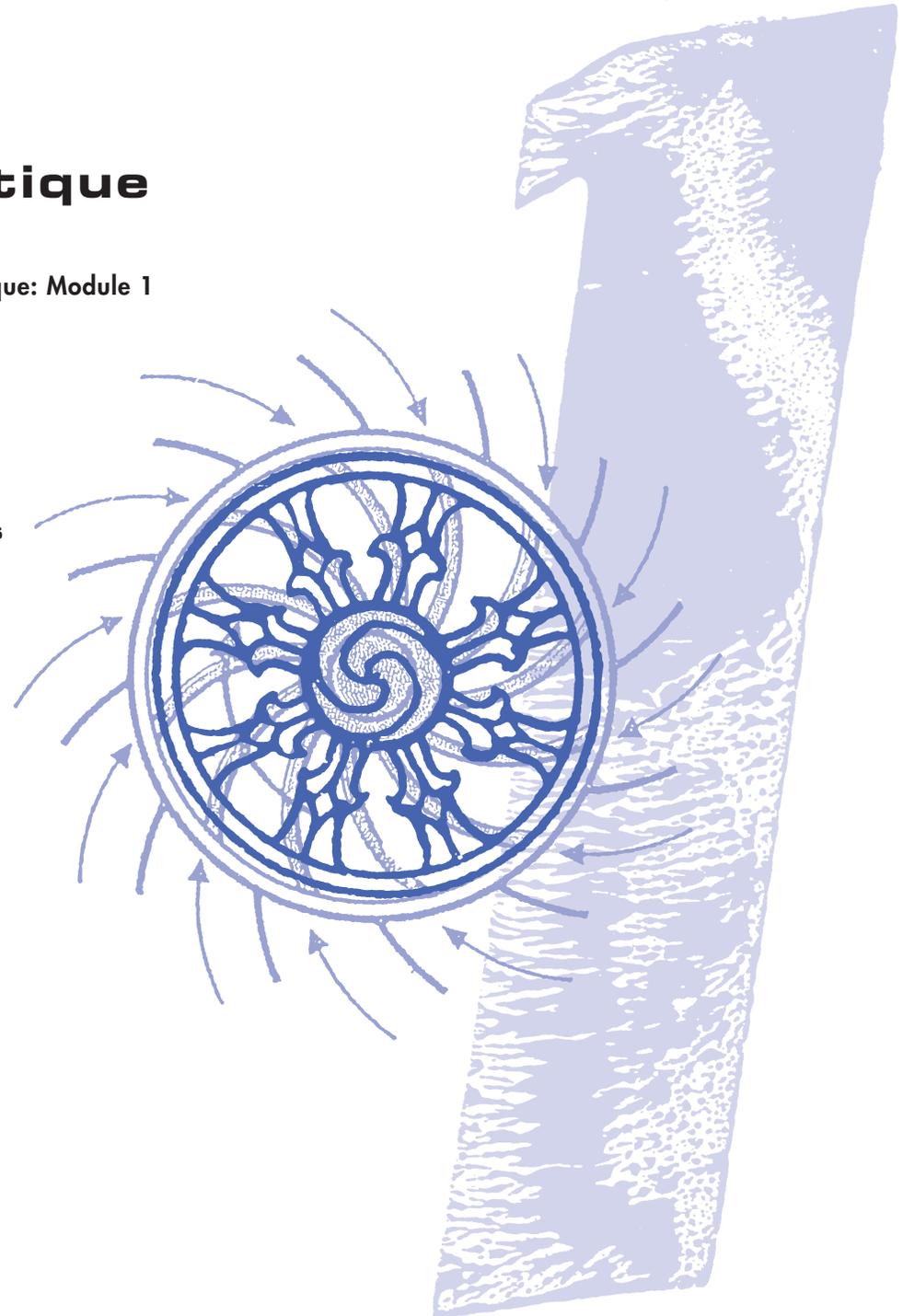


Notions de base d'énergétique

L'énergie dans l'enseignement professionnel

Modules pour les professions techniques, de l'électricité et de l'informatique: Module 1

