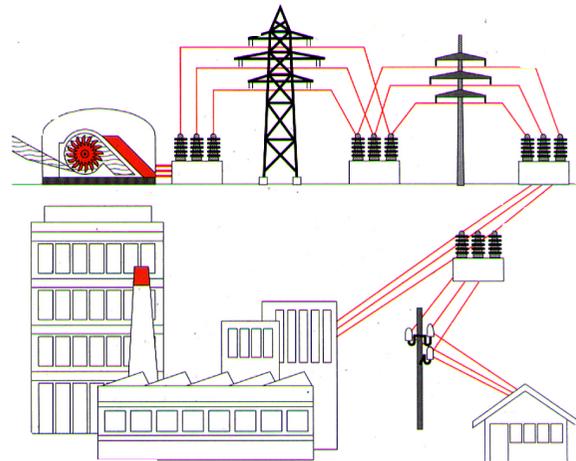


Fig. 2 L'approvisionnement suisse en énergie électrique est centralisé par la mise en réseau.

Production décentralisée d'électricité: systèmes et modes d'exploitation

De manière générale, le cœur d'une installation décentralisée est l'accumulateur d'énergie. Puisque l'offre et la demande en matière de consommation d'énergie coïncident rarement, il est impératif de stocker l'énergie.

Les différents systèmes et modes d'exploitation de la production décentralisée d'électricité

Installations en îlot

Il est essentiel pour un système d'approvisionnement en énergie tel que p. ex. une centrale électrique, de savoir s'il est destiné à alimenter, à lui seul, un petit réseau de distribution bien délimité, qui n'est relié à aucun réseau faîtier. Ce mode d'exploitation est dit en îlot. Les installations autonomes ou en îlot produisent de l'énergie pour un consommateur, sans raccordement à un réseau public comme par exemple le réseau d'approvisionnement en électricité. En Suisse, on trouve beaucoup d'installations en îlot, notamment dans des régions isolées telles que les Alpes. La caractéristique essentielle d'une installation autonome est de comporter un accumulateur d'énergie pour les interruptions d'exploitation de l'installation de production.

Installations reliées au réseau

Un système d'approvisionnement en énergie, tel que par exemple une centrale électrique acheminant l'électricité produite vers un réseau interconnecté de grande dimension, de tension et fré-

quence imposées, est un système dit d'exploitation en réseau. Les installations raccordées à un réseau sont reliées au réseau public. L'énergie excédentaire, produite dans une installation durant la phase d'exploitation active, est acheminée vers le réseau qui fera office d'accumulateur d'énergie. Prenons par exemple le réseau électrique: la production photovoltaïque d'électricité est particulièrement propice à la connexion à un réseau parce que, durant la journée, la consommation de courant électrique est particulièrement élevée.

En Suisse, les installations décentralisées raccordées à un réseau sont techniquement la meilleure solution pour la production d'électricité solaire, parce que l'infrastructure de réseau est déjà à disposition. L'onduleur transforme le courant continu produit en courant alternatif, conforme au réseau (230 V, 50 Hz), et il alimente le réseau public en cas d'excédent de production. La compagnie d'électricité gérant l'équilibre entre l'offre et la demande, il n'y a pas besoin d'accumulateur d'énergie.

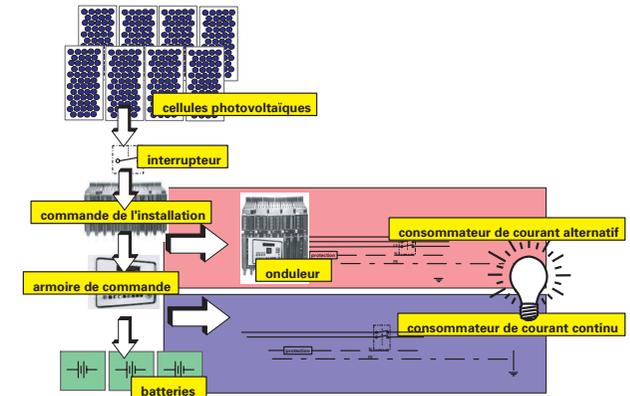


Fig. 3 Installation en îlot

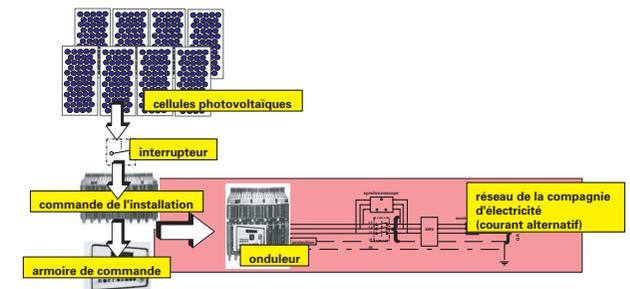


Fig. 4 Installation raccordée au réseau

4.2 Bilan énergétique - Aspects d'un système d'approvisionnement

Etude énergétique

L'évaluation énergétique d'une installation d'approvisionnement en énergie implique une étude énergétique exhaustive portant **sur l'ensemble du cycle de vie**. Les dépenses d'énergie pour la production, l'exploitation et le démantèlement sont appelées **dépenses d'énergie cumulées** durant le cycle de vie.

Le concept **d'énergie grise** comprend l'énergie primaire utilisée pour l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux et les transports intermédiaires.

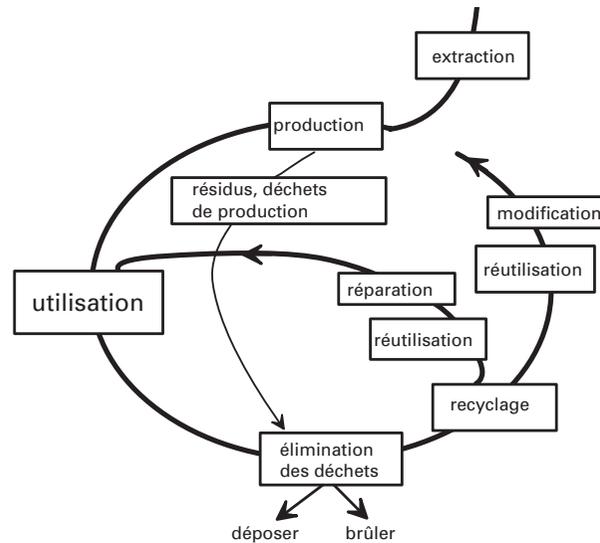


Fig. 5 Les différentes phases de la vie d'une installation d'approvisionnement en énergie

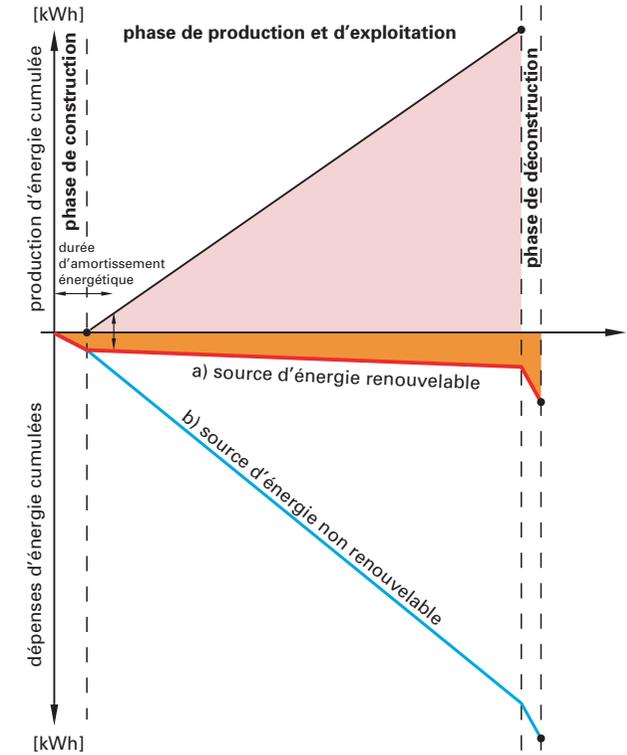


Fig. 6 Production et dépenses d'énergie cumulées d'une installation sur l'ensemble de son cycle de vie

Dépenses d'énergie cumulées (DEC)

C'est la grandeur caractéristique englobant l'ensemble des dépenses, en termes d'énergie primaire, occasionnées globalement par la mise sur pied ou la fabrication d'un bien économique – selon qu'il s'agit d'un service ou d'un produit – son exploitation ou son utilisation, et enfin son démantèlement, ou qui peuvent lui être causalement attribuées.

Cette façon de voir signifie en fin de compte la totalisation conséquente de l'énergie investie, même de façon cachée, tout au long de la chaîne du processus de transformation énergétique, portant sur l'ensemble des phases de vie d'une installation.

- L'énergie cumulée investie dans des **installations éoliennes**, par exemple, peut être devisée à environ 5'000 kWh/kW.

Pendant la phase d'exploitation, il y a deux types de dépenses d'énergie: l'énergie d'exploitation (la source principale, qui est convertie en énergie utile) et l'énergie auxiliaire (le plus souvent de l'électricité, nécessaire au fonctionnement de la commande, des pompes, etc.). Si l'énergie d'exploitation est fournie par une source renouvelable, elle n'est pas prise en compte dans le calcul des dépenses d'énergie cumulées. Car cette consommation d'énergie renouvelable n'a aucune influence sur le bilan énergétique global de l'environnement. En effet, si cette énergie n'avait pas été convertie en énergie utile par l'homme, elle se serait retrouvée de toute façon dans l'environnement, sous forme de chaleur, comme c'est le cas après l'utilisation par l'homme.

L'argumentation est similaire à celle conduisant à la neutralité du bilan de CO₂ de la biomasse; voir plus loin sous 4.3. Ainsi, dans la figure 6, la courbe a) ne tient compte que de l'énergie auxiliaire cumulée, tandis que la courbe b) englobe en plus l'énergie d'exploitation cumulée.

Durée d'amortissement énergétique

La durée d'amortissement énergétique d'une installation de production d'énergie est une manière très parlante d'illustrer le rapport entre l'énergie investie pour sa construction et l'énergie totale qu'elle peut produire durant toute la durée de son fonctionnement.

Durée d'amortissement énergétique de la construction (DA_C)

Elle désigne la durée nécessaire d'exploitation d'une installation produisant de l'énergie jusqu'à ce que celle-ci atteigne, en termes d'énergie primaire, une production nette cumulée équivalente à l'énergie primaire DEC_C investie pour sa construction.

Remarque:

- La durée d'amortissement d'installations d'approvisionnement en énergie à partir de sources d'énergie renouvelables est toujours nettement inférieure à la durée de vie globale de l'installation.
- Une installation de production d'énergie alimentée avec une source d'énergie non renouvelable ne s'amortit jamais énergétiquement. Les dépenses d'énergie cumulées restent toujours supérieures à la production d'énergie cumulée (courbe b), Fig. 6).

DA_C [mois]

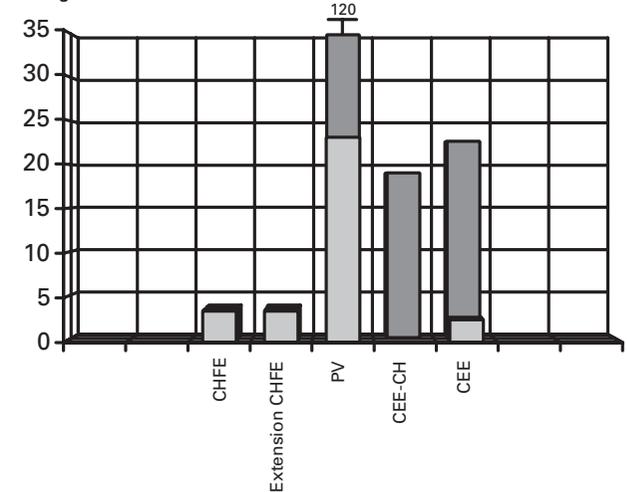


Fig. 7 Comparaison des durées d'amortissement DA_C pour différentes installations de production d'électricité

Légende:

- **Les valeurs minimales (en clair au premier plan) et maximales (en foncé à l'arrière-plan)**, établies sur la base de différentes publications, sont représentées sous forme de deux diagrammes en colonnes superposés. L'écart entre les valeurs illustre le fait que, selon l'approche et les critères, on peut aboutir à des résultats très divergents. La valeur type se situera en règle générale entre les deux extrêmes.
- **CHFE**: centrale hydroélectrique (au fil de l'eau), centrale hydroélectrique sur une rivière
- **Extension CHFE**: extension de centrales hydroélectriques existantes et construction de nouvelles installations
- **PV**: centrales photovoltaïques
- **CEE-CH**: centrale éolienne (CEE = convertisseur d'énergie éolienne), selon les conditions spécifiques suisses, pays continental.
- **CEE**: centrales éoliennes en général, au niveau planétaire, p. ex. en région côtière.

Chaleur		produite par				
Source d'énergie	bois	soleil	gaz	mazout	charbon	
Facteur de foisonnement	7,1	4,0	0,7	0,7	0,5	

Electricité		produite par		
Source d'énergie	soleil (PV)	panier énergétique UCPTÉ	panier énergétique CH	
Facteur de foisonnement	1,6	0,2	0,35	

Fig. 8 Tableau synoptique des facteurs de foisonnement pour la production de chaleur et d'électricité à partir de différentes sources.

Légende:

Les valeurs type indiquées sont tirées du «Schweizer Energiefachbuch», édition 1997, p. 99.

- **Panier énergétique UCPTÉ** = production européenne pondérée selon l'Union pour la Coordination de la Production et du Transport d'Electricité (UCPTÉ)
- **Panier énergétique CH** = électricité consommée en Suisse à partir du réseau public, composée de 60% d'énergie hydraulique, de 37% d'énergie nucléaire et de 3% d'énergie en provenance d'autres installations.

Facteur de foisonnement FF

Le facteur de foisonnement, appelé aussi parfois **facteur de récolte**, est le rapport de l'énergie produite par une installation pendant toute sa durée de vie et des dépenses d'énergie cumulées pendant la même période. Il a été introduit pour évaluer quantitativement l'amélioration du bilan des sources d'énergie non renouvelables d'un pays ou du monde entier, dans le sens d'une économie de ressources, suite à l'introduction possible d'une technologie particulière de mise en œuvre des énergies renouvelables. Car une telle technologie ne se justifie que si elle produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme pour la construction, l'exploitation et la déconstruction des installations. La définition précise du facteur de foisonnement varie d'un auteur à l'autre.

Remarques:

- Vu la faible densité énergétique des sources d'énergie renouvelables, la construction des équipements nécessaires à leur mise en œuvre implique un investissement énergétique relativement élevé.
- Implantées sur des sites judicieusement choisis, les installations décentralisées utilisant une énergie renouvelable peuvent néanmoins, comparé aux installations classiques, atteindre des valeurs élevées du facteur de foisonnement et de courtes durées d'amortissement énergétique.
- **Attention, distinguer correctement:** toute installation consommant de l'énergie non renouvelable a forcément un facteur de foisonnement compris entre 0 et 1: $0 < FR < 1$. Toute installation utilisant une source d'énergie renouvelable a un facteur type de foisonnement supérieur à 1: $FR > 1$.

Rendement

Grandeur caractéristique égale au rapport de la puissance utile produite et de la puissance fournie à l'installation. Le rendement se détermine uniquement en régime stationnaire.

Fraction utile

Rapport de l'énergie utile produite durant une période donnée et l'énergie fournie à l'installation pendant cette période. La fraction utile peut être déterminée pour des régimes intermittents incluant des temps de pause, de marche à vide, de démarrage et d'arrêt.

Considérations écologiques

Du point de vue écologique, il est très intéressant d'évaluer la réduction de l'impact des principales substances nocives émanant d'installations d'approvisionnement en énergie.

Notamment, la quantité de CO₂, ce gaz à effet de serre, émise par les installations peut aujourd'hui être considérée comme un facteur de qualité écologique. On définit alors un facteur de réduction CO₂ qui indique combien de fois moins de CO₂ une installation d'approvisionnement donnée émet durant sa durée de vie, comparé à une installation classique utilisant p. ex. du mazout.

Problèmes d'acceptabilité: paysage, intensité d'utilisation des matériaux, risques

Les problèmes d'acceptabilité rencontrés relèvent avant tout du domaine de l'aspect esthétique ou de la protection de la nature. Les sites propices à la production décentralisée d'énergie se trouvent généralement dans des zones non construites et donc souvent dans des zones naturelles protégées, non-constructibles ou de protection du paysage. Toute prise de décision devrait donc, dès le début du projet, être abordée d'entente avec toutes les organisations et associations de protection concernées. Les installations d'une certaine puissance doivent obligatoirement faire l'objet d'une étude d'impact. Une bonne politique d'information est alors primordiale.

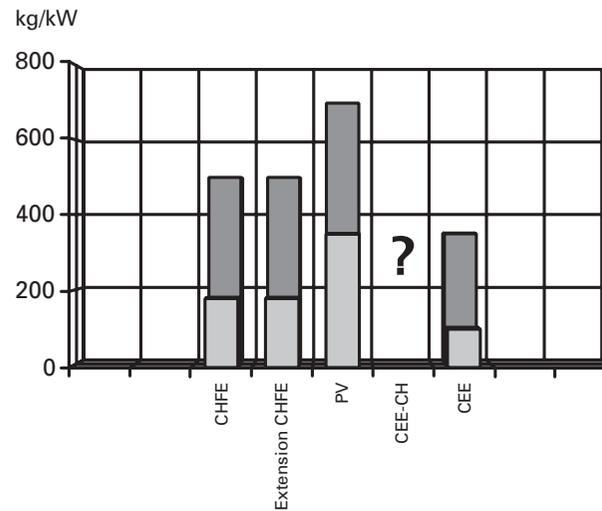


Fig. 9 Intensité d'utilisation des matériaux, en kg/kW, de différentes installations de production d'électricité.

Légende:

Les valeurs minimales (en clair au premier plan) et maximales (en foncé à l'arrière-plan), établies sur la base de différentes publications, sont représentées sous forme de deux diagrammes en colonnes superposés. L'écart entre les valeurs illustre le fait que, selon l'approche et les critères, on peut aboutir à des résultats très divergents. La valeur type se situera en règle générale entre les deux extrêmes. Certaines indications n'ayant pas pu être incluses dans l'étude par manque de données y relatives, celles-ci sont signalées par des points d'interrogation.

- **CHFE:** centrale hydroélectrique (au fil de l'eau), centrale hydroélectrique sur une rivière

- **Extension CHFE:** extension de centrales hydroélectriques existantes et construction de nouvelles installations
- **PV:** centrales photovoltaïques
- **CEE-CH:** centrale éolienne (CEE = convertisseur d'énergie éolienne), selon les conditions spécifiques suisses, pays continental.
- **CEE:** centrales éoliennes en général, au niveau planétaire, p. ex. en région côtière.

Surface nécessaire

La surface occupée par une installation d'approvisionnement en énergie peut représenter un critère décisif pour sa mise en œuvre, selon qu'elle sollicite des surfaces vierges ou fait appel à des surfaces déjà construites, p. ex. des toits.

Création d'emplois

Un engagement à plus grande échelle permettrait de créer de nouveaux emplois dans l'industrie suisse d'exportation. Le savoir-faire existant offre de bonnes perspectives dans ce sens.

4.3 L'approvisionnement décentralisé à l'aide des énergies renouvelables, de A à Z

Force hydraulique

Les aménagements hydroélectriques exploités traditionnellement depuis plus d'un siècle, souvent appelés aussi centrales au fil de l'eau, couvrent les **besoins de base en électricité** et fonctionnent sans interruption tout au long de l'année (énergie en ruban). Les centrales à accumulation par contre ont pour mission d'assurer la couverture des **pointes de consommation** à midi et durant l'hiver. Elles recourent à de l'eau stockée dans des lacs d'accumulation et peuvent être mises en service en l'espace de quelques minutes. Les lacs d'accumulation se remplissent durant l'été avec de l'eau de fonte des neiges. Les centrales de pompage/turbinage relèvent par contre de la gestion de l'énergie. En tant que cas particulier des centrales à accumulation, elles ne doivent pas être classées parmi les sources d'énergie renouvelables classiques! Selon les conditions météorologiques, la production annuelle d'une centrale hydroélectrique est soumise à des fluctuations importantes.



Fig. 10 L'hydroélectricité, c'est aussi les centrales de faible puissance dont les turbines sont entraînées par de l'eau accumulée par barrage dans un ruisseau ou une rivière.

Toute centrale hydroélectrique a pour mission d'exploiter l'énergie potentielle de l'eau: l'énergie produite par l'écoulement de l'eau de la chute est convertie en énergie électrique. Il est possible d'exploiter jusqu'à 90% de cette énergie. Le rendement des installations de faible puissance est nettement moins bon, voir figure 11.

Selon la hauteur de la chute, les installations hydroélectriques sont classées en installation à basse, moyenne ou haute pression.

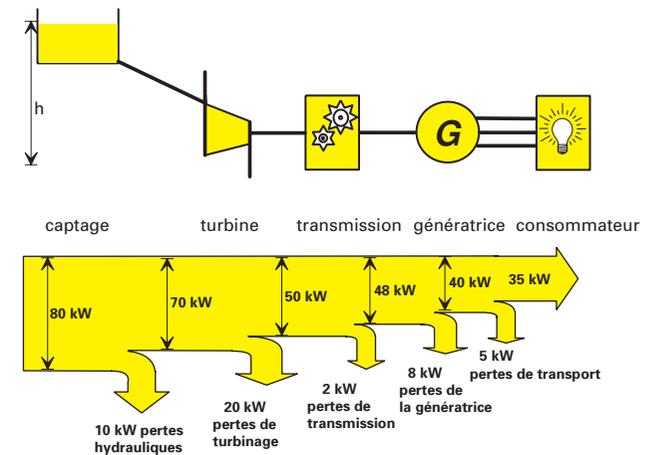


Fig. 11 Diagramme de puissance d'une petite centrale hydroélectrique, de la puissance hydraulique brute au consommateur.

La puissance de l'installation découle de la puissance des turbines. En raison des pertes qui se produisent à la transformation et au transport, la puissance électrique disponible chez les consommateurs est inférieure à la puissance hydraulique brute (dans l'exemple de la figure 11, elle se monte encore à 44%).

La puissance hydraulique brute d'une centrale hydroélectrique se calcule comme suit:

$$\text{puissance [W]} = h \cdot m \cdot g = m \cdot g \cdot h$$

$$\text{chute [m]} \cdot \text{débit d'eau [kg/s]} \cdot g [9,81 \text{ m/s}^2]$$

Exemple:

Une chute de 80 m et un débit d'eau de 20 kg/s (l/s) donnent une puissance brute de 15.7 kW.

Pour assurer une tension constante à la sortie d'une génératrice exploitée en îlot, il faut maintenir le nombre de tours constant par réglage du débit d'eau (vanne). Une fluctuation du débit d'eau entraîne, à nombre de tours égal, une variation de la puissance de la turbine. La puissance nominale d'une centrale hydroélectrique de faible puissance en projet se détermine à partir de la statistique annuelle des débits (diagramme des fréquences cumulées).

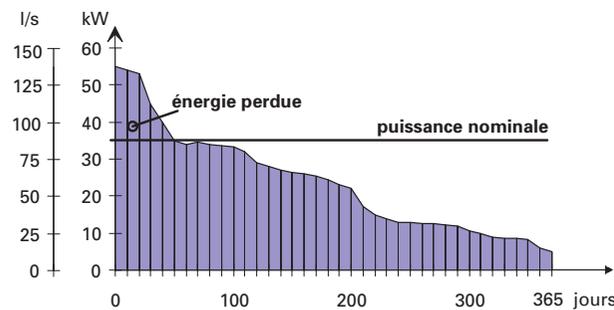


Fig. 12 Détermination de la puissance nominale optimale à partir de la statistique annuelle des débits

La force hydraulique est considérée comme la source d'énergie renouvelable commercialement la plus exploitée au monde. Ainsi environ 18% de la production mondiale d'électricité est produite par des centrales hydroélectriques. La centrale actuellement la plus puissante du monde avec sa puissance installée de 10,5 millions de kW_{él} se situe sur la frontière entre le Brésil et le Paraguay.

L'énergie hydraulique est certes une énergie renouvelable, mais son exploitation ne va pas toujours sans inconvénients: d'un côté, les grosses installations d'accumulation submergent des paysages particulièrement précieux, de l'autre, la survie des effectifs de poissons est menacée par des débits résiduels trop faibles. La transformation d'énergie hydraulique en énergie électrique à l'aide de grandes installations est étroitement liée à des problèmes d'ordre social et écologique. C'est justement dans le contexte de la prise de conscience ciblée de ces risques et de ces problèmes, que l'exploitation de la force hydraulique à l'aide de centrales de faible puissance jouit d'un regain d'intérêt. Dans les 30 ou 40 dernières années, on a arrêté bon nombre de centrales pour des motifs économiques. La remise en service de ces petits et très petits aménagements hydroélectriques tombés dans l'oubli permettrait pourtant de revaloriser une infrastructure déjà en place.



Fig. 13 Mini-centrale hydroélectrique, arbre d'entraînement

Centrales hydroélectriques de faible puissance: le pour et le contre

Pour	Contre
<i>Production d'énergie</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> les apports naturels exploitables pour la production d'électricité se présentent en moyenne pour 75% pendant la saison d'été et pour 25% en hiver.
<i>Rentabilité</i>	
<ul style="list-style-type: none"> l'approvisionnement décentralisé en énergie permet d'économiser des frais d'infrastructure 	<ul style="list-style-type: none"> nécessite relativement beaucoup de maintenance et d'entretien installation coûteuse coût actuel de la production de l'électricité: 20 à 30 cts le kWh
<i>Considérations énergétiques</i>	
<ul style="list-style-type: none"> énergie renouvelable traditionnelle et redécouverte consommation minimale en énergie primaire non renouvelable faibles pertes de distribution durée d'amortissement énergétique courte bons facteurs de foisonnement 	<ul style="list-style-type: none"> disponibilité aléatoire
<i>Données techniques</i>	
<ul style="list-style-type: none"> rendement global élevé: valeur type 80% surface nécessaire relativement modeste 	<ul style="list-style-type: none"> choix délicat des sites
<i>Divers</i>	
<ul style="list-style-type: none"> création d'emplois 	<ul style="list-style-type: none"> atteintes portées à des espaces vitaux et à des cours d'eau intacts problématique des débits résiduels

Rayonnement solaire

L'énergie solaire offre une variété surprenante de possibilités d'exploitation qui s'étend de l'approvisionnement en énergie au four solaire pour la cuisson des mets, en passant par la chimie à haute température.

Les principaux domaines d'application englobent la production

- d'eau chaude sanitaire
- de chaleur pour le chauffage des locaux
- de lumière
- d'électricité.

Dans le domaine architectural, l'énergie solaire offre une large palette d'applications intégrables dans différents éléments de projets, que ce soit sous **forme passive**, c.-à-d. par le mode de construction, **ou active**, c.-à-d. à l'aide de capteurs, de panneaux, etc. L'utilisation directe, active ou passive, de l'énergie solaire est réputée être un des modes de production d'énergie les plus favorables à l'environnement.

Applications thermiques de l'énergie solaire

Les applications thermiques de l'énergie solaire englobent l'ensemble des systèmes énergétiques produisant, à partir de l'énergie du rayonnement solaire, de la chaleur à basse, moyenne ou haute température. Toute installation solaire thermique se compose d'un capteur ainsi que d'un agent caloporteur liquide ou gazeux, de conduites et d'un accumulateur qui assurent le transport de la chaleur et son stockage. On distingue entre systèmes avec et sans con-

centration. Dans les installations solaires thermiques à concentrateurs, les rayons solaires sont concentrés, p. ex. par des miroirs paraboliques, ce qui permet d'obtenir des températures s'élevant jusqu'à 1000 °C, pour les procédés industriels. Dans les systèmes sans concentration, par contre, l'absorbeur convertit directement le rayonnement solaire en chaleur. Ces capteurs solaires se prêtent aux applications à basse température jusqu'à 100 °C. Les installations commercialisées actuellement convertissent entre 35 et 45% de l'énergie incidente en énergie utile.

L'exploitation thermique du rayonnement solaire par capteurs est basée sur un système techniquement bien au point; elle se justifie économiquement à partir d'une certaine puissance. L'exploitation décentralisée d'installations à capteurs solaires se prête avant tout à la préparation d'eau chaude sanitaire dans les immeubles d'habitation ou les maisons familiales, dans les installations sportives, les hôtels et l'industrie. A l'heure actuelle déjà, à partir d'un coût de 15 centimes par kWh environ, une exploitation rentable est possible.

Selon les applications thermiques, on a le choix entre différentes sortes de capteurs. Celui-ci dépendra principalement de la destination première et du niveau de température désiré.

Le **capteur plan** est considéré comme le type de capteur le plus répandu. Il se compose pour l'essentiel de quatre éléments: le verre de couverture, l'ab-

sorbeur, l'isolation thermique et le cadre. L'élément clé est l'absorbeur, un corps métallique recouvert d'une couche noire et parcouru par de petits tubes. L'agent caloporteur (généralement de l'eau mélangée à de l'antigel) circule dans l'absorbeur et achemine la chaleur vers les organes de stockage et de distribution. Les capteurs plans avec couverture sont la solution idéale pour les applications de préparation d'eau chaude sanitaire et d'appoint au chauffage dans la plage de température de 30 °C à 60 °C.

Le **capteur à tubes sous vide** se distingue par sa construction, dans laquelle l'absorbeur est placé dans un tube de verre sous vide. Ce procédé garantit un bon rendement même à des températures d'exploitation élevées.

Un mètre carré de surface de capteur assure une production de chaleur de 200 à 600 kWh/an, ce qui correspond à 20-60 litres de mazout.

Utilisation passive (architecture solaire, isolation thermique transparente)

Nous ne classons pas l'utilisation passive de l'énergie solaire directement parmi les systèmes d'approvisionnement décentralisés. Mais puisque les nouveaux éléments architecturaux solaires offrent des possibilités d'optimisation énergétique extraordinairement intéressantes, nous les mentionnerons pour compléter.

Une étude architecturale judicieusement orientée sur l'écologie entraîne aussi une nette diminution des

besoins en énergie des immeubles modernes. Voici quelques exemples classiques: fenêtres donnant sur le sud, jardins d'hiver, balcons vitrés. Certains éléments modernes tels que p. ex. **l'isolation thermique transparente (ITT)** sont très prometteurs. L'ITT comme élément de façade fonctionne comme un capteur à air chaud. De petits tubes d'isolant thermique translucide recouvrent l'absorbeur. Le tout est recouvert par une plaque de verre. Grâce à cette microstructure en nid d'abeille, le rayonnement solaire incident est dirigé à travers l'ITT sur la surface de l'absorbeur et ensuite sur les murs de l'immeuble. Une façade construite selon ce principe transmet la chaleur en différé aux pièces intérieures, ce qui représente une sorte de chauffage solaire mural.

Production d'électricité photovoltaïque

Le photovoltaïque constitue une autre forme d'exploitation directe de l'énergie du rayonnement solaire. Les cellules solaires sont les éléments de base d'une installation photovoltaïque. Actuellement, trois types sont commercialisés (la structure de base d'une cellule solaire, composée du matériel de base semi-conducteur de type p et d'une couche semi-conductrice de type n sur la face supérieure, peut être consultée dans le Module 2 «Énergie solaire» de la série pour les professions techniques, de l'électricité et de l'informatique):

- les cellules **monocristallines**, qui impliquent un procédé de fabrication onéreux; elles atteignent cependant un rendement s'élevant jusqu'à 16%;
- les cellules **polycristallines**, qui présentent un rendement d'environ 11 à 14%;

- les cellules **amorphes en couches minces**, pour lesquelles le matériau semi-conducteur est déposé par évaporation sur le substrat porteur; ces cellules sont sensiblement moins chères à la fabrication, mais leur rendement est plus faible, soit de 5 à 6%.

Pour fabriquer des cellules solaires, on utilise du silicium à l'état extrêmement pur; le processus de purification est très onéreux et augmente fortement les coûts.

Dans le public, on pose souvent la question de savoir si une installation photovoltaïque est à même de produire, durant son cycle de vie, une quantité d'énergie équivalente à celle investie dans sa fabrication. Des études détaillées des besoins en matériaux et en énergie (facteurs de foisonnement) sur l'ensemble du cycle de vie attestent que les installations photovoltaïques implantées en Europe centrale permettent de récupérer l'énergie investie au bout de 6 à 10 ans. Une installation exploitée pendant 30 ans produira donc du triple jusqu'au quintuple de l'énergie investie.

La structure en petits éléments indépendants est un atout déterminant de la technologie photovoltaïque. Conçues de façon modulaire, les installations photovoltaïques se prêtent à une implantation avec quasiment n'importe quelle puissance. L'approvisionnement décentralisé en électricité d'objets éloignés du réseau de distribution d'électricité est actuellement déjà rentable et représente un

choix judicieux. Par contre, dans les régions déjà reliées au réseau, on recourt de préférence à des installations photovoltaïques elles aussi raccordées à ce réseau.

Energie solaire: le pour et le contre

(Pour être précis, il faudrait procéder à une analyse comparative séparée pour chaque installation. Nous y avons renoncé pour des raisons de clarté.)

Pour	Contre
<i>Production d'énergie</i>	
• l'énergie primaire est gratuite.	• la production est fonction de la saison.
<i>Rentabilité</i>	
• ne nécessite que peu de maintenance et d'entretien	• le PV raccordé au réseau électrique est encore trop cher. • le solaire thermique est rentable dans des cas favorables.
<i>Considérations énergétiques</i>	
• c'est une source d'énergie renouvelable redécouverte au plan technique. • bons facteurs de foisonnement, en particulier dans les applications thermiques	• sa disponibilité est aléatoire; elle est abondante surtout pendant la saison d'été.
<i>Données techniques</i>	
	• grandes surfaces nécessaires • l'exposition et le choix du site sont décisifs.
<i>Divers</i>	
• émissions minimales de substances nocives • création de places de travail • faible d'impact sur l'environnement • rend moins aigus les problèmes liés à l'approvisionnement classique en énergie	• sur les sites bien dégagés: problèmes d'acceptabilité (protection du paysage et des sites)

Energie éolienne

L'énergie cinétique inhérente aux masses d'air en mouvement peut être exploitée à l'aide de convertisseurs d'énergie éolienne (CEE), qu'on appelle aussi tout simplement éoliennes. L'énergie éolienne était déjà exploitée par des moulins à vent il y a 3000 ans. Les éoliennes modernes convertissent l'énergie cinétique du flux d'air en énergie mécanique, puis, à l'aide d'une génératrice, en électricité. Un rotor tourne soit autour d'un axe horizontal, soit autour d'un axe vertical.

L'énergie du vent n'est pas une grandeur constante; au contraire, elle est fonction de la vitesse du vent. Elle augmente proportionnellement au cube de la vitesse du vent. Aussi le choix du site d'une éolienne est-il d'une importance capitale. Selon la conception du CEE, les vitesses de démarrage varient entre 3 et 5 m/s, alors que la puissance maximum de la génératrice est atteinte entre 10 et 14 m/s. Pour prévenir les dégâts consécutifs aux tempêtes, les pales du rotor sont réglées en cas de fortes rafales de vent de façon à éviter que la génératrice ne s'emballé, sa vitesse de rotation restant celle donnée par la puissance maximum de la génératrice.

En Suisse, l'exploitation de l'énergie éolienne vit encore une époque de «sommeil de la Belle au bois dormant». Pourtant, sur les crêtes, massifs montagneux ou passages de cols non boisés du Jura et des Alpes, de nombreux sites se prêteraient à l'implantation d'installations éoliennes (vent d'ouest généreux dans des lieux bien exposés en altitude).

Sur le plan de l'économie énergétique, un atout pertinent de l'énergie éolienne est que la production est abondante précisément pendant la saison hivernale où les vents sont fréquents, en même temps que les pointes de consommation d'électricité. En considérant ce qui est techniquement réalisable, les possibilités offertes par l'énergie éolienne en Suisse sont estimées à 2 – 4% des besoins en électricité.

Implantées sur un site favorable, les éoliennes sont, comparé au photovoltaïque, peu onéreuses. Dans un pays continental tel que la Suisse, on les place de préférence en montagne sur des dômes, ce qui implique des problèmes d'acceptabilité en rapport avec la soi-disant «défiguration du paysage».



Fig. 14 Approvisionnement décentralisé à l'aide de l'énergie éolienne

Energie éolienne: le pour et le contre

Pour	Contre
<i>Production d'énergie</i>	
<ul style="list-style-type: none"> la majeure partie de l'énergie peut être produite pendant la saison d'hiver, précisément au moment d'un appel de puissance accru 	
<i>Rentabilité</i>	
<ul style="list-style-type: none"> sur des sites favorables, les coûts de production de l'électricité sont proches de la rentabilité 	
<i>Considérations énergétiques</i>	
<ul style="list-style-type: none"> énergie renouvelable traditionnelle redécouverte consommation minimale en énergie primaire courte durée d'amortissement énergétique bons facteurs de foisonnement 	<ul style="list-style-type: none"> disponibilité stochastique
<i>Données techniques</i>	
<ul style="list-style-type: none"> surface au sol nécessaire relativement petite 	<ul style="list-style-type: none"> choix du site difficile
<i>Divers</i>	
<ul style="list-style-type: none"> création d'emplois émissions minimales de polluants faible impact sur l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> dans des lieux exposés: atteinte au paysage menace pour les oiseaux migrateurs émissions de bruit

Biomasse

L'ensemble des substances formées par des organismes vivants, notamment les plantes, est appelé biomasse. Par des procédés biologiques de photosynthèse, de l'énergie solaire est stockée dans les plantes. On peut alors extraire l'énergie de cette biomasse par des procédés multiples. Ainsi, la décomposition de substances organiques telles que par exemple les résidus végétaux, les déchets ménagers, les eaux usées et autres produits, génère du biogaz qui se prête à la production d'énergie par des processus variés.

Le facteur décisif pour une exploitation renouvelable de la biomasse est le cycle du carbone. Renouvelable signifie, dans le cas de la biomasse, que le cycle du carbone se boucle dans un délai raisonnable à vues humaines. Au cours de ce cycle, le carbone de l'atmosphère (CO₂) est capté par la plante qui le fixe chimiquement, puis, à la fin de la vie du végétal, restitué à l'atmosphère: le CO₂ dégagé lors de la combustion a été prélevé antérieurement de l'atmosphère par les plantes en croissance. C'est ce qui distingue fondamentalement la biomasse des sources d'énergie fossiles dans lesquelles le carbone a été lié chimiquement il y a plusieurs millions d'années. Exploiter la biomasse en tant que source d'énergie renouvelable signifie qu'on ne doit en consommer à des fins d'exploitation qu'une quantité équivalente à celle qui repousse dans le même temps dans la région.

La biomasse présente un avantage de taille par rapport à d'autres sources d'énergie renouvelables: c'est une ressource transportable et stockable qui peut être gérée selon les besoins, indépendamment des fluctuations journalières et saisonnières. La biomasse permet, grâce aux multiples formes sous lesquelles elle se présente, de répondre aux besoins les plus variés. En Suisse, la biomasse a été jusqu'ici utilisée le plus souvent sous la forme de bois de feu.