- 1 Introduction: de quoi s'agit-il?**
- 2 Objectifs de la formation**
- 3 Eléments proposés pour le plan des leçons**
- 4 Connaissances de base**
 - **Forme et caractéristique de l'énergie**
 - **Unités**
 - **Sources d'énergie**
 - **Transformation d'énergie**
 - **Perte d'énergie et rendement**
 - **Transport et stockage**
 - **Energie grise**
- 5 Exercices et solutions proposées**
- 6 Bibliographie**
- 7 Sources**
- 8 Modèles**





1 Introduction: de quoi s'agit-il ?

L'énergie est nécessaire à la vie

Aux temps préhistoriques, l'homme et l'animal partageaient les mêmes sources d'énergie : la force musculaire et le rayonnement solaire. Nos ancêtres domestiquèrent le feu il y a près de 600'000 ans. Depuis lors, ils n'ont jamais pu se passer d'énergie. A commencer, pendant des millénaires, par des sources inépuisables ou qui se renouvellent constamment : le soleil, le bois et, plus tard, le vent et l'eau.

L'invention de la machine à vapeur, il y a quelques 300 ans, ouvrait l'ère de l'exploitation intensive des immenses réserves de combustibles qui s'étaient amassées pendant des millions d'années : d'abord le charbon, puis le pétrole et le gaz naturel. Vers la fin du siècle passé, l'homme construisait les premières centrales hydrauliques. Enfin, il y a quelques décennies, il maîtrisait la fission nucléaire.

Le recours à ces différentes ressources a grandement facilité l'existence humaine. Mais parallèlement, l'accroissement constant des besoins en énergie allait rapidement révéler ses aspects négatifs, l'environnement subit une pression de plus en plus forte et il apparut que les réserves d'énergie fossiles (pétrole, gaz, charbon), ainsi que les combustibles nucléaires finiraient par s'épuiser.

Pendant des millénaires, la consommation d'énergie évolua à l'unisson du développement démographique. L'avènement des énergies fossiles et l'explosion démographique, au siècle passé eurent pour effet une croissance explosive de la consommation énergétique. Cette consommation continuera d'augmenter fortement au cours du siècle prochain. Et il faut veiller à ce que ces surplus d'énergie ne soient pas accaparés par les pays industriels, mais qu'ils soient mis à la disposition des nations en voie de développement.

Aujourd'hui, 80 % des ressources énergétiques mondiales sont absorbées par les pays industriels qui n'abritent pourtant que 30 % de la population.

L'évolution ultérieure des besoins en énergie et l'éventuelle stabilisation de la consommation sont des questions qui restent ouvertes. De nombreux facteurs peuvent influencer les processus de développement.

L'homme doit acquérir de nouvelles ressources tout en limitant la consommation, tant il est vrai que l'énergie est indissociable de la civilisation moderne. A ce titre, les énergies «douces» se mettent en évidence: des formes d'énergies dites alternatives, qui portent moins atteinte à l'environnement.



2 Objectifs de la formation

L'apprentie, l'apprenti ...

- connaît les différentes formes d'énergies.
- connaît les notions de qualité de l'énergie et de rendement de conversion d'une forme d'énergie dans une autre.
- sait effectuer des mesures comparatives de rendement dans des cas simples.
- sait expliquer les possibilités de stockage des différents agents énergétiques.
- connaît la notion de puissance mise à disposition.
- sait expliquer la notion d'énergie grise.

Exemples de réponses:

- l'énergie thermique, mécanique, chimique, nucléaire, électromagnétique et de rayonnement.
- la qualité de l'énergie est définie par la capacité de transformation d'une énergie.
- Le rendement des installations CCF à gaz est 1,5 fois meilleure qu'une chaudière moderne. (voir document de base pour la notion de rendement d'une correction d'une force d'énergie dans une autre)
- Voir chapitre 4.6, stockage de gaz, charbon, électricité, bois, ...
- La puissance est un débit d'énergie, l'unité est le joule par seconde [J/s] qu'on appelle watt.
- L'énergie grise est une énergie cachée que nous consommons au quotidien (énergie utile à la fabrication de produits, à l'élimination des déchets, ...) voir chapitre 4.7



3 Eléments proposés pour le plan des leçons

Films en cassette vidéo VHS et CD-Rom interactif

L'**Electricité Romande** dispose d'une palette complète de vidéos réalisées à l'intention du grand public et des écoles. Ces vidéos présentent, entre autres, la production électrique ainsi que l'utilisation rationnelle de l'énergie.

- 19004 La pompe à chaleur
- 19005 La dangereuse expérience avec l'atmosphère – 10 questions sur les changements climatiques
- 19007 Une centrale nucléaire, ça fonctionne comment ?
- 19010 Les déchets radioactifs
- 19011 Energies renouvelables – possibilités et limites
- 19013 I Les centrales au fil de l'eau et II Les centrales à haute chute
- 19015 Enter Cédra
- 19016 Il était une fois... lumière – Les installations électriques dans l'habitat
- 19017 Visite d'une centrale nucléaire
- 19018 Vivre avec les radiations – 10 questions sur la radioactivité
- 19019 L'électricité sans danger
- 19020 Centrale du Mont-Soleil
- 19022 Si l'énergie m'était contée...

CD-Rom 1: «Le futur est électrique»

Ce CD-Rom présente le métier d'ingénieur en énergie électrique (les formations, les filières, les carrières et les défis de l'avenir).

CD-Rom 2: «Electricpower»

Ce double CD-Rom vous présente l'univers magique et secret de l'électricité. 220 animations, 50 séquences vidéo, 1 100 photos vous font pénétrer dans l'histoire, la production, la géographie, les applications, les métiers, l'économie, la politique, le futur et les sciences. Un jeu interactif vous permet de gérer le réseau électrique en temps réel. Une navigation par image déroutante. On se déplace sur les vues panoramiques. Pour le commander, téléphoner au 021 310 30 30 ou envoyer votre commande par E-mail (info@electricite.ch).

Ouvrage d'explication édité par **Infel**, case postale, 8023 Zürich:

- Energie et environnement
- Energies renouvelables
- Comment fonctionne une centrale nucléaire ?
- De la force hydraulique à l'énergie nucléaire, une leçon de physique

Liste de sites Internet en relation avec l'énergie

Cette liste (voir pages 5 et 6) n'est pas exhaustive et contient essentiellement des sites suisses. En principe, ces sites proposent des liens d'autres serveurs.



L'énergie en général

www.iea.org

Agence internationale de l'énergie

www.admin.ch/bfe

Office fédéral de l'énergie

www.energie2000.ch

Programme d'action Energie 2000

www.bp.com/bpstats/index.html

Statistique mondiale de l'énergie

www.statistik.admin.ch

Office fédéral de la statistique

www.admin.ch/buwal

Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage

www.eren.doe.gov

Département de l'énergie des Etats-Unis – Utilisa-
tion rationnelle de l'énergie et énergies renouve-
lables

www.crde.ch

Conférence romande des délégués à l'énergie

Agents énergétiques renouvelables

www.swissolar.ch/index_f.htm

Association Swissolar (énergie solaire)

www.sses.ch

Société suisse pour l'énergie solaire

www.eole.org

Site français sur l'énergie éolienne

www.juvent.ch

Société Juvent exploitant des éoliennes dans le
Jura (Mont Crosin)

www.aseb.ch

Association suisse pour l'énergie du bois
(dès fin 1998)

www.abfall.ch/dechets/arrbois

Association romande de revalorisation du bois

Pompes à chaleur

www.wpz.ch

Centre d'essai et de formation à
Winterthur-Toess

www.waermepumpe.ch

site suisse du programme international
de pompes à chaleur

Electricité

www.electricite.ch

Electricité romande

www.infel.ch

Service d'information sur les applications de
l'électricité

www.atel.ch

Aare – Tessin SA pour l'électricité

www.bfw.ch

Forces motrices bernoises

www.eos-gd.ch

Energie Ouest Suisse et Grande Dixence

www.egl.ch

Electricité de Laufenbourg

www.nok.ch

Force motrices du nord-est de la Suisse

www.edf.fr

Electricité de France



www.hydro.qc.ca
HydroQuébec, Canada

Agents énergétiques fossiles

www.erdoel.ch
Union pétrolière suisse
www.gaz-naturel.ch
Association suisse de l'industrie gazière

Energie nucléaire

www.atomenergie.ch
ASPEA – Association suisse pour l'énergie atomique
www.hsk.psi.ch
Division principale de la sécurité des installations nucléaires (PSI)
www.nagra.ch
CEDRA – Coopérative pour l'entreposage des déchets radioactifs