Les sources de biomasse avantageuses sont notamment les résidus et les sous-produits (paille, déchets de bois et produits végétaux humides ou déchets

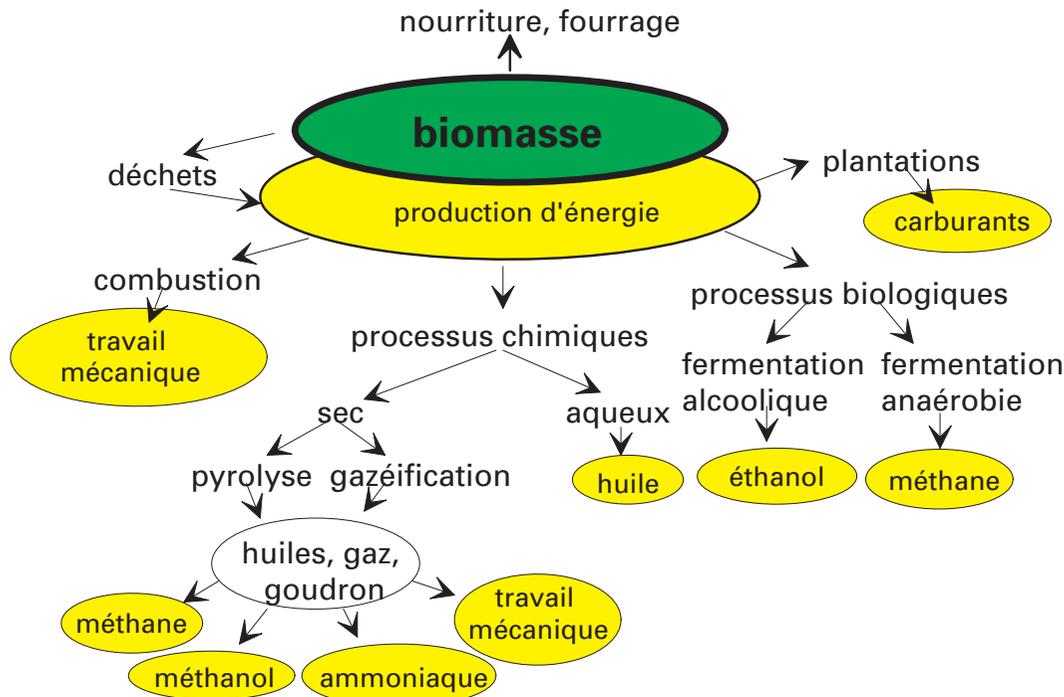


Fig. 15 Production d'énergie à partir de biomasse: les différents processus

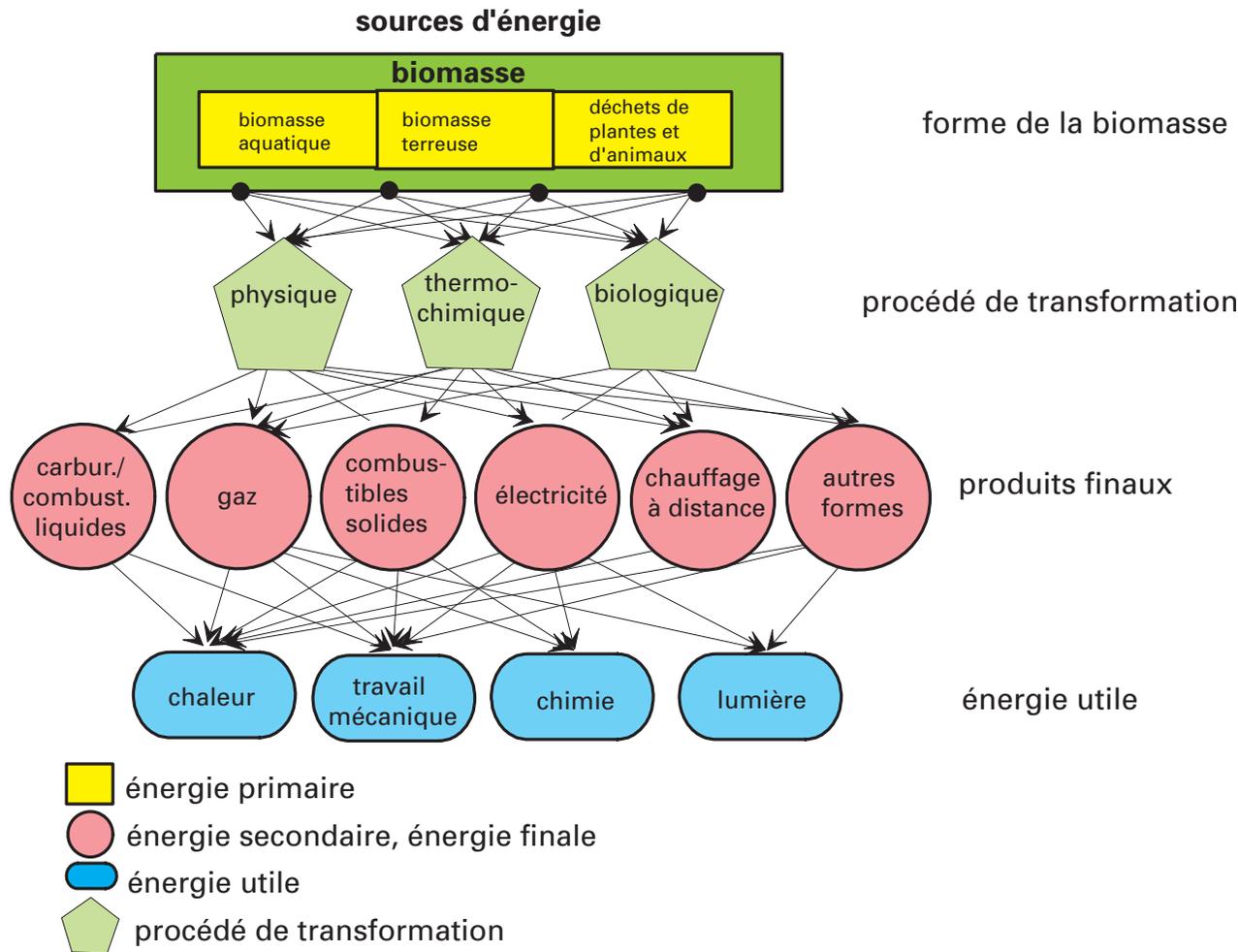


Fig. 16 Production d'énergie à partir de biomasse, de celle-ci à l'énergie utile

animaux). Pour les principaux domaines d'application des produits précités, on dispose d'installations de production de chaleur par combustion qui sont techniquement au point.

Comme le montre la figure 16, les quatre formes de biomasse peuvent être converties en énergie utile grâce à trois technologies de transformation de base.

Bois

Le bois, ce combustible solide, représente aux côtés de l'énergie hydraulique la source d'énergie indigène la plus répandue. La technologie du chauffage au bois a progressé ces dernières années. Les installations modernes travaillent avec des granulés, du bois déchiqueté ou des bûches; elles sont conformes aux prescriptions en matière de protection de l'air. Le bois est une matière première qui repousse abondamment en Suisse et se prête donc parfaitement à l'exploitation énergétique. Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables disponibles, le bois est celle qui présente les plus grandes potentialités, notamment pour une exploitation à court terme. Le bois est un combustible qui ne demande pas de longs trajets pour l'amener au consommateur. De plus, il est favorable à l'environnement, neutre du point de vue du CO₂; son utilisation en tant que biomasse permet donc de diminuer efficacement les émissions de gaz à effet de serre. Environ trois kilogrammes de bois de feu représentent l'équivalent d'un kilogramme de mazout. Le recours au bois rend indépendant des producteurs lointains. Le chauffage au bois représente ainsi pour la Suisse le mode d'approvisionnement décentralisé en énergie le plus traditionnel et le plus sympathique.

Le « bois d'énergie » provient soit directement de la forêt, soit de l'industrie du bois sous forme de déchets ligneux.

Les granulés, ces petites baguettes cylindriques de sciure pressée, se prêtent parfaitement au chauffage automatisé.

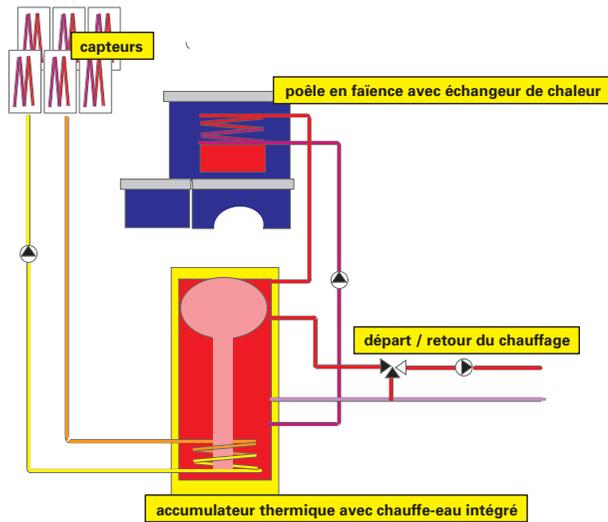


Fig. 17 Approvisionnement décentralisé par capteurs solaires combinés avec un poêle de faïence moderne: le chauffage central d'une villa

Biogaz

L'énergie produite par fermentation constitue un complément judicieux et représente une solution économiquement intéressante par rapport aux procédés classiques d'épuration des eaux et d'élimination des déchets. Les installations de fermentation anaérobies permettent ainsi la production de biogaz de haute valeur, utilisable pour la production combinée d'électricité et de chaleur dans des installations de couplage chaleur-force. La conversion en énergie électrique implique ici les mêmes pertes qu'avec n'importe quelle autre centrale thermique. Les installations fonctionnant au biogaz dans les fermes ou, en version plus grande, dans les stations d'épuration, servent à la production de chaleur et d'électricité.

Exploitation de la biomasse: le pour et le contre

Pour	Contre
<i>Production d'énergie</i>	
<ul style="list-style-type: none"> susceptible théoriquement de couvrir au moins 6% de la consommation suisse d'énergie 	
<i>Rentabilité</i>	
<ul style="list-style-type: none"> la production d'électricité par couplage chaleur-force à partir du biogaz produit par les stations d'épuration se justifie économiquement, avec un coût de production d'environ 15 cts/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> encore trop chère, comparée au prix du courant électrique fourni par le réseau public maintenance et entretien relativement coûteux
<i>Considérations énergétiques</i>	
<ul style="list-style-type: none"> énergie renouvelable nouvelle consommation minimale d'énergie primaire durée d'amortissement énergétique courte bons facteurs de foisonnement 	<ul style="list-style-type: none"> disponible en règle générale selon les besoins, la biomasse pouvant être stockée
<i>Données techniques</i>	
<ul style="list-style-type: none"> des progrès considérables ont été réalisés au niveau de la technique de combustion et de la protection de l'air 	<ul style="list-style-type: none"> nécessite des installations coûteuses pour l'approvisionnement en combustible
<i>Divers</i>	
<ul style="list-style-type: none"> bilan de CO₂ neutre pour les applications thermiques utilisant la biomasse végétale comme combustible résout en partie les problèmes liés à l'approvisionnement classique en énergie 	<ul style="list-style-type: none"> la culture intensive de biomasse est contraire à une protection efficace des biotopes et des espèces les cultures intensives représentent des nuisances potentielles pour les cours d'eau et les eaux souterraines, à cause des engrais, pesticides et herbicides utilisés.

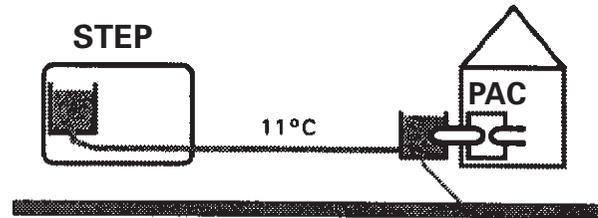
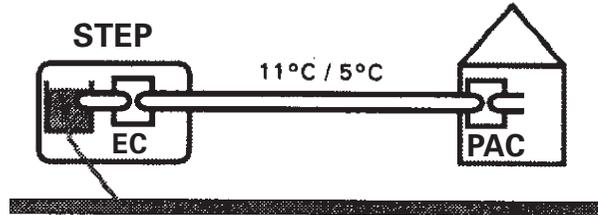
circuit ouvert**circuit fermé**

Fig. 18 Chauffage à distance à basse température en provenance de la station d'épuration des eaux usées (STEP), en circuit ouvert ou fermé
 PAC = pompe à chaleur
 EC = échangeur de chaleur

Chaleur ambiante

Il existe aujourd'hui différents systèmes permettant d'extraire de la chaleur de l'environnement. Se présentent comme sources de chaleur l'air ambiant, les eaux de ruissellement, les eaux souterraines, le sol et la géothermie. Pour amener cette chaleur ambiante à une température plus élevée, on recourt à une pompe à chaleur (PAC). Pour de plus amples informations, voir le Module E3 «Pompes à chaleur» de la série pour les professions techniques, de

l'électricité et de l'informatique. L'exploitation de la chaleur contenue dans l'air, le sol ou les cours d'eau requiert la consommation d'énergie mécanique/électrique à concurrence de 1/5 à 1/3 de la chaleur fournie par la PAC.

La quantité de chaleur contenue à l'intérieur de la Terre, dite géothermie, est gigantesque. Cependant, son exploitation est très onéreuse en général. La géothermie est une alternative d'approvisionnement décentralisé recommandée sur les sites dont la géologie est particulièrement favorable. La construction des tunnels pour les transversales alpines (NLFA) libère beaucoup de chaleur géothermique, avec l'important inconvénient que ces rejets thermiques surviennent malheureusement au mauvais endroit, là où la demande de chaleur est en fait très limitée.

Couplage chaleur-force

Une installation dans laquelle on produit simultanément de la chaleur et de l'électricité est une installation dite de couplage chaleur-force (CCF). Un moteur diesel, au gaz naturel ou au biogaz entraîne une génératrice. La chaleur contenue dans les gaz d'échappement et l'eau de refroidissement est récupérée à des fins de chauffage. Ce principe est aussi à la base des installations CCF modulaires et des installations «Totem». Pour de plus amples informations, voir le Module E4 «Les engins thermiques» de la série pour les professions techniques, de l'électricité et de l'informatique.

Chauffage à distance et approvisionnement en chaleur de proximité

Par exploitation décentralisée du chauffage à distance ou approvisionnement en chaleur de proximité, on entend le chauffage d'immeubles grâce à un réseau de distribution alimenté à partir d'un site central de production de chaleur. La fourniture à grande échelle de cette chaleur est assurée notamment par des installations thermiques: usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM), centrales thermiques pour la production d'électricité, ainsi que certaines installations de production industrielles.

Il est aussi possible de recourir aux stations d'épuration (STEP) qui offrent de la chaleur dite «froide à distance», sous la forme de la chaleur contenue dans les eaux usées. La caractéristique principale des réseaux de chaleur froide à distance est que la chaleur y est acheminée de la station d'épuration au consommateur dans des conduites non isolées, à basse température. Ce n'est que chez le client qu'on extrait la chaleur nécessaire au moyen d'une pompe à chaleur et la porte à la température de chauffage désirée. L'avantage principal de la chaleur froide à distance par rapport à la chaleur chaude à distance en provenance d'une usine d'incinération, est que les onéreuses pompes à chaleur ne doivent être installées qu'une fois que les clients sont effectivement raccordés.

4.4 Les installations d'approvisionnement décentralisé, étape par étape

Le choix du bon concept, le conseil professionnel et l'étude d'une installation forment un tout. La prise de décision, la planification des investissements, les procédures d'autorisation ainsi que l'intégration des aspects écologiques et techniques de l'installation d'approvisionnement en énergie à réaliser impliquent des contraintes supplémentaires rendant l'élaboration du projet plus complexe. La prise de conscience de ces interdépendances a conduit à une méthode de résolution des problèmes qui englobe l'ensemble des domaines de compétence à aborder.

Le concept énergétique est le fondement de tout projet d'installation décentralisée d'approvisionnement en énergie renouvelable. Ce concept énergétique implique l'étude globale de tous les aspects des domaines à approvisionner. La détermination de la puissance nécessaire et du mode de production sont des éléments capitaux. Les données d'exploitation saisies au cours de campagnes de mesures pour analyser l'offre et la demande, représentées sous forme de diagrammes des fréquences cumulées, constituent la base des calculs de rentabilité dans le concept énergétique.

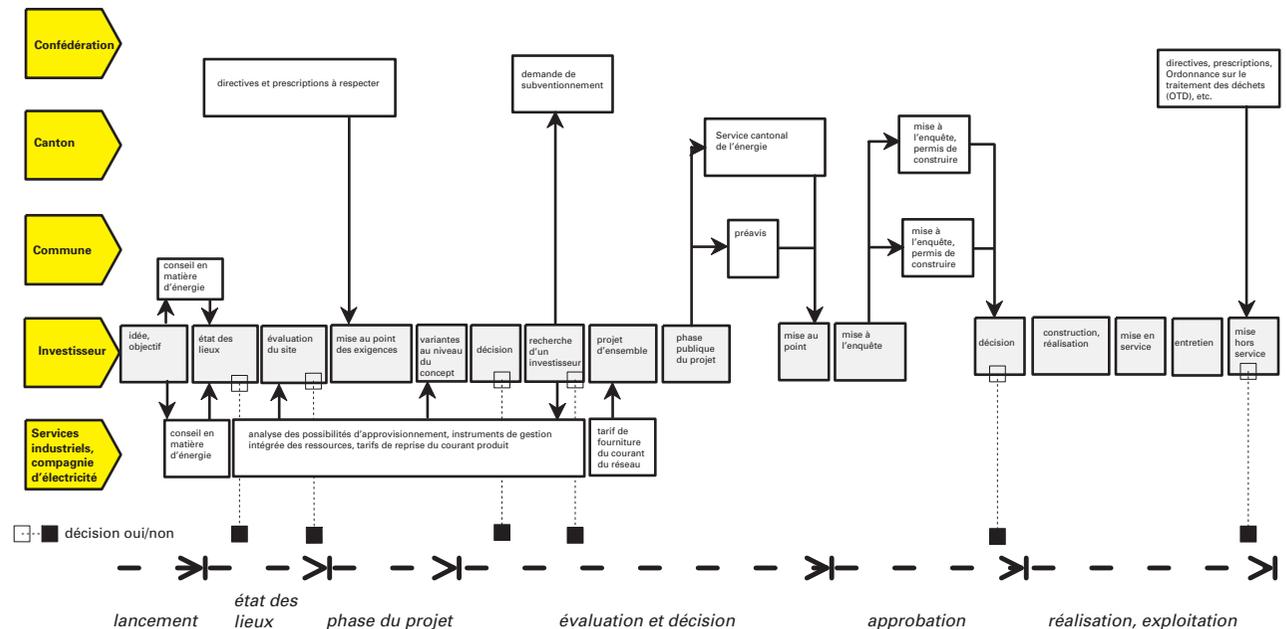


Fig. 19 Les différentes phases de l'étude et de la réalisation d'un projet d'installation, avec la répartition des tâches entre les différents intervenants

4.5 Les priorités de l'approvisionnement en énergie

Possibilités de réalisation dans le temps de l'approvisionnement durable en énergie

Un regard critique sur l'avenir permet d'évaluer les possibilités de réalisation dans le temps des différents systèmes d'approvisionnement durable en énergie en Suisse, ces prochaines années.

- Sont **actuellement** déjà bien développés les pompes à chaleur, les capteurs solaires, l'architecture solaire, le bois, le biogaz, le gaz des stations d'épuration et des déchetteries ainsi que le CCF comme installation décentralisée de production.
- Un **important développement à moyen terme** peut être attendu de la part de la biomasse en général, de la géothermie et de l'énergie éolienne.
- Un **développement à plus long terme** est à prévoir pour le photovoltaïque, éventuellement l'hydrogène comme accumulateur d'énergie et la pile à combustible comme installation décentralisée de production.

Pour obtenir, à partir des différentes sources d'énergie renouvelables, le panier énergétique qui correspond aux besoins d'un approvisionnement décentralisé, il n'est pas indispensable d'épuiser la totalité des possibilités de chaque énergie renouvelable. Car il ne faut pas oublier que le développement technologique, qui se trouve actuellement encore à ses débuts, permet de prévoir un important accroissement des performances des futures installations.

L'approvisionnement décentralisé en énergie renouvelable au-delà de nos frontières

Depuis quelques années, on est de plus en plus confronté à des problèmes environnementaux qui ne se manifestent pas seulement sur un plan local et régional, mais s'étendent de façon inquiétante à la planète toute entière. Il n'existe plus guère de domaine où la qualité de l'environnement ne se dégrade pas à un niveau universel. Comparé à beaucoup de pays de la communauté internationale, la Suisse poursuit une politique environnementale moderne avec des standards relativement élevés, qui sont l'expression d'une prise de conscience sérieuse des problèmes liés à l'environnement.

L'amélioration de la qualité de vie dans les pays en voie de développement est impérative, ce qui impose un transfert de technologie. Un transfert judicieux implique la sélection d'objectifs de projets ciblés, adaptés à l'environnement social et naturel. Il s'agit en outre de réfléchir où il convient d'investir notre argent avec un maximum d'efficacité. Le problème de l'énergie est un excellent exemple. Actuellement, nous serions en mesure, au plan technique, d'économiser chez nous le tiers des besoins globaux en énergie tout en conservant notre niveau de vie. Nous pourrions appliquer le même développement technologique dans les pays en voie de développement, beaucoup de solutions seraient envisageables à cet effet; mais ces dernières échouent très souvent en raison d'obstacles d'ordre social et politique.

Il serait cependant erroné de reproduire tout simplement dans les pays en voie de développement notre structure d'approvisionnement en énergie. Dans le cas de petites structures d'habitation dispersées, une approche adéquate serait, par exemple, d'implanter également de petites installations décentralisées pour approvisionner en énergie des ménages et des communautés villageoises.

La question provocante suivante devrait être posée: Pourquoi investissons-nous de l'argent uniquement en Suisse pour résoudre des problèmes environnementaux ? Car les francs investis chez nous n'apportent que des améliorations mineures, alors qu'un montant identique investi dans une centrale à charbon en Chine entraînerait un effet global bien plus spectaculaire.

4.6 Petit glossaire pour le module 7

solutions «end-of-pipe»

on appelle solutions «end-of-pipe» les mesures de protection de l'environnement insérées en aval du processus de production ou de consommation et n'affectant pas les technologies employées

entreprises de services énergétiques

entreprises offrant à leurs clients, à côté de la vente d'agents énergétiques, des services en rapport avec l'utilisation rationnelle de l'énergie. Leur philosophie, qui se reflète aussi dans leur comptabilité interne, est que toute mesure d'économie d'énergie équivaut à des investissements visant à augmenter la capacité de production

facteur de foisonnement, facteur de récolte

désigne le rapport entre l'énergie produite par une installation de production d'énergie et l'énergie nécessaire à la construction, l'exploitation et l'entretien de cette installation

énergie grise

énergie utilisée de manière «cachée» pour la fabrication d'un produit ou la construction d'un immeuble, soit l'énergie consommée jusqu'à la première utilisation de l'objet en question

technologie environnementale intégrée

approche technologique caractérisée par une planification et une conduite des processus judicieuse visant à éviter la création de substances nuisibles à l'environnement ou le gaspillage des ressources («clean technology»)

rareté

terme collectif caractérisant la disponibilité d'un bien; il englobe des aspects tels que les réserves d'une matière première, sa possible exploitation minière, les impacts liés à son extraction, la consommation d'énergie nécessaire à cette dernière et au transport, les émissions, etc.

facteur de charge

ou facteur de capacité C: il indique à quel taux la capacité de l'installation est exploitée en moyenne sur une année, soit le nombre d'heures par année durant lesquelles elle fonctionne si l'on suppose qu'elle fournit sa pleine puissance (heures à pleine charge)

intensité de matériau

concerne la gestion des matières premières dans le sens le plus large. La quote-part des matières premières nouvellement extraites des gisements doit être réduite autant que possible, et leur extraction doit entraîner un minimum de nuisances pour l'environnement. Tout déchet doit être traité comme un matériau à recycler dans les processus de production (dans la mesure du possible)

durabilité

signifie que la quantité de matières premières ou de ressources exploitée n'excède pas celle qui repousse ou se régénère dans des conditions naturelles. Pour les matières premières non renouvelables, il faut étendre le concept en y incluant, lors de l'évaluation, des critères tels que la rareté

négawatt

peut être considéré comme une source d'énergie encore à découvrir. Le recours à des techniques énergétiques efficaces permet de libérer des capacités dans les centrales. Les négawatts sont de l'énergie économisée

écobilan

méthode de détermination de l'impact d'un processus ou d'un système sur l'environnement. Dans un sens plus restreint, les écobilans sont des comparaisons entre différents processus sur le plan de la consommation d'énergie et de ressources, ainsi que sur celui des émissions générées. L'établissement d'un écobilan englobe notamment la définition des limites du système, la saisie de tous les flux de matériaux et d'énergie, la connaissance des écosystèmes concernés et les critères d'évaluation

5. Exercices et solutions proposées

Exercice 1

Energie grise – De combien d'énergie l'énergie a-t-elle besoin?

L'énergie dite grise englobe l'ensemble des dépenses énergétiques investies dans la fabrication d'un objet. L'énergie grise est de l'énergie utilisée de manière «cachée» pour la fabrication d'un produit ou la construction d'un immeuble, soit l'énergie consommée jusqu'à la première utilisation de l'objet en question. Le concept d'énergie grise comprend l'énergie primaire utilisée pour l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux et les transports intermédiaires. Cette façon de voir signifie en fin de compte la totalisation conséquente de l'énergie investie, même de façon cachée, tout au long de la chaîne du processus de transformation énergétique, portant sur l'ensemble des phases de vie d'une installation.

Objet de l'exercice:

Essayez, en vous inspirant des deux graphiques suivants, de trouver toutes les sources d'énergie grise sur l'ensemble du cycle de vie, en comparant une installation solaire thermique et une installation de chauffage au mazout (c'est la situation à considérer ici à titre d'exemple).

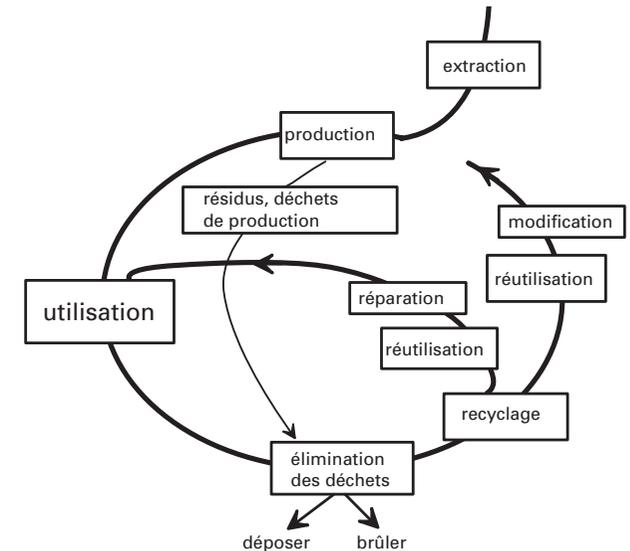


Fig. 20 Les phases de vie d'une installation de production

Intensité	<ul style="list-style-type: none"> éviter rendre aussi petit que possible 	<ul style="list-style-type: none"> intensité de matériau énergie matières premières
Durée de vie	<ul style="list-style-type: none"> réparable modifiable de conception modulaire 	
Recyclage	<ul style="list-style-type: none"> séparation en matériaux purs démontage marché secondaire des matières premières 	
Concept du cycle de vie des produits	<ul style="list-style-type: none"> concept de recyclage concept de démontage et de collecte concept de contrôle de la qualité concept de distribution fractionnée à des tiers concept d'organisation 	

Fig. 21 Exigences écologiques à satisfaire par une installation de production

Modèle: l'énergie «cachée» dans une installation solaire thermique

Phases et critères	Description détaillée

Commentaire:

La fabrication de matériaux de construction, la construction de centrales électriques et de navires de transport, de camions et de beaucoup d'autres choses implique aussi de l'énergie grise, qui s'ajoute à la consommation de mazout proprement dite et doit être mise à la charge du système de chauffage étudié, dans des proportions adéquates.

Voir aussi «L'énergie, facteur-clé de notre temps», document de base.

Exemple: L'énergie «cachée» dans une installation de chauffage au mazout

Phases et critères	Description détaillée
Mise à disposition du combustible	<ul style="list-style-type: none"> • mise en exploitation de gisements de la matière première • extraction de la matière première • transport • raffinage • extraction du soufre • entreposage, stockage • livraison
Construction de l'installation de chauffage	<ul style="list-style-type: none"> • fabrication de la chaudière • fabrication des radiateurs et des conduites du circuit du chauffage • transport et montage
Mise à disposition de l'infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • fabrication de la cheminée et de la citerne à mazout • transport de la cheminée et de la citerne à mazout
Exploitation du système de chauffage	<ul style="list-style-type: none"> • fourniture d'énergie électrique pour le brûleur et la pompe de circulation
Entretien du système de chauffage	<ul style="list-style-type: none"> • production de pièces de rechange • exploitation d'ateliers de service et de maintenance • ramoneur et contrôle antipollution • transport
Démantèlement et recyclage	<ul style="list-style-type: none"> • déchets • transport

Exercice 2
Potentialités de l'énergie éolienne

Objet de l'exercice:

Quelle est la production potentielle d'énergie [kWh/année] d'une installation éolienne sur un site donné?

Il n'est pas facile de prévoir l'énergie utilisable qu'une éolienne peut produire. Les campagnes de mesure de la vitesse du vent sont indispensables à cette estimation: elles permettent d'évaluer l'offre inhérente à un site et de déterminer la puissance à installer sur les futures éoliennes.

Hypothèse:

Pour le site de Winterthur, on a enregistré, sur une chaîne de collines voisines, la vitesse du vent et déterminé la fréquence annuelle d'observation de chaque classe de vitesse. L'histogramme suivant illustre les résultats des mesures:

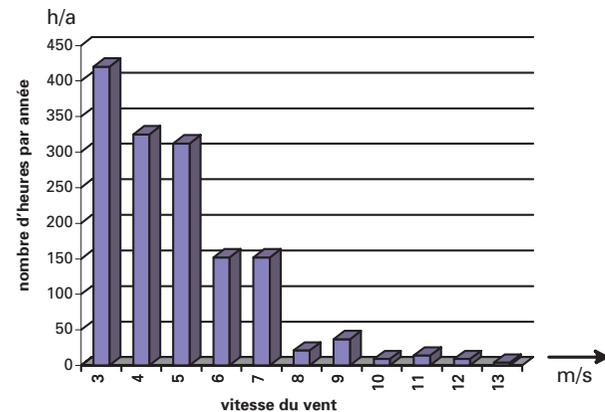


Fig. 22 Histogramme des mesures de la vitesse du vent

Objet de l'exercice:

Il s'agit de procéder, sur une feuille EXCEL, à l'évaluation de la production potentielle d'énergie à partir du graphique de la figure 22.

Classe de vitesse du vent [m/s]	Plage		Nombre d'heures par an [h]
	de [m/s]	à [m/s]	
3	3	4	420
4	4	5	325
5	5	6	312
6	6	7	152
7	7	8	152
8	8	9	21
9	9	10	37
10	10	11	9
11	11	12	14
12	12	13	9
13	13	14	4

Pour la petite éolienne dont l'hélice a 3 m de diamètre, le fabricant de la génératrice donne la liste suivante de puissances en fonction de la vitesse du vent.

Vitesse du vent [m/s]	Puissance de la génératrice [kW]
3-4	0,07
4-5	0,13
5-6	0,22
6-7	0,37
7-8	0,56
8-9	0,79
9-10	1,11
10-11	1,65
11-12	1,98
12-13	2,01
13-14	2,02

Solution:

Classe de vitesse du vent [m/s]	Plage		Nombre d'heures par an [h]	Puissance de la génératrice [kW]	Energie produite [kWh]
	de [m/s]	à [m/s]			
3	3	4	420	0,07	29,40
4	4	5	325	0,13	42,25
5	5	6	312	0,22	68,64
6	6	7	152	0,37	56,24
7	7	8	152	0,56	85,12
8	8	9	21	0,79	16,59
9	9	10	37	1,11	41,07
10	10	11	9	1,65	14,85
11	11	12	14	1,98	27,72
12	12	13	9	2,01	18,09
13	13	14	4	2,02	8,08

Production potentielle d'énergie [kWh]	408,05
--	---------------

Commentaire:

Les calculs montrent que cette installation permettra de produire sur le site donné quelque 400 kWh d'énergie par an sous forme d'électricité.

Exercice 3 Conception et dimensionnement d'une centrale hydroélectrique de faible puissance

Cette documentation est un mode d'emploi succinct pour le choix et l'achat de génératrices destinées aux centrales hydroélectriques de faible puissance (1 à 100 kW).

Puissance hydraulique brute

La puissance de la génératrice est déterminée par la puissance de la turbine. En raison des pertes subies lors de la transformation et du transport, la puissance électrique disponible chez le consommateur est inférieure à la puissance hydraulique brute.

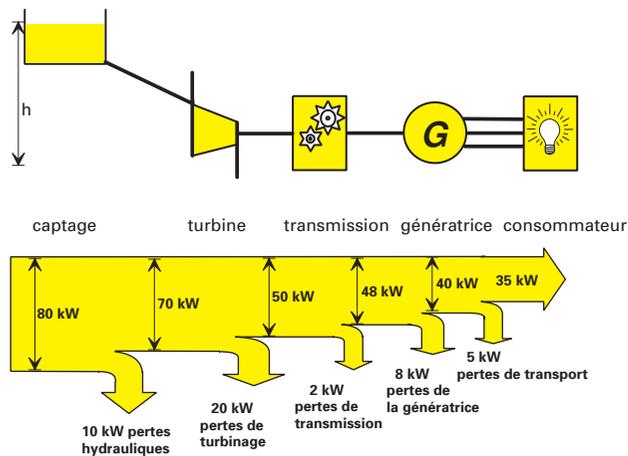


Fig. 23 Flux de puissance, de la puissance hydraulique brute au consommateur

La puissance hydraulique brute d'une centrale se calcule comme suit:

$$\text{puissance [W]} = \text{hauteur de chute [m]} \cdot \text{débit d'eau [kg/s]} \cdot g [9.81 \text{ m/s}^2]$$

Exemple:
Une chute de 80 m et un débit d'eau de 20 kg/s (l/s) donnent une puissance brute de 15.7 kW.

Puissance nominale et pertes

Si la génératrice est exploitée en îlot, il faut maintenir constant le nombre de tours (par minute) en réglant le débit d'eau (vanne), car sinon la tension est variable. A vitesse de rotation constante, les fluctuations du débit d'eau font varier la puissance de la turbine. La puissance nominale de la petite centrale hydroélectrique se détermine à partir de la courbe annuelle des débits observés (diagramme des fréquences cumulées).

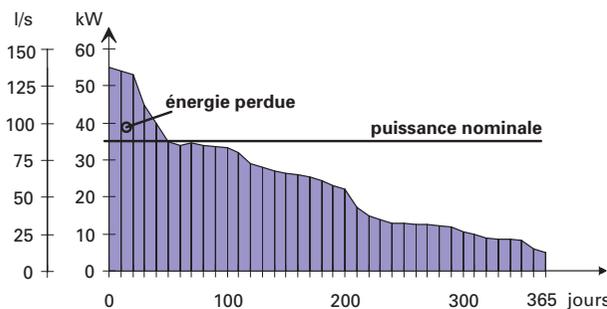


Fig. 24 Détermination de la puissance nominale optimum à partir de la courbe annuelle

Les **pertes de puissance hydraulique** augmentent avec la longueur de la conduite, la vitesse d'écoulement et la rugosité de la conduite. Elles se montent à 2-20% de la puissance hydraulique brute.

Les **pertes de la turbine** dépendent de sa construction, de sa qualité, de ses dimensions et de la charge (rapport puissance/puissance nominale). Le tableau suivant donne un aperçu des rendements moyens:

Type de turbine	pour 10 kW	pour 50 kW	pour 100 kW
Pelton	70 %	85 %	90 %
crossflow	50 %	60 %	70 %
Francis	70 %	80 %	90 %
hélice/Kaplan	60 %	70 %	85 %
reversed pumps	40 %	60 %	75 %

Fig. 25 Rendement nominal des turbines

Les pertes de **transmission** (adaptation du nombre de tours de la turbine au nombre de tours de la génératrice) sont généralement faibles. Pour une transmission à courroie ou à engrenages (rapport 1 à 4), on peut escompter un rendement de 95%. Dans le cas d'un engrenage à vis sans fin cependant, le rendement se situe aux alentours de 60%.

La puissance nominale de la génératrice devrait être adaptée à la **puissance fournie par la turbine**. Quand une turbine de 30 kW ne peut fournir, dans des conditions hydrauliques données, que 20 kW au maximum, il faut choisir une génératrice de 20 kW.

La sélection judicieuse de la génératrice est importante pour différentes raisons. La puissance détermine les dimensions et par conséquent le prix de la génératrice. Une génératrice de puissance nominale trop élevée (par exemple 55 kW au lieu de 40 kW) a généralement un rendement plus faible qu'une génératrice dimensionnée au plus juste, car l'impact des pertes fixes (excitation et refroidissement) devient plus grand à charge partielle. Une génératrice sous-dimensionnée s'échauffera trop, ce qui détériorera l'isolation de ses bobinages. La génératrice surmontera cependant sans dommage des surcharges momentanées de 10%.

La **puissance fournie par la génératrice** d'une centrale hydroélectrique de faible puissance se calcule comme suit:

$$\text{puissance électrique [kW]} = \frac{\text{puissance turbine [kW]} \cdot \text{rendement transmission [\%]} \cdot \text{rendement génératrice [\%]}}{10'000}$$

Exemple:

Pour une turbine d'une puissance de 48 kW, une transmission à courroie d'un rendement de 95% (multipliant la vitesse de rotation dans le rapport de 1 à 2.4) et une génératrice d'un rendement de 90%, il en résulte une puissance électrique de la génératrice de 41 kW. On pourra choisir une génératrice d'une puissance nominale de 40 kW.

Dans le cas d'une génératrice synchrone, on indiquera comme puissance fournie la puissance apparente. La puissance apparente (kVA) se compose de la puissance effective (kW) et de la puissance réactive (kVar), qui s'additionnent géométriquement. Dans le cas d'une génératrice synchrone de la classe de puissance 1 à 100 kW, le facteur de puissance $\cos \varphi$ est d'environ 0.8. Cela signifie que la puissance effective se montera à 80% et la puissance réactive à 60% de la puissance apparente.

Si l'on utilise un moteur comme génératrice, on peut prendre comme puissance électrique fournie la puissance nominale indiquée sur le moteur. La puissance d'entraînement correspondante (puissance de la turbine) s'obtient simplement en ajoutant les pertes (pour un moteur de 3 kW: environ 4 kW; pour 10 kW: environ 11 kW; pour 100 kW: environ 105 kW).

Au-delà d'une puissance de 30 kW, les **pertes de la génératrice** correspondent à un rendement à puissance nominale d'environ 90%. Les génératrices de grande puissance ont un rendement dépassant 95%.

A charge partielle (jusqu'à 25% de la puissance nominale), le rendement tombe à 70% environ.

Les petits moteurs asynchrones (5 kW et moins) employés comme génératrices ont un mauvais rendement (moins de 60%) et ils sont difficiles à régler. Pour cette gamme de puissance et une exploitation en îlot, il faut examiner le recours possible à une génératrice synchrone excitée par un aimant permanent. On peut aussi faire des essais sur l'installation avec différents moteurs asynchrones.

Les **pertes dans les lignes électriques (pertes de transport)** sont fonction de la longueur et de la section de ces lignes. Elles se montent en moyenne à 10% de la puissance transmise. Quand les consommateurs se trouvent éloignés (quelques kilomètres) de la centrale, il est possible d'acheminer l'énergie à une tension plus élevée (par exemple 1000 V). On choisira alors de préférence une génératrice produisant directement cette tension, qui sera abaissée par un transformateur à celle du réseau (par exemple 1000/400 V) à l'arrivée chez les consommateurs. Le transformateur est souvent moins cher que les lignes de section plus élevée qui devraient être posées en son absence.

Montage

Quand on peut s'affranchir d'une transmission, l'arbre de la génératrice peut être directement monté sur l'axe de la turbine par accouplement. Pour limiter les contraintes agissant sur les roulements, on veillera à un alignement précis de l'axe et à un accouplement souple. La figure suivante montre une configuration possible.