Utilisation rationnelle de l'énergie

www.minergie.ch
MINERGIE – Techniques à basse consommation d'énergie
www.infoenergie.ch
Informations sur l'énergie (essentiellement en allemand)
www.cerf.org/iiec
Institut international pour la conservation de l'énergie

Visite d'une usine électrique

Hydroélectricité

Electricité d'Emosson SA
1920 Martigny 027 722 66 22
Centrale de la Bâtiaz
– 2 turbines Pelton à axe vertical
– 2 alternateurs 100'000 kVA
– production 840 GWh
Barrage d'Emosson
Compagnie des forces motrices d'Orsières
1937 Orsières 027 783 12 25
– barrage voûte 227 m³ (1973)
– 4 turbines Pelton à 2 jets de 6,7 MW
– production 136 Gwh
Usine d'Orsières
Grande Dixence SA
1950 Sion 027 321 43 11
Centrale de Nendaz
– 3 turbines Pelton à axe vertical à 6 jets de 320 MW
Barrage de Val des Dix
– barrage-poids le plus haut du monde, 400 millions m³ (1962).
Energie Ouest Suisse (EOS)
1000 Lausanne
Barrage de l'Hongrin
– barrage en double voûte
Usine de Bieudron à Chamoson

Compagnie vaudoise d'électricité
1000 Lausanne 5
Usine des Clées, à Lignerolle
– 3 turbines Francis de 8'000 kW
Entreprise électrique Fribourgeoise
1636 Broc 026 921 15 37
Usine hydroélectrique
– 5 turbines Francis
– Electrobroc: musée d'information sur l'énergie

Nucléaire

Centrale nucléaire de Gösgen
4658 Daeniken 062 288 20 00
– puissance 970 MW
Centrale nucléaire de Leibstadt
4353 Leibstadt 056 267 72 50
– puissance 1'030 MW

Eolienne

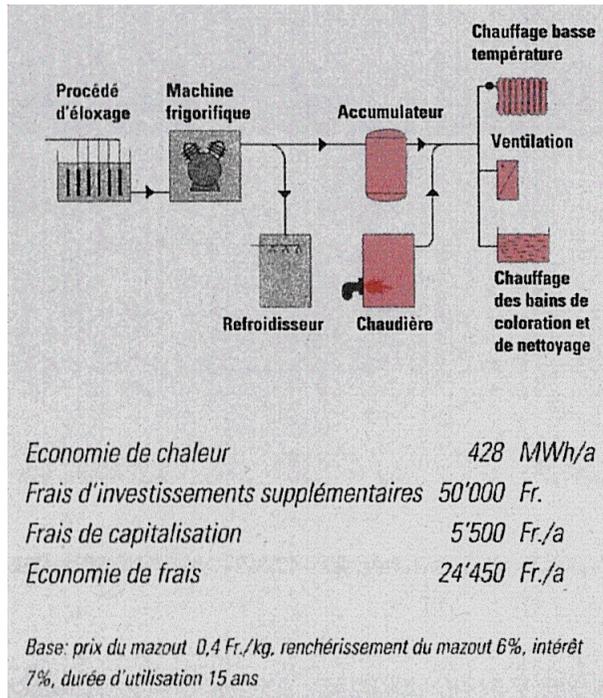
Centrale éolienne Juvent du Mont-Crosin
2610 Saint-Imier 032 941 15 55

Soleil

Centrale photovoltaïque du Mont Soleil
032 941 15 55 (après-midi)

Divers

Usine des Chenevriers
Incineration des déchets
1288 Aire-la-Ville (GE) 022 757 25 51



Visite d'une usine qui utilise les rejets thermiques

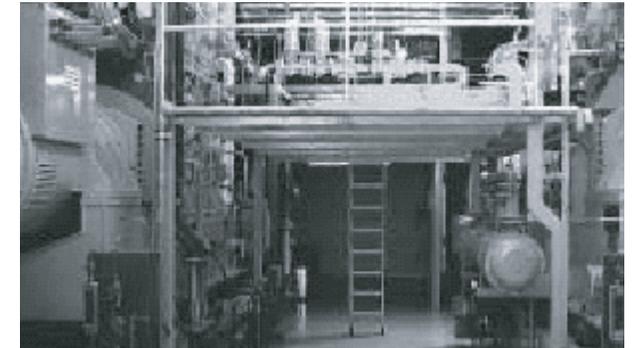
On utilise les rejets thermiques chez Anox SA, entreprise spécialisée dans le traitement des métaux, à Affoltern sur l'Albis. Le surplus de chaleur est soustrait du procédé d'éloxyde au moyen d'installations de refroidissement. Ces rejets sont ensuite récupérés dans un accumulateur, puis utilisés pour le chauffage de locaux, le préchauffage d'air ainsi que dans des procédés industriels utilisant de la chaleur à basse température. Lorsque l'accumulateur est plein, la chaleur inutilisée est déviée sur une tour de refroidissement.