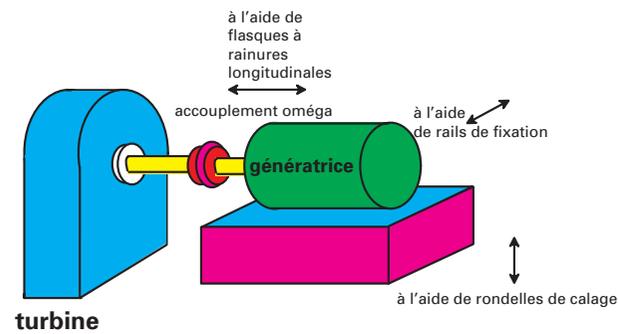


Fig. 26 Exemple de configuration de montage permettant l'alignement précis des axes des deux machines

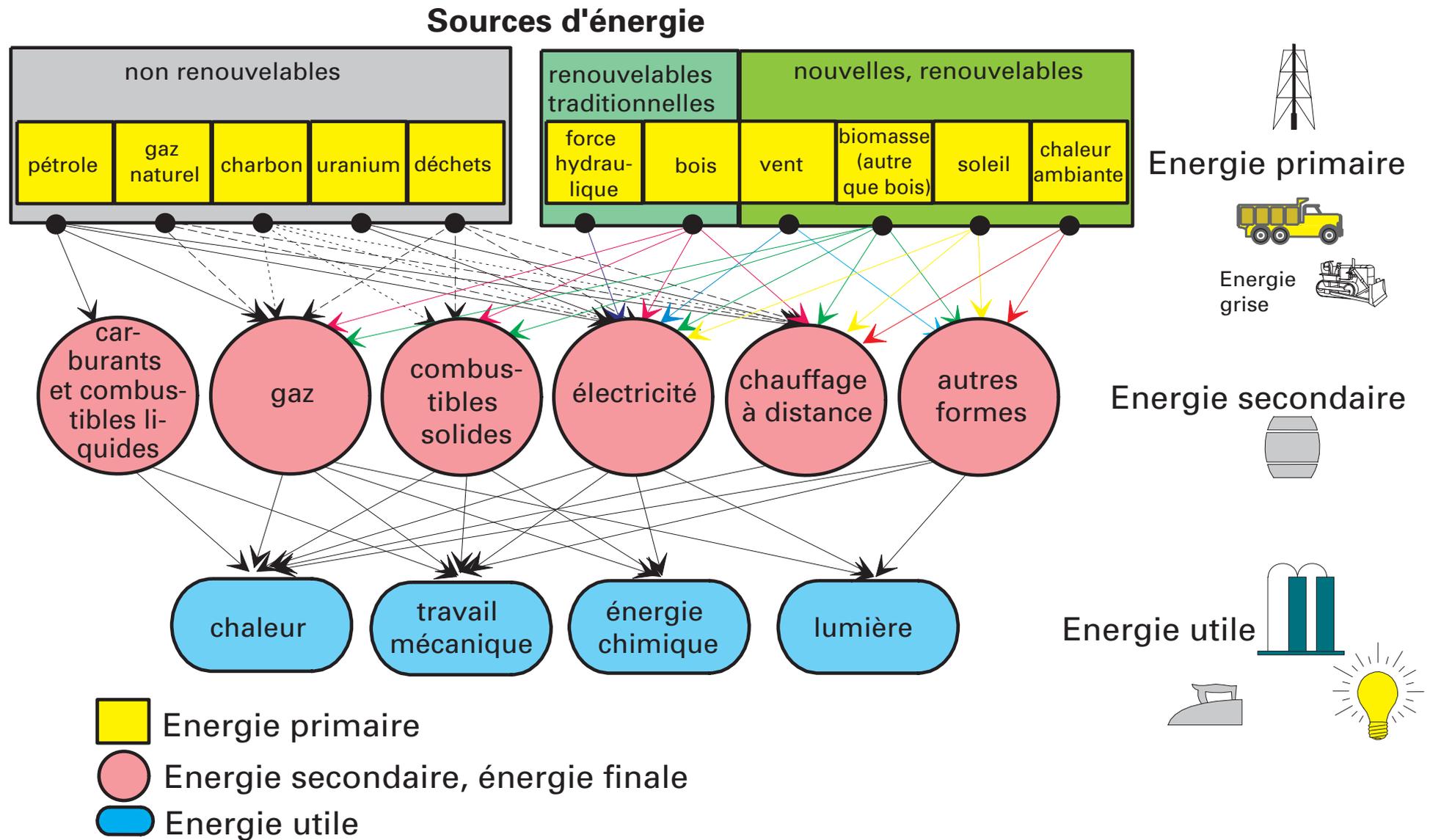
6 Bibliographie

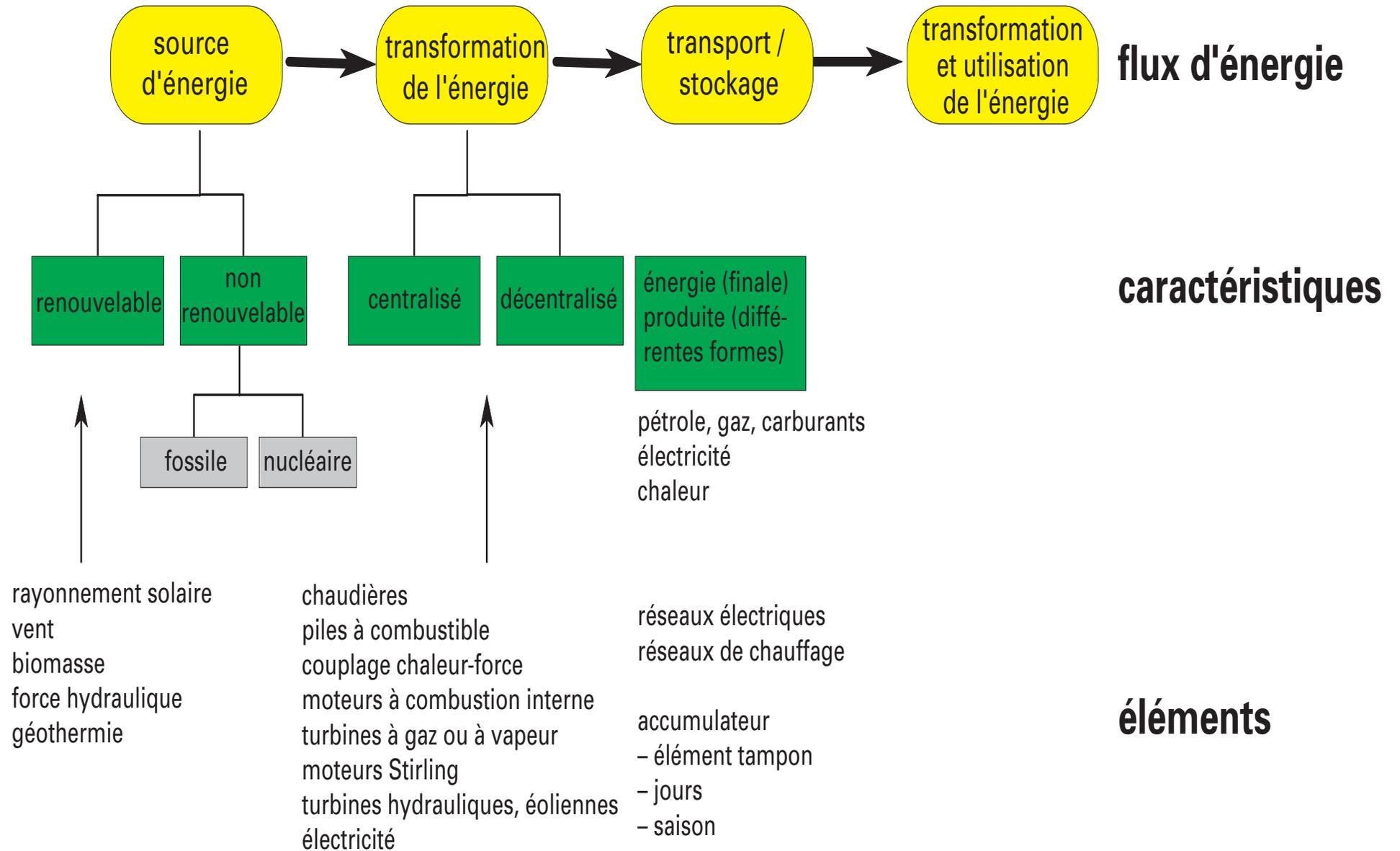
- Additive oder alternative Energiequellen? Basiswissen zum Thema «Unerschöpfliche Energien» (Sources d'énergie additives ou alternatives? Connaissances de base sur le thème de l'énergie inépuisable), Energie-Verlag GmbH, Blumenstrasse 13, D-16900 Heidelberg 1
- Office fédéral des questions conjoncturelles, Walter Ott, Klaus P. Masuhr, Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge im Strom- und Wärmebereich (Coûts externes et majorations calculées des prix de l'énergie), PACER, EDMZ Berne, 1994, N° de commande 724.270.7 d/f
- Office fédéral des questions conjoncturelles, Kleinwasserkraftwerke – Erneuerbare Energien (Petits aménagements hydroélectriques – Energies renouvelables), PACER, EDMZ Berne, 1993, N° de commande 724.244 d/f
- Peter Schlegel, Das Energieproblem im Bewusstsein der Menschen (Le problème de l'énergie dans la conscience humaine), Eigenverlag, Güterstalstrasse 15, 8133 Esslingen
- Beat Rothweiler, Schweizer Energiefachbuch – Wieviel Energie braucht Energie? (Le livre des professionnels suisses de l'énergie – De combien d'énergie l'énergie a-t-elle besoin ?), 1997
- Maja Messmer et al., L'énergie, facteur-clé de notre temps, 1998, à commander chez LEP, Loisirs et pédagogie, 1052 Le Mont-sur-Lausanne, tél. 021 651 25 70
- Roland Bamert, Windenergie Schweiz – Entscheidungsgrundlagen, Aspekte, Politik (L'énergie éolienne en Suisse – Bases de décision, aspects divers, politique), Eigenverlag, Winterthur, 1994

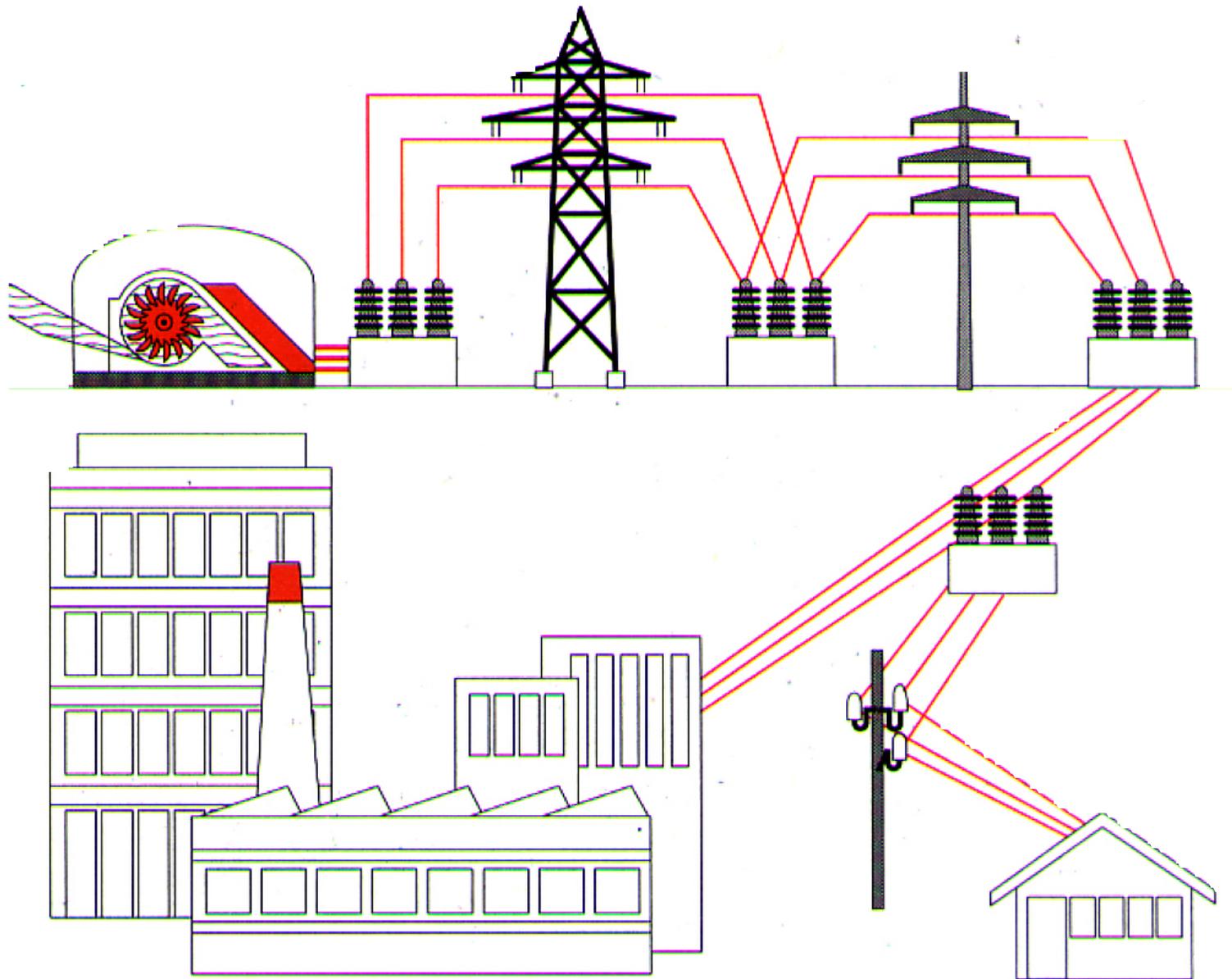
7 Sources

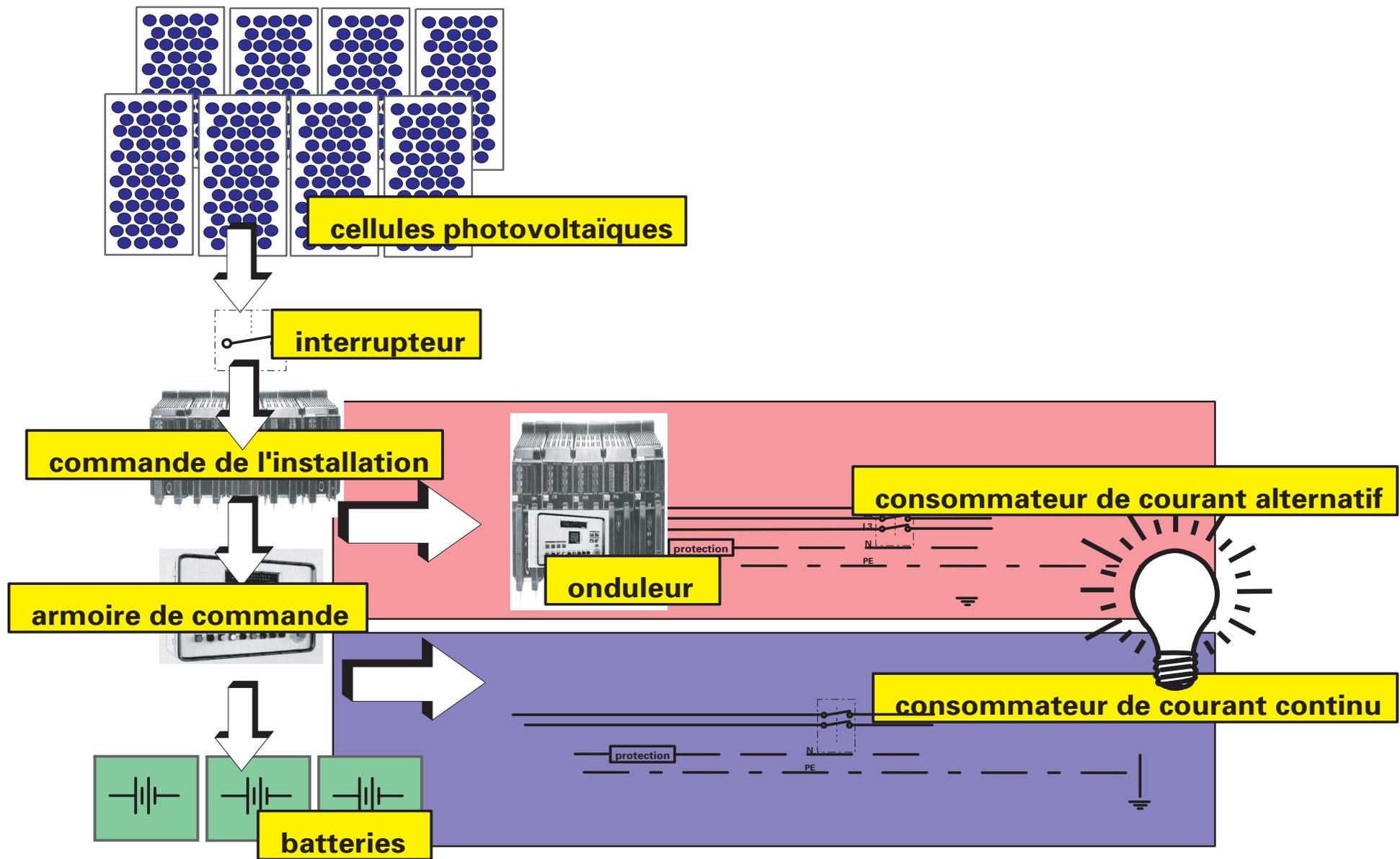
Les figures ont toutes été élaborées par l'auteur qui s'est basé en partie, comme pour le texte, sur les ouvrages cités dans la bibliographie.

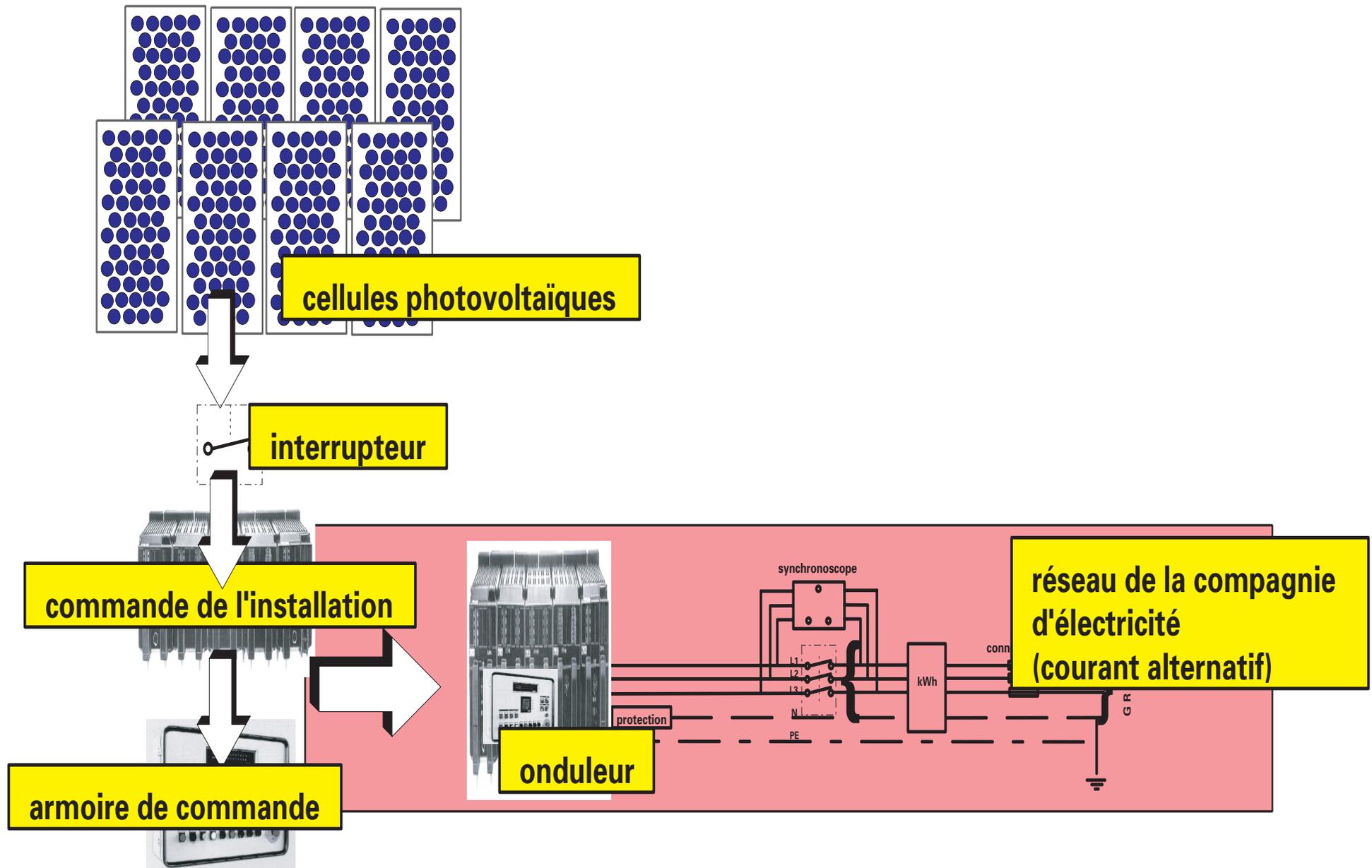
8 Modèles

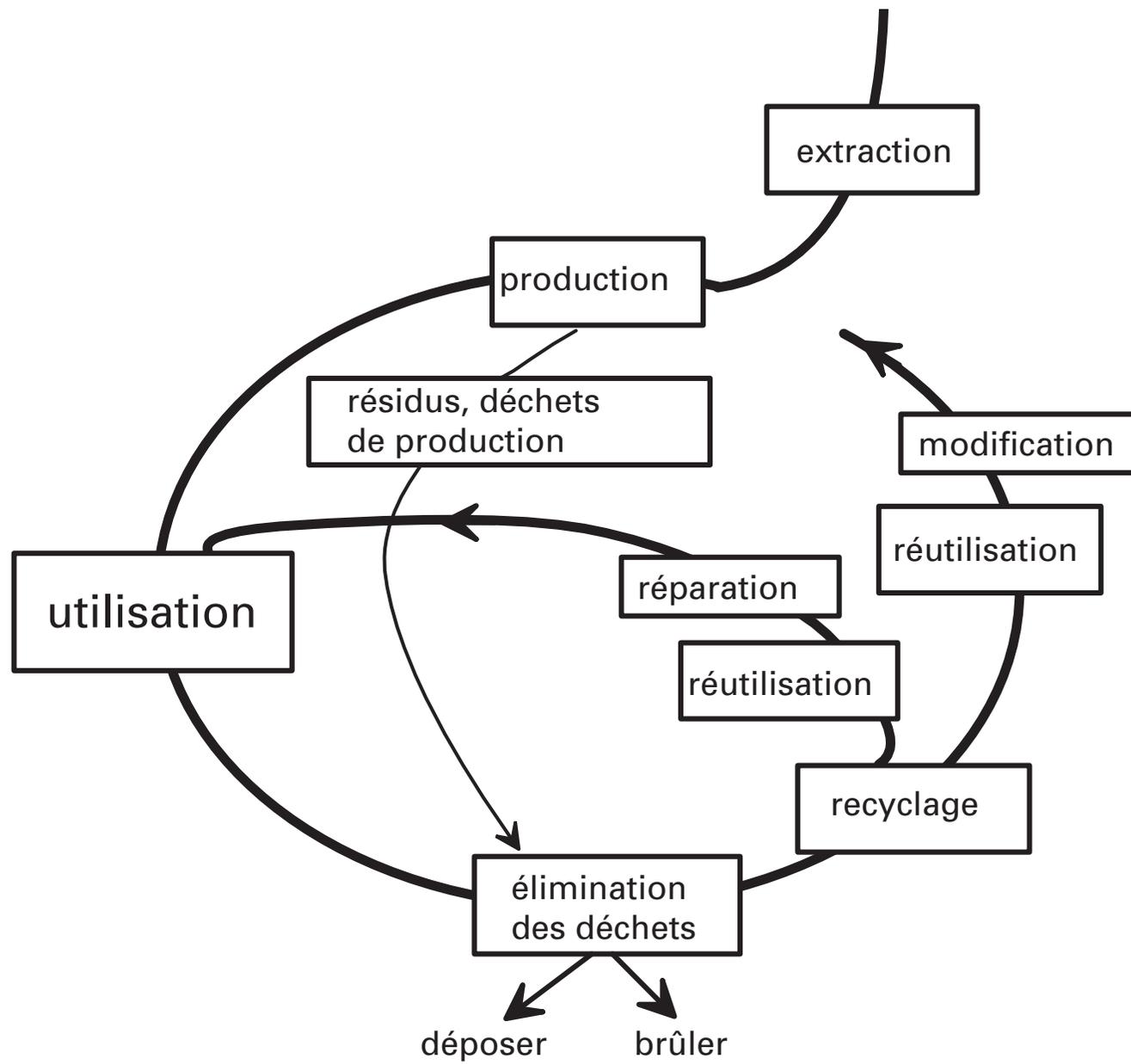


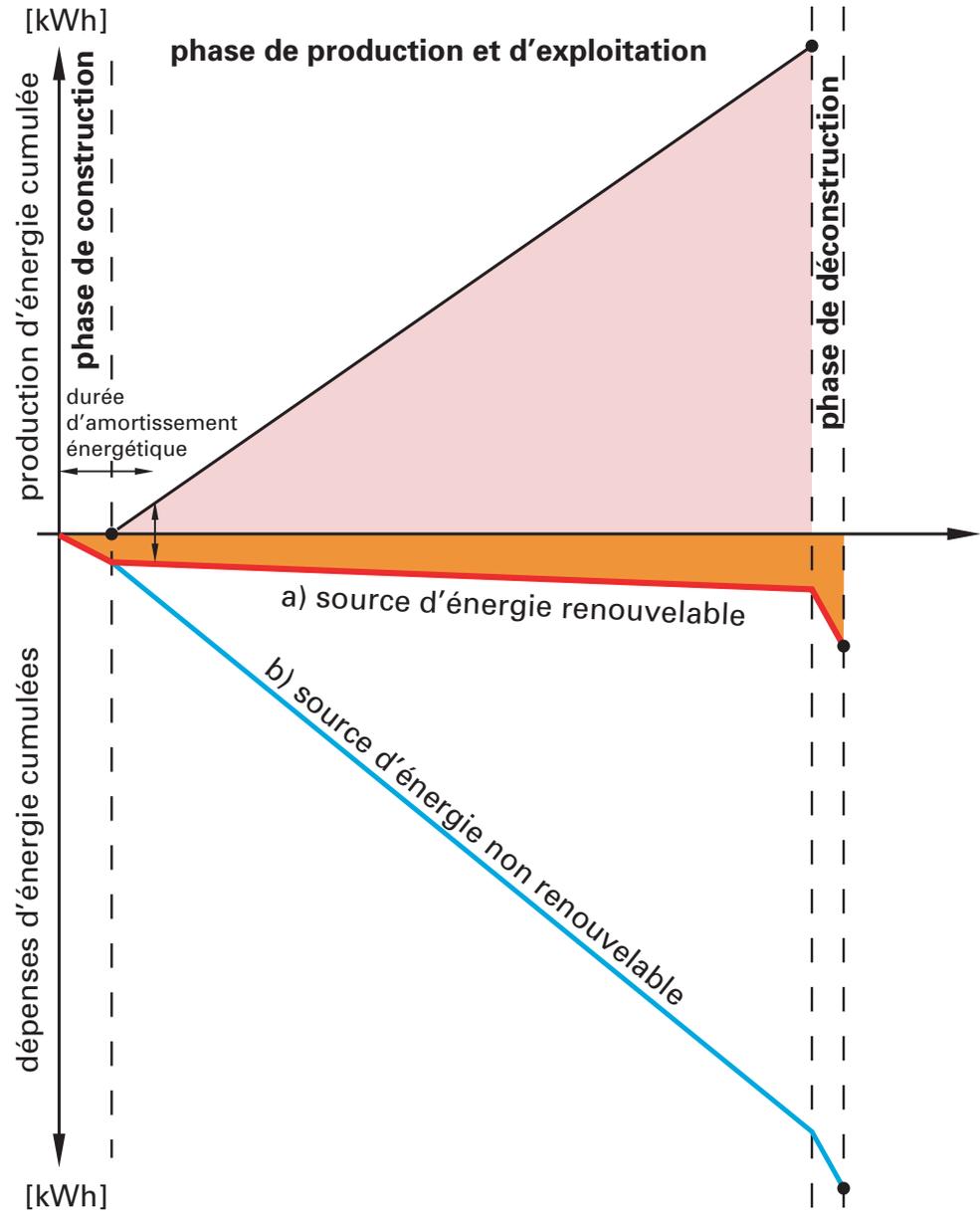


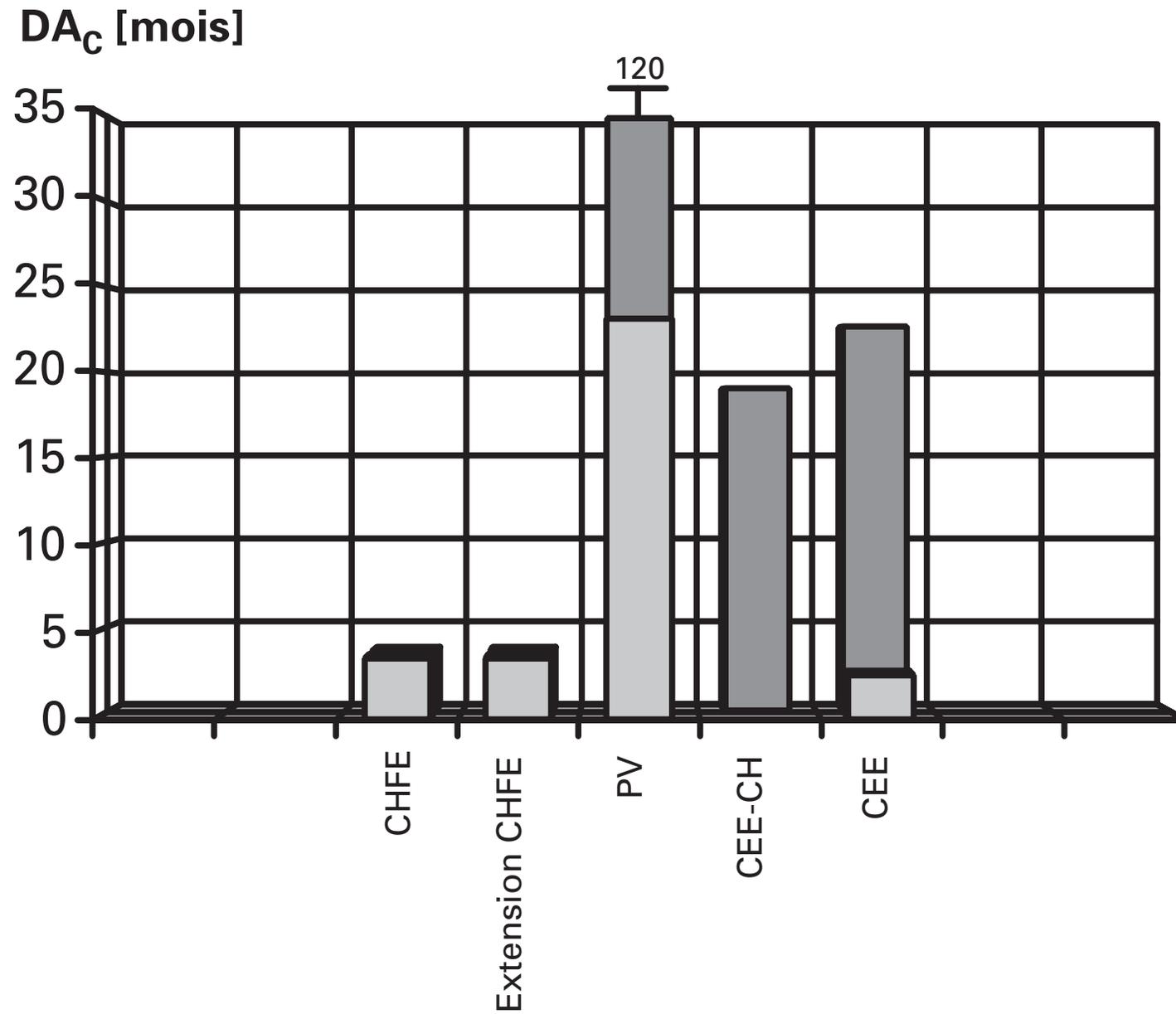










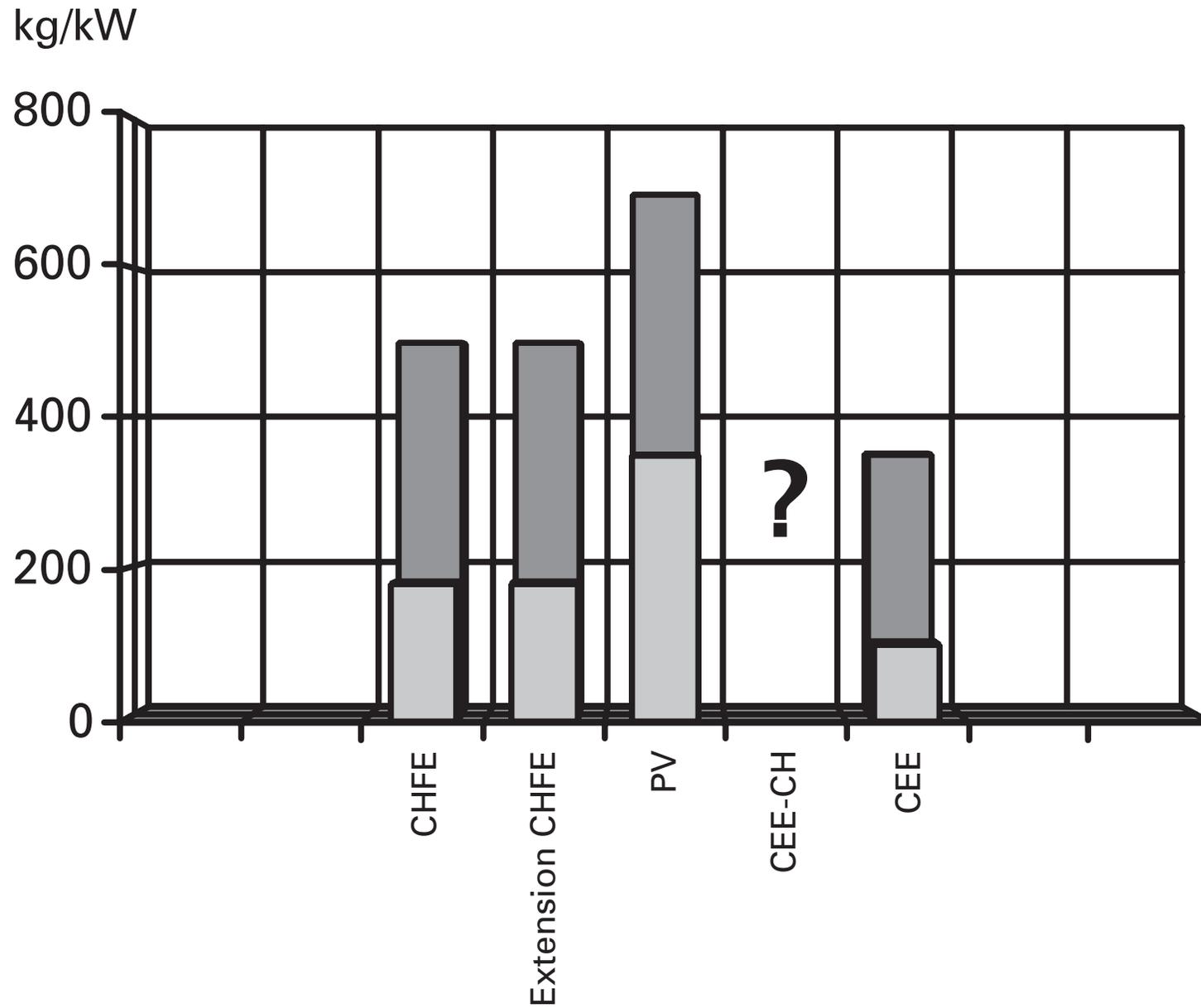


Chaleur produite par

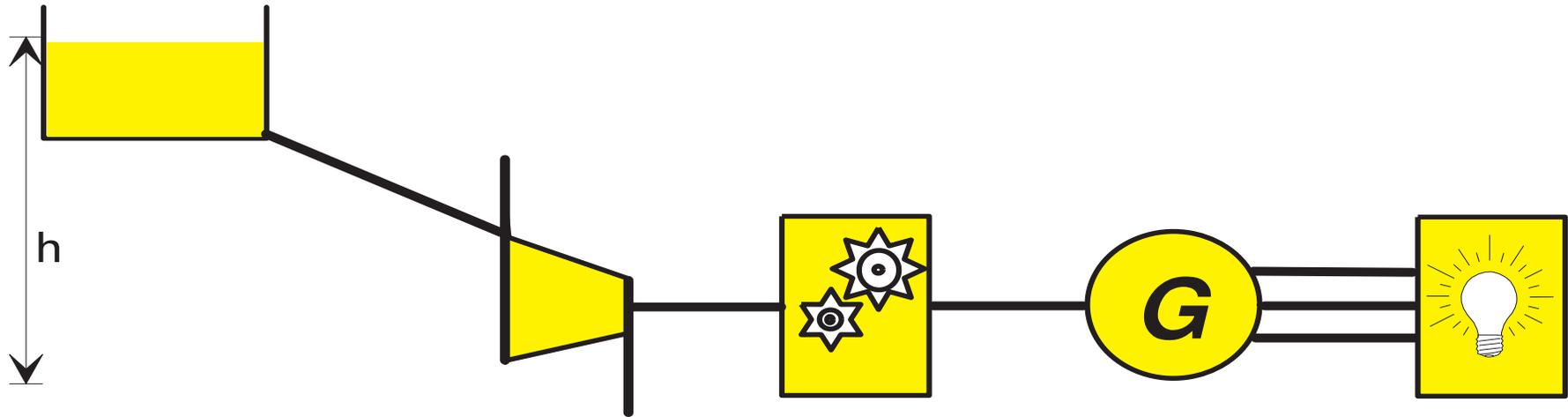
Source d'énergie	bois	soleil	gaz	mazout	charbon
Facteur de foisonnement	7,1	4,0	0,7	0,7	0,5

Electricité produite par

Source d'énergie	soleil (PV)	panier énergétique UCPTE	panier énergétique CH
Facteur de foisonnement	1,6	0,2	0,35