Adresse:
 Anox AG
 Eloxalwerk
 Lindenmoosstr. 11
 8910 Affoltern sur l'Albis
 tél.: 01 761 73 28
 fax: 01 761 87 33

Visite d'une installation couplage chaleur- force

Les deux installations de couplage chaleur force compactes de la centrale thermique de Hardau desservent en chauffage environ 1000 appartements, les écoles voisines, une piscine couverte et un home pour personnes âgées. L'installation, qui appartient à la ville de Zürich, a été mise en service en janvier 1990.

Adresse:
 Complexe «Hardau»
 8047 Zürich
 tél: 01 493 16 28



Puissance thermique nécessaire	1'000 kW
Energie annuelle nécessaire (chaleur)	14'000 MWh/a
Puissance électrique du CCF	2x 450 kW
Temps d'enclenchement du CCF	6'000 h/a
Taux d'utilisation annuelle du CCF	93%
Investissements	2'600'000 Fr.
Prix revient du courant	10 ct./kWh
Tarif haut de reprise (hiver)	15 ct./kWh

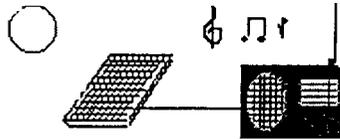
Base: Tarifs gaz et électricité de la ville Zurich, entretien 1,8 ct/kWh, prix de revient de la chaleur 3,2ct/kWh, intérêt 5,5%, durée d'utilisation 18 ans, sans tenir compte du renchérissement de l'énergie



Petite installation solaire

Il suffit de deux choses:

- Un petit panneau PV de 3 volts d'au moins 80 mA (9cm x 6 cm)
- N'importe quelle radio qui fonctionne avec deux piles de 1.5 volts



Le panneau transforme l'énergie du soleil en électricité et la radio marche !

Même l'adulte le plus blasé s'étonne à participer au jeu de cacher la lumière avec l'ombre de sa main pour réduire la radio au silence pour éprouver le plaisir de la musique qui revient aussitôt qu'il enlève sa main. Très pratique à la plage, dans le jardin ou dans la cuisine lorsque le soleil entre par la fenêtre, et ça fonctionne parfaitement bien jusqu'à ce qu'un gros nuage passe. Une des manières de résoudre ce problème serait d'utiliser un panneau plus grand, ou d'utiliser deux ou plusieurs de ces panneaux reliés en parallèles. Ceci vous permettrait de continuer à écouter la radio même si les nuages s'accumulent jusqu'au moment où le soleil disparaît à l'horizon.

L'autre solution consiste à utiliser deux piles AA qu'on mettrait entre le panneau et la radio. On peut créer ainsi un petit ensemble qui ne sera jamais à court d'énergie !

- Lorsque le soleil brille, la radio fonctionne directement au soleil
- Lorsque la radio n'est pas en marche, les piles se rechargent
- La nuit, on utilise l'énergie accumulée pendant les heures d'ensoleillement.

L'énergie accumulée dans les piles, même pendant les jours de pluie, sera suffisante pour la radio le soir. Avec deux jeux de piles, on n'aurait jamais besoin de se passer de musique – même sur une île déserte. Il suffit d'avoir le jeu dont on ne se sert pas relié au panneau pour qu'il soit prêt au bon moment.

4 Connaissances de base

4.1 Forme et caractéristique de l'énergie

Qu'est-ce que l'énergie ?