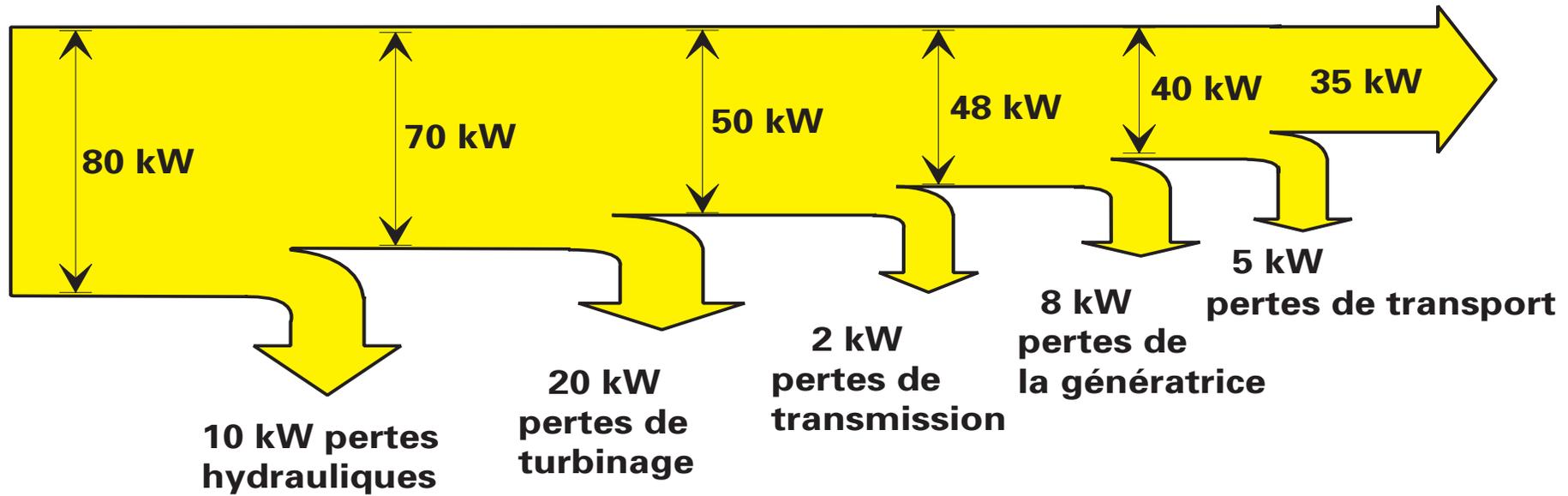
captage

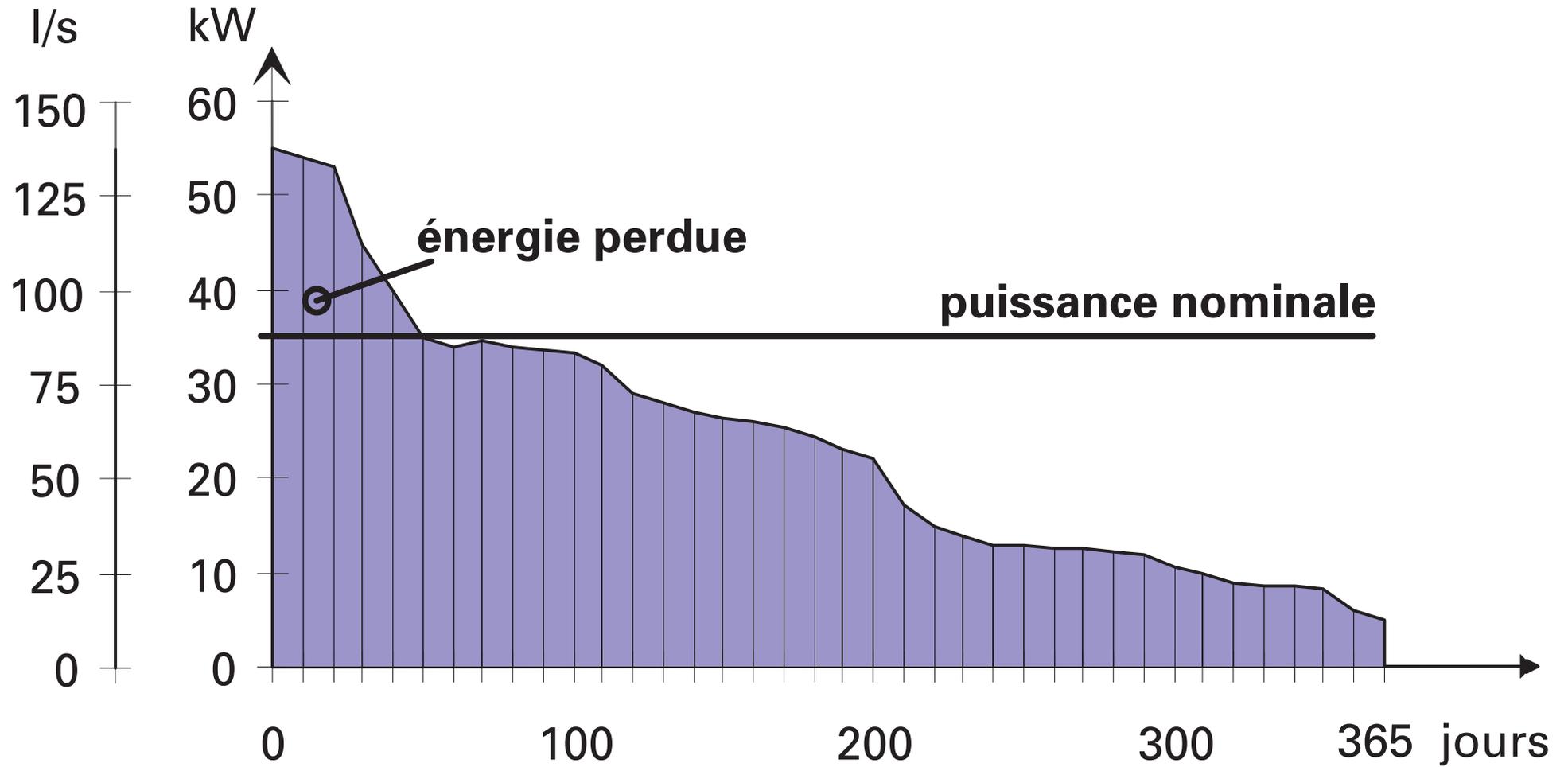
turbine

transmission

génératrice

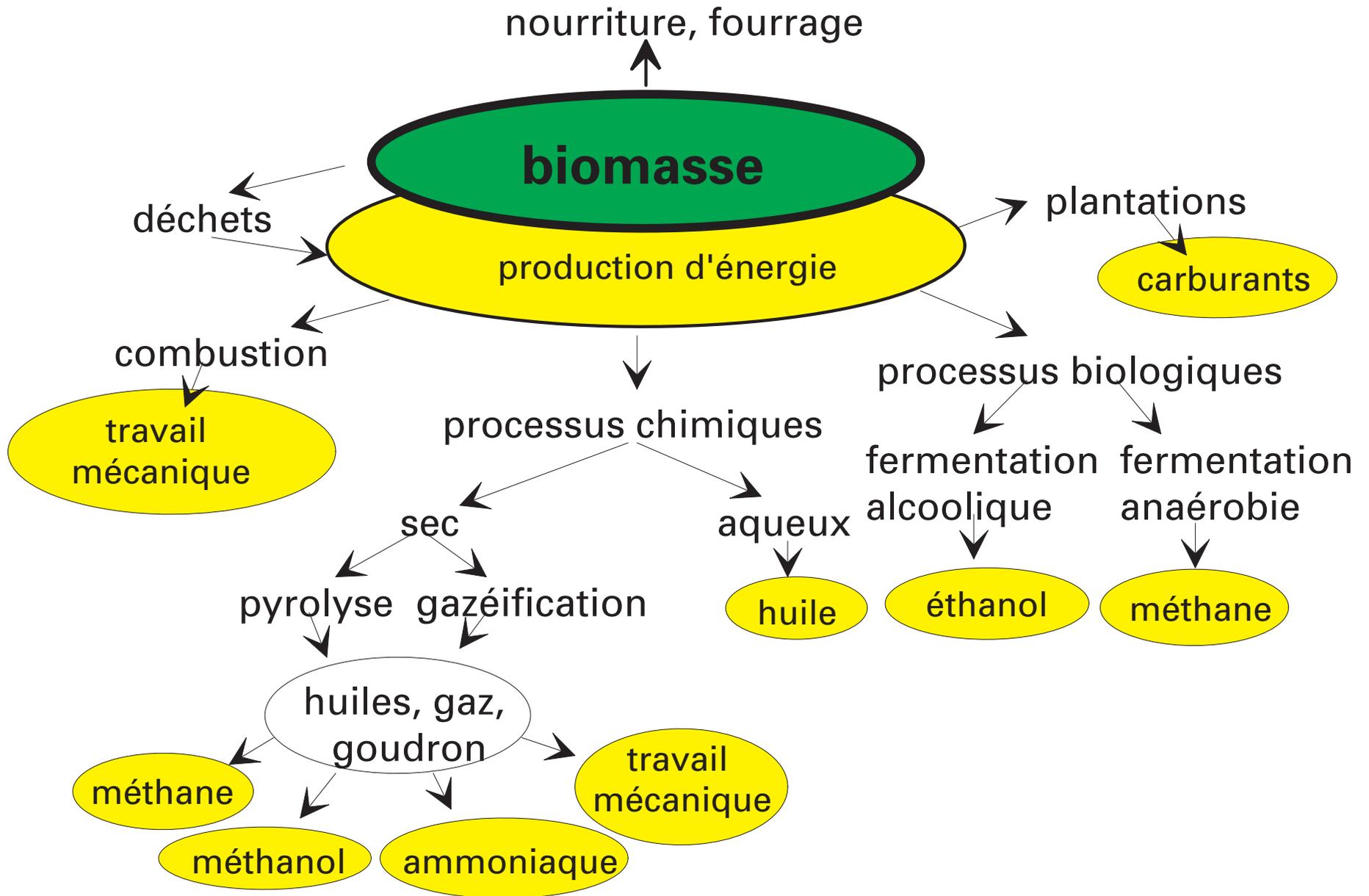
consommateur

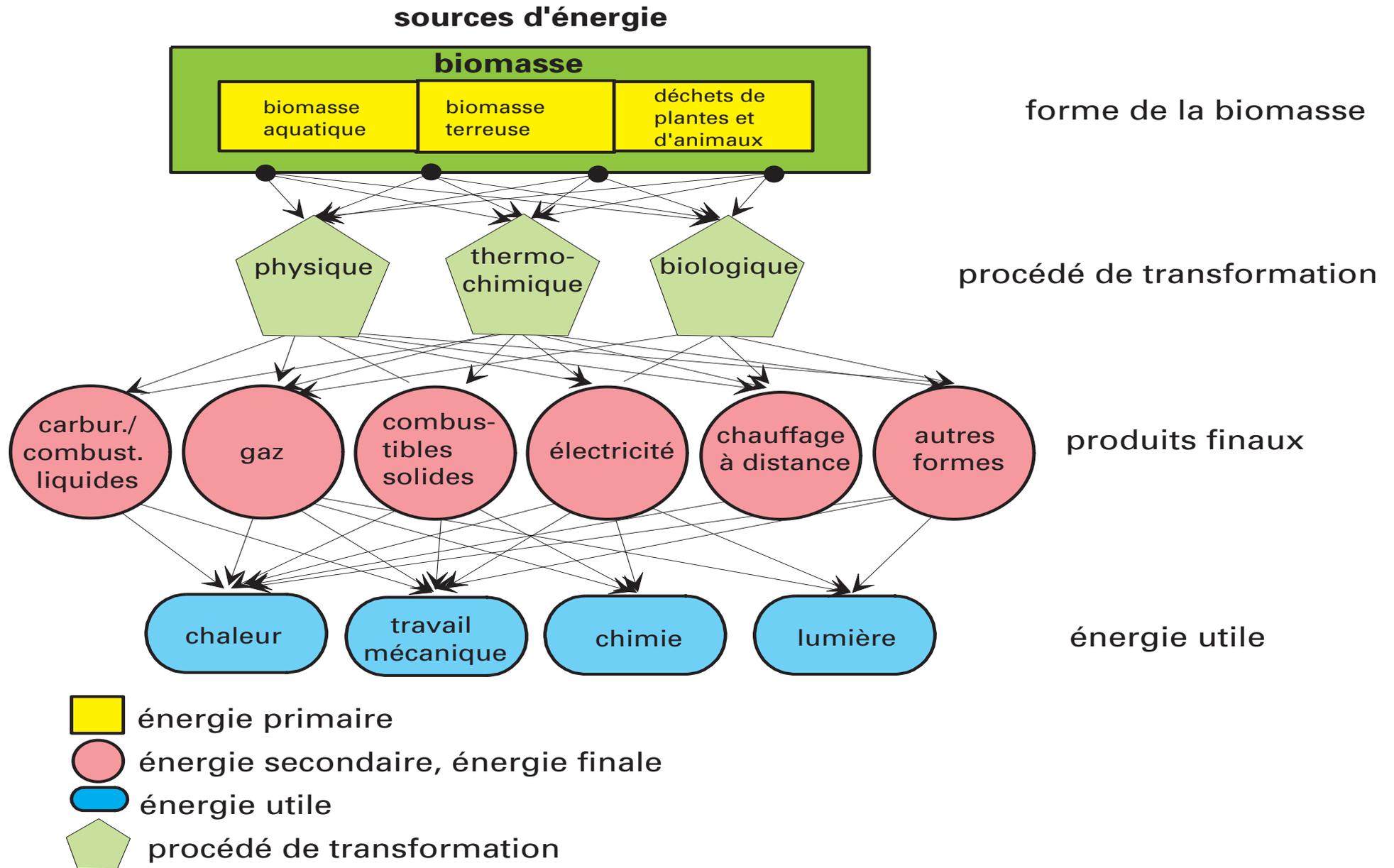


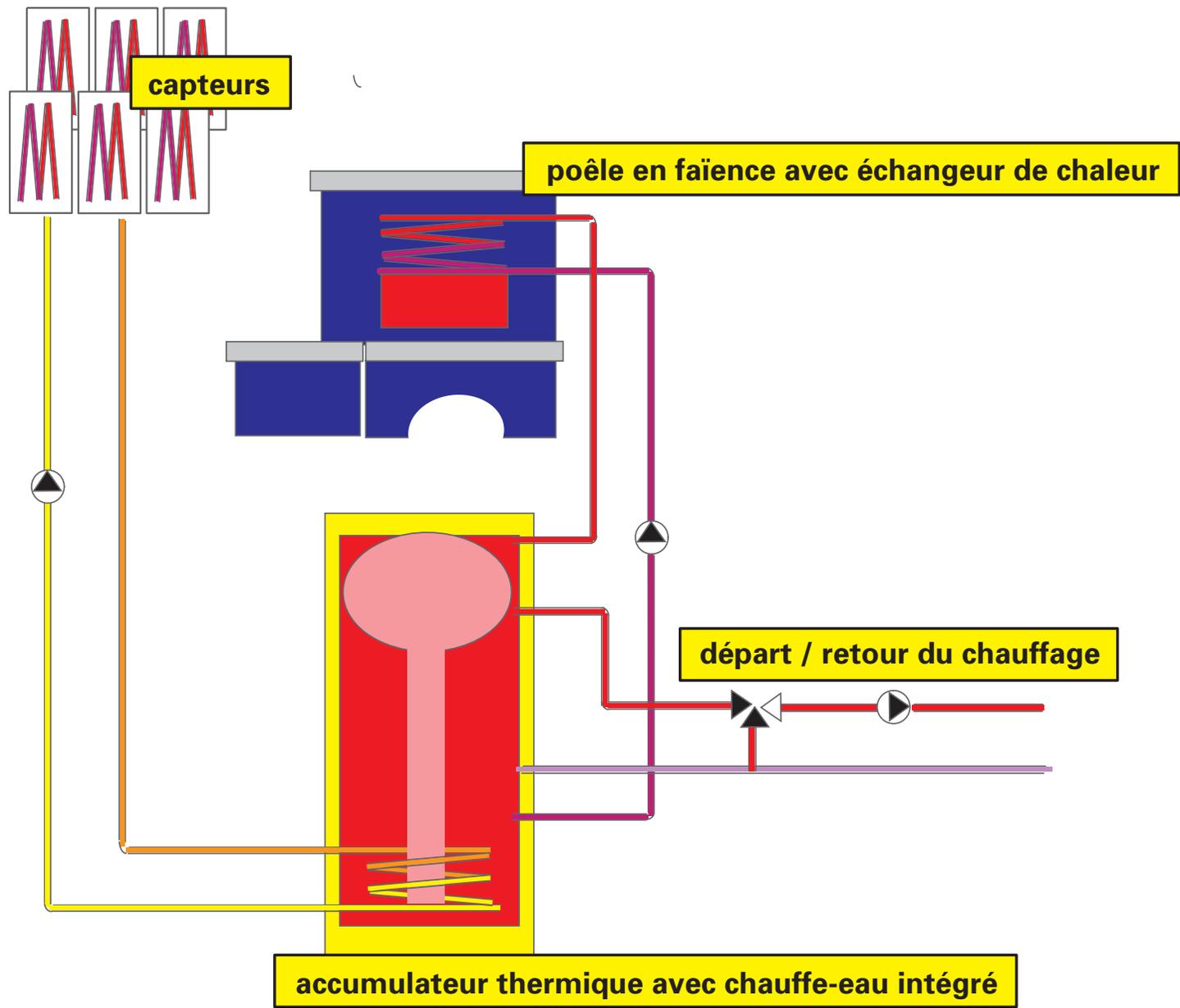




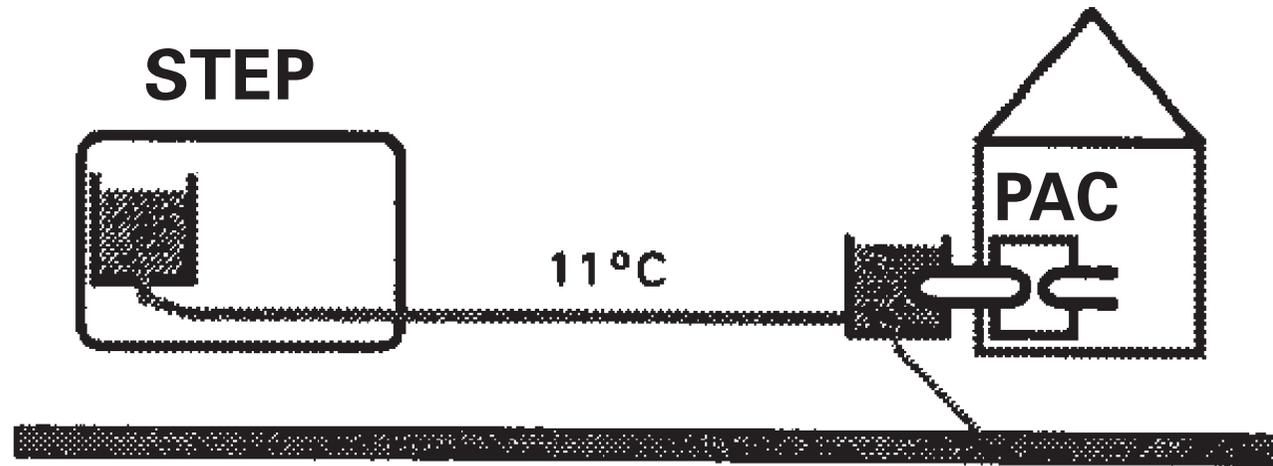




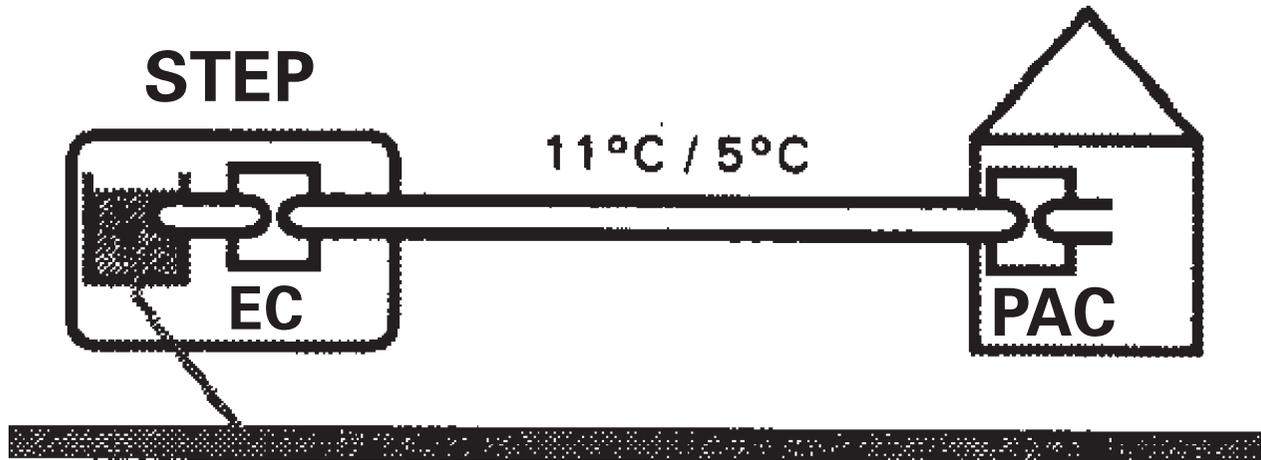


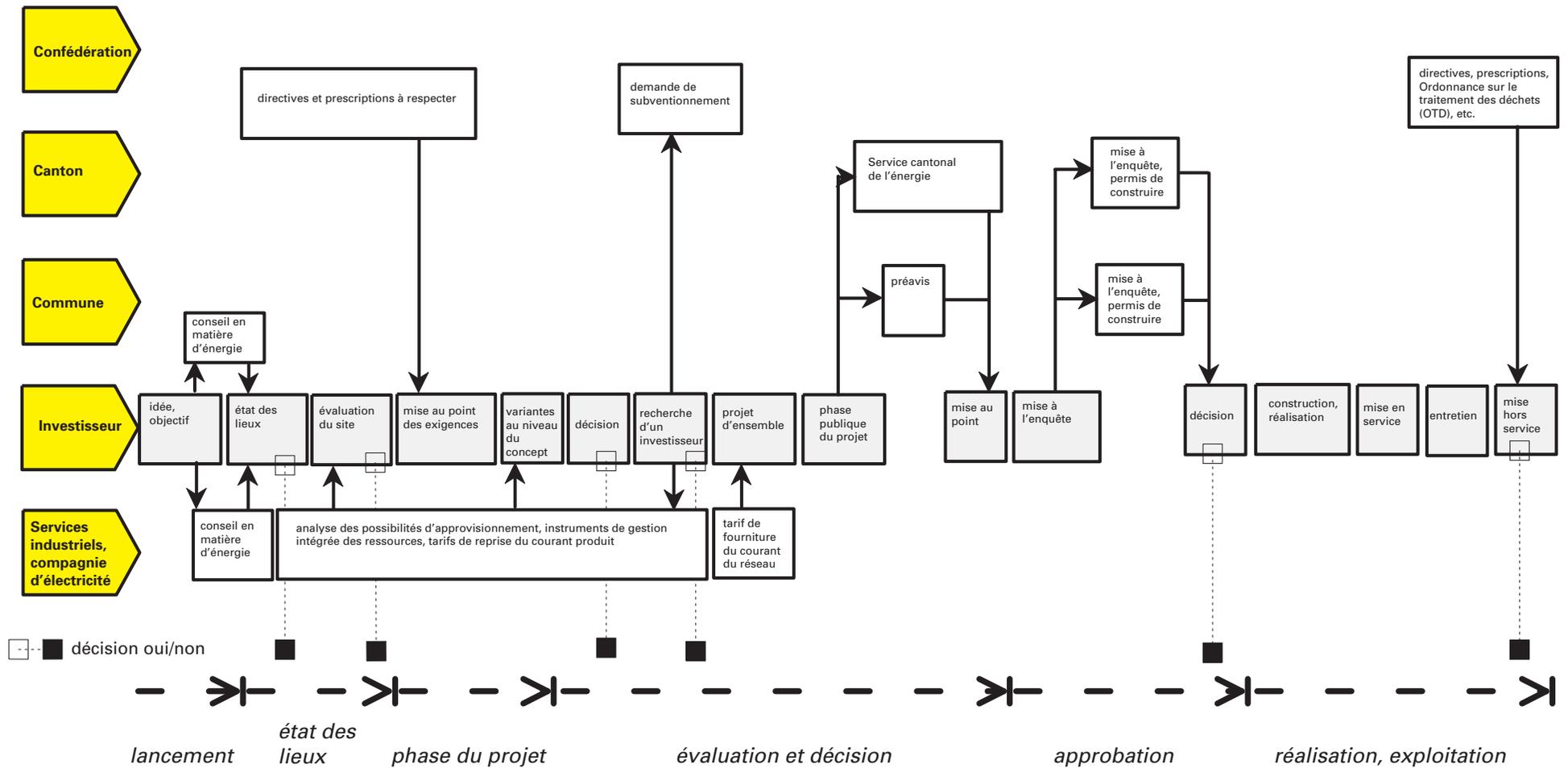


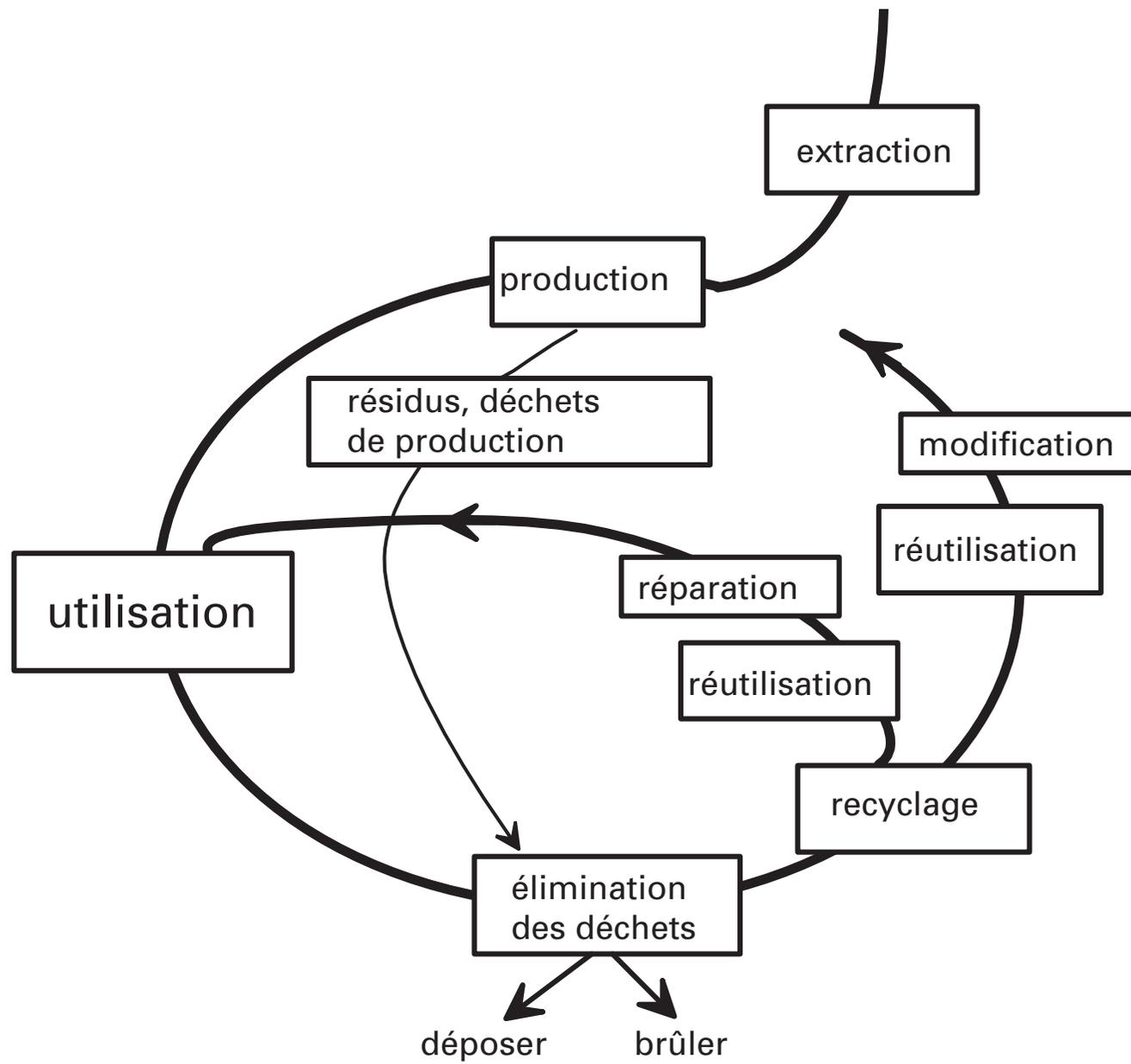
circuit ouvert



circuit fermé







Intensité

- éviter
- rendre aussi petit que possible

- intensité de matériau
- énergie
- matières premières

Durée de vie

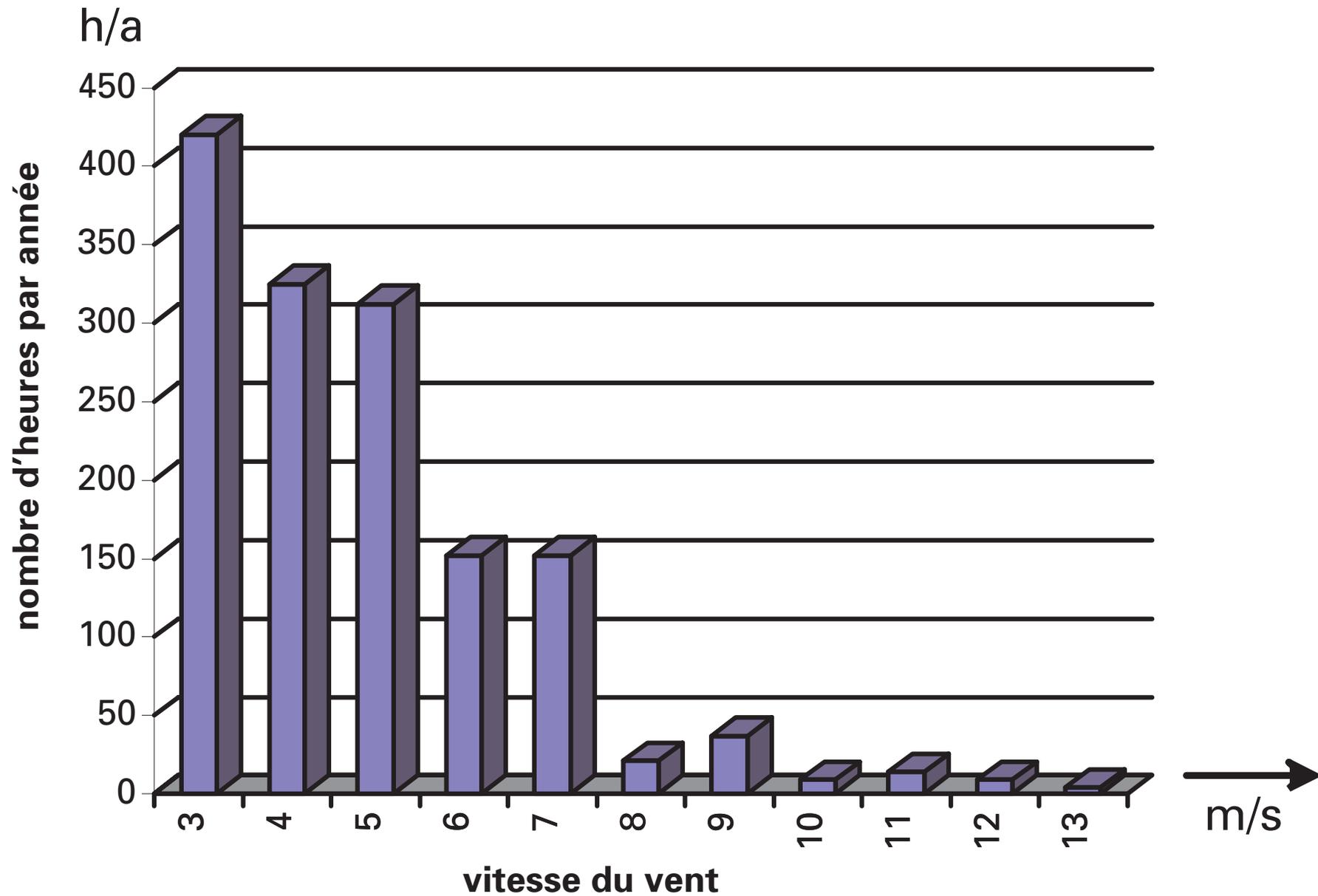
- réparable
- modifiable
- de conception modulaire

Recyclage

- séparation en matériaux purs
- démontage
- marché secondaire des matières premières

Concept du cycle de vie des produits

- concept de recyclage
- concept de démontage et de collecte
- concept de contrôle de la qualité
- concept de distribution fractionnée à des tiers
- concept d'organisation



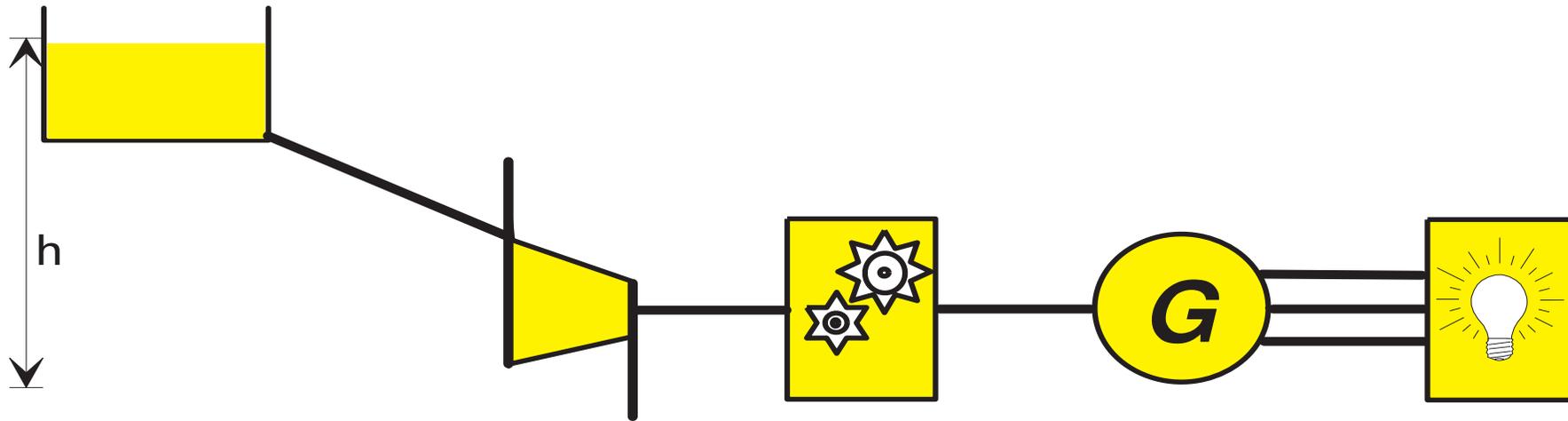
Classe de vitesse du vent [m/s]	Plage		Nombre d'heures par an [h]