L'énergie correspond à la capacité d'exercer un certain travail : exercer une force F sur une distance d , accélérer une masse m du repos à la vitesse v , déplacer une charge électrique q sous une différence de potentiel V , soulever une masse m jusqu'à une hauteur h . Dans chaque cas, une quantité spécifique d'énergie est requise : $E = F \cdot s = \frac{1}{2}m \cdot v^2 = q \cdot V = m \cdot g \cdot h$. L'énergie est donc cette entité nécessaire pour que « quelque chose » se passe. Il n'est donc pas étonnant que ce concept d'énergie soit présent dans la plupart des sciences naturelles, techniques voir économiques et qu'elle joue un rôle si fondamental dans les activités humaines.

Dans un premier temps, on peut classer l'énergie sous les formes essentielles suivantes:

Energie thermique

La chaleur est une forme d'énergie qui se traduit par une augmentation ou une diminution de température ou par un changement d'état.

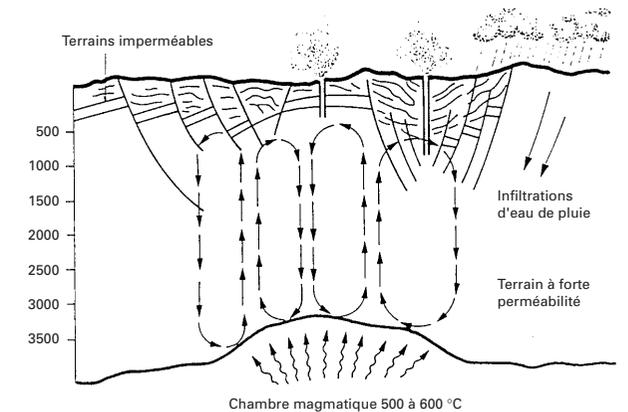
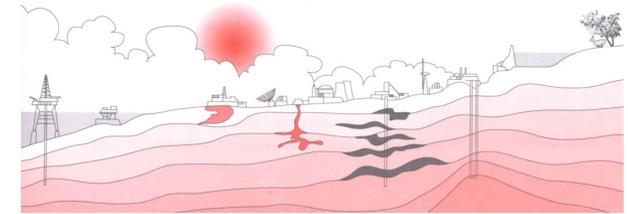


Fig. 1: principe du geiser



Energie mécanique ou travail

C'est l'énergie fournie par un corps en mouvement.

Elle peut se présenter elle-même sous deux formes :

- l'énergie cinétique est l'énergie due au mouvement, par exemple: un véhicule en marche, l'eau qui tombe par une conduite et qui actionne une turbine.
- l'énergie potentielle est une énergie mise en réserve pour pouvoir être utilisée au moment voulu; par exemple: l'eau retenue dans un barrage fournit une énergie cinétique lorsqu'on ouvre les vannes ou une automobile arrêtée sur une pente se met en mouvement lorsqu'on desserre ses freins.

Energie chimique

L'énergie chimique est liée à la structure de la matière, aux liaisons entre atomes ou entre molécules.

C'est, par exemple, l'énergie sous forme chimique capable de se transformer en énergie électrique ; par exemple: une pile alimente une lampe.

Energie nucléaire

L'énergie nucléaire est liée à la cohésion entre particules constituant le noyau de l'atome. Elle se manifeste lorsque des noyaux lourds se cassent (fission nucléaire) ou lorsque des noyaux légers s'assemblent (fusion nucléaire). La radioactivité est liée à ce type d'énergie.



Fig. 2: Barrage d'une centrale hydro-électrique



Fig. 3:
Batterie électrique



Fig. 4: centrale nucléaire



Energie électromagnétique

(voir document de base)

L'énergie électromagnétique est liée aux différence de charge électrique entre deux corps. Elle est particulièrement commode à transformer et à transporter, mais difficile à stocker.

Energie de rayonnement

C'est l'énergie sous forme de radiations capable de se transformer en énergie électrique ou thermique; par exemple: au moyen d'un générateur à panneaux photovoltaïques.

Les capteurs thermiques

La chaleur du soleil peut être captée pour élever la température de l'eau sanitaire, le l'eau de chauffage (maison, usine, locaux, commerciaux, fermes et locaux agricoles), de l'eau d'une piscine. La chaleur du soleil sert aussi au séchage du foin.

Avec un capteur de 4 m² on couvre les 60 % des besoins d'eau chaude sanitaire pour une famille de 4 personnes.



Fig. 5: Ligne à haute tension électrique

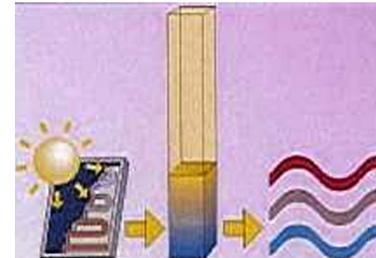


Fig. 6: utilisation de l'énergie de rayonnement pour chauffer l'eau



Fig. 7: intégration de collecteurs solaires dans le toit



Les capteurs photovoltaïques

Le rayonnement solaire peut être directement converti en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Sur des sites isolés, ces cellules évitent la construction de lignes coûteuses (chalets, maisons de villégiature). Sur des constructions importantes (en s'intégrant à l'architecture), elles rentabilisent des espaces improductifs en production et dépasse par moment les besoins, il est possible d'injecter le courant photovoltaïque dans le réseau. Cette production sera ristournée par les compagnies d'électricité en application de la législation suisse.

Avec une surface de 20 m² de capteurs photovoltaïques, on couvre 60 % des besoins en énergie électrique d'une famille.

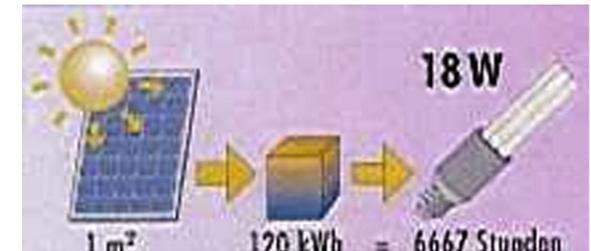


Fig. 8: utilisation de l'énergie de rayonnement pour la production d'électricité



Fig. 9: panneau de cellules photovoltaïques



4.2 Unités

L'énergie peut se présenter sous des formes diverses, que l'on a mesurées avec des unités différentes, mais qui n'en sont pas moins toutes de l'énergie et peuvent donc être mesurées avec une seule unité, la joule (J).

Exemple:

Pour élever une plaque de beurre de 100 g d'une hauteur de un mètre, il faut environ: $m \cdot g \cdot h = 0,1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m}$, soit 1 Joule.

La puissance est un débit d'énergie: elle a les unités d'une énergie par unité de temps. La puissance se mesure en joule par secondes; on appelle cette unité watt.

Le flux d'énergie est la quantité d'énergie passant par unité de temps au travers d'une surface unité perpendiculaire au flux d'énergie. Le flux d'énergie s'exprime en Joules/s m^2 ou Watt/ m^2 .

Ordre de grandeur des énergies en Joules

- 10^{32} J Énergie émise journalièrement par le soleil
- 10^{28} J
- 10^{24} J Énergie solaire reçue journalièrement par la terre
- 10^{20} J Énergie journalière moyenne convertie par photosynthèse (à l'échelle planétaire)
- 10^{16} J Consommation mondiale journalière d'énergie (par l'homme)

- 10^{12} J Énergie électrique produite d'une grande centrale nucléaire.
(Énergie de fission pour 1 kg d' U^{235})
- 10^8 J Consommation moyenne d'énergie par hab. et par jour en Suisse
(Énergie de combustion de 1 litre de pétrole = $3,6 \cdot 10^7$)
- 10^4 J
- 10^0 J Énergie absorbée par 1 gramme d'eau s'échauffant de 1°C
- 10^{-4} J
- 10^{-8} J
- 10^{-12} J Énergie fournie par la fission d'un noyau d' U^{235}
- 10^{-16} J
- 10^{-20} J Énergie de combustion d'un atome de carbone



4.3 Source d'énergie

Caractéristiques d'une source d'énergie

Concentration

C'est l'énergie par unité de volume ou de masse. La concentration de l'énergie radiante se mesure par le flux d'énergie.

Exemple: Joules/kg, Joules/m³, W/m²

Tous facteurs égaux par ailleurs, plus la concentration est élevée, meilleure est la source d'énergie : l'extraction, le transport, le stockage et la manipulation sont plus aisés et se présente de façon plus intéressante sur le plan économique.