	de [m/s]	à [m/s]	
3	3	4	420
4	4	5	325
5	5	6	312
6	6	7	152
7	7	8	152
8	8	9	21
9	9	10	37
10	10	11	9
11	11	12	14
12	12	13	9
13	13	14	4

Vitesse du vent [m/s]	Puissance de la génératrice [kW]
3-4	0,07
4-5	0,13
5-6	0,22
6-7	0,37
7-8	0,56
8-9	0,79
9-10	1,11
10-11	1,65
11-11	1,98
12-13	2,01
13-14	2,02

Classe de vitesse du vent [m/s]	Plage		Nombre d'heures par an [h]	Puissance de la généra- trice [kW]	Energie produite [kWh]
	de [m/s]	à [m/s]			
3	3	4	420	0,07	29,40
4	4	5	325	0,13	42,25
5	5	6	312	0,22	68,64
6	6	7	152	0,37	56,24
7	7	8	152	0,56	85,12
8	8	9	21	0,79	16,59
9	9	10	37	1,11	41,07
10	10	11	9	1,65	14,85
11	11	12	14	1,98	27,72
12	12	13	9	2,01	18,09
13	13	14	4	2,02	8,08

Production potentielle d'énergie [kWh]

408,05



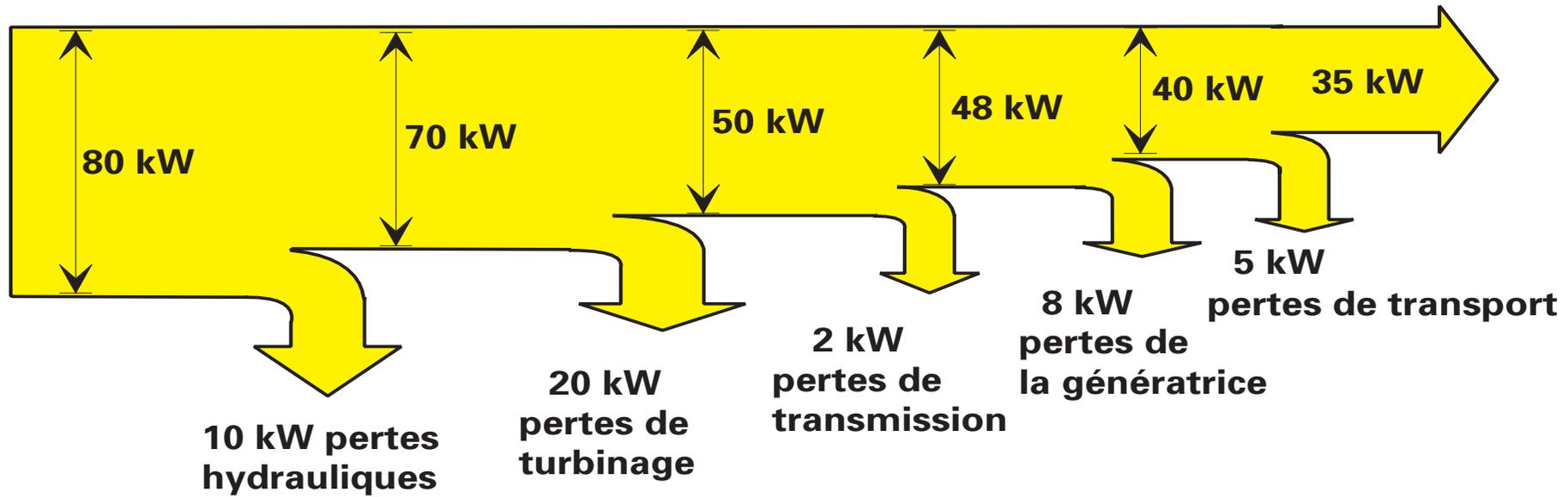
captage

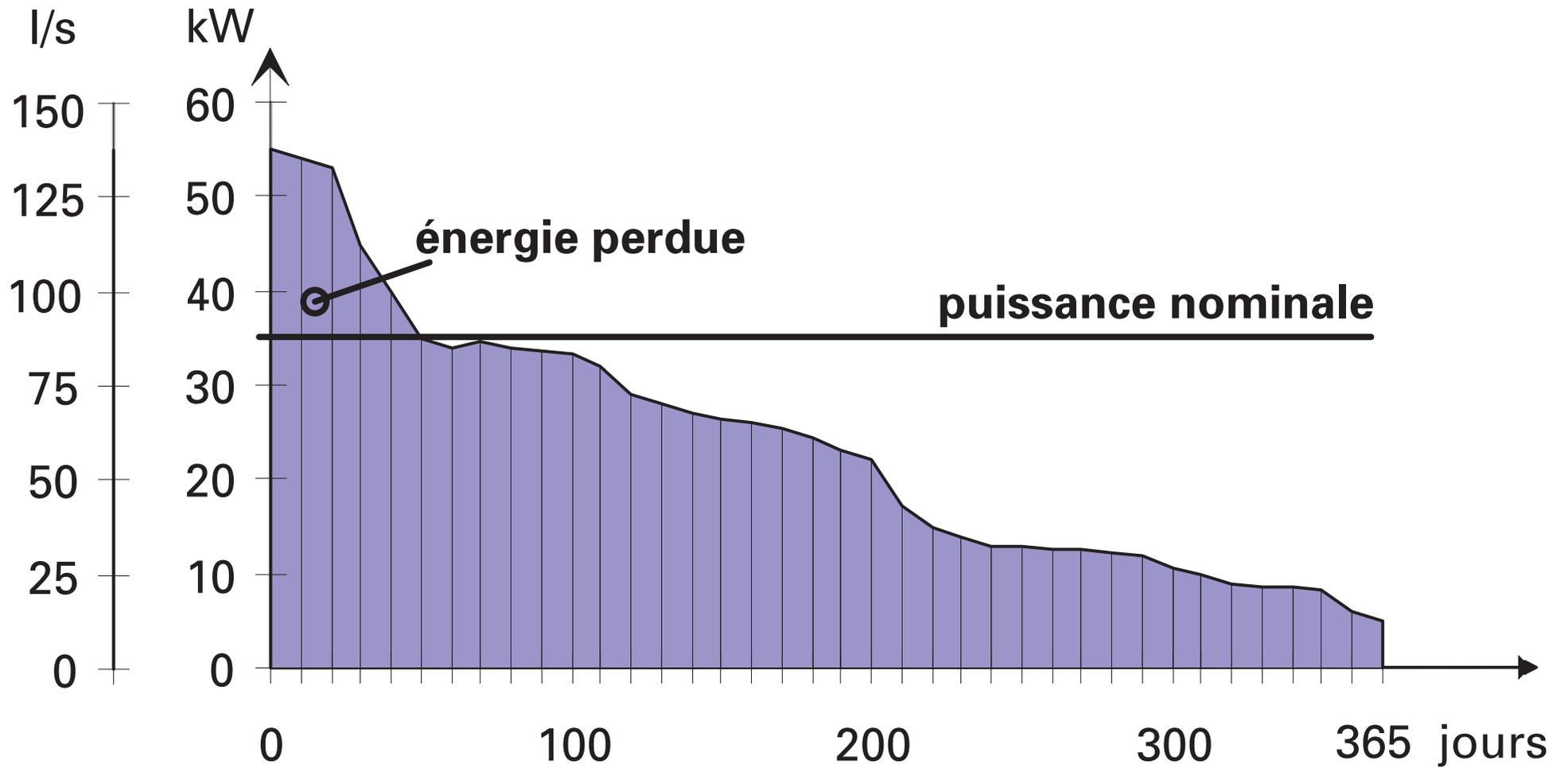
turbine

transmission

génératrice

consommateur





Type de turbine	pour 10 kW	pour 50 kW	pour 100 kW
Pelton	70 %	85 %	90 %
crossflow	50 %	60 %	70 %
Francis	70 %	80 %	90 %
hélice/Kaplan	60 %	70 %	85 %
reversed pumps	40 %	60 %	75 %