Source	Energie/volume MJ/m ³	Energie/masse MJ/kg	Temp. caractér. K
Charbon	36'000	27,4	10 ⁴
Pétrole	38'500	43,2	10 ⁴
Gaz naturel	39,6	54	10 ⁴
Uranium 235	15,8 · 10 ¹¹	8,3 · 10 ⁷	10 ¹¹
Deutérium	4,3 · 10 ⁷	24,1 · 10 ⁷	10 ⁷
Géothermie (moyenne)			300
Géothermie (sites privilégiées)			500
Energie solaire			1'000–6'000
Energie hydraulique, chute 367 m	3,6	0,0036	



Qualité de l'énergie

En théorie, toute forme d'énergie est transformable en une autre. Ces transformations n'ont cependant pas toutes la même efficacité. Cela tient à la nature de l'énergie. On attribue aux formes d'énergie différentes qualités qui expriment leur capacité à être transformées sous d'autres formes. Les énergies électrique et mécanique ont, par exemple, une très grande qualité parce qu'elles peuvent être transformées de manière très efficace en d'autres formes d'énergie comme le rayonnement ou l'énergie thermique. L'énergie thermique à basse température, telle que la chaleur de l'environnement, a une qualité très basse. On ne peut pratiquement pas la transformer dans une autre forme d'énergie.

Dans chaque transformation d'énergie, une partie est dissipée en chaleur, par exemple par frottement. En principe, cette chaleur n'est pas désirée et représente donc une perte.

A la transformation d'une énergie de haute qualité en une autre de moindre qualité correspond une dégradation physique de l'énergie. C'est pourquoi toute forme d'énergie devrait être mise en œuvre de sorte que sa qualité soit utilisée le mieux possible.

Le chauffage électrique est un exemple d'une chaîne de transformation d'énergie avec mauvaise utilisation de la qualité et cela avant tout lorsque l'électricité provient de centrales thermiques:
A partir d'agents énergétiques chimiques, par

exemple de l'huile de chauffage, on produit de la chaleur à haute température qui, sous forme de vapeur d'eau, est transformée en énergie mécanique dans une turbine. Dans le générateur actionné par la turbine prend naissance de l'énergie électrique qui est finalement transformée, dans le radiateur, en chaleur de température inférieure. Cette chaîne de transformation a souvent un rendement de moins de 30 %.

Par contraste, **une combinaison formée d'un couplage chaleur-force et d'une pompe à chaleur** permet de fournir jusqu'à 150 % de chaleur à partir de 100 % d'énergie chimique contenue dans l'huile de chauffage ou dans le gaz naturel. Pour cela, de la chaleur de l'environnement, de faible qualité, est gagnée au moyen de l'énergie mécanique de la pompe à chaleur, et transformée en chaleur utile pour le chauffage.

Voir aussi chapitre 4.5, Perte d'énergie et rendement ainsi que les modules 3, pompes à chaleur, et 4, engins thermiques.



Source d'énergie renouvelable et non renouvelable (voir document de base)

Sources d'énergie renouvelable

Ce sont des sources qui ne tarissent pas, des sources qui produisent en continu. Ces sources se réalisent en permanence grâce aux moteurs que constituent la fusion thermonucléaire du soleil, la gravitation (marées) et la radioactivité interne de la Terre (géothermie). En utilisant de telles sources, on prélève de l'énergie sur les cycles naturels.

Sources d'énergie non renouvelable

On peut aussi parler de sources d'énergie stockée. Ces sources ne se renouvellent pratiquement pas en comparaison du rythme avec lequel elles sont consommées. C'est très typiquement le cas pour les combustibles fossiles où le renouvellement est très long. C'est également le cas des combustibles nucléaires qui eux ne se renouvellent pas du tout.

Sources d'énergie non renouvelable mais quasi-illimitées

Cette catégorie concerne le deutérium et le lithium, sources d'énergies pour la fusion nucléaire. L'abondance du deutérium (hydrogène lourd) dans l'eau est de 1 atome pour 6500 atomes d'hydrogène léger. Avec l'eau des océans, on dispose donc d'une source d'énergie quasi inépuisable. Mais rien ne permet d'affirmer actuellement qu'on parviendra à maîtriser tous les problèmes que pose la fusion nucléaire contrôlée.

Quelques réserves et ressources mondiales d'énergie			
	Réserves prouvées en tep	Extraction	Réserves prouvées en années
Charbon	530'000	2'200 [tep/an]	≈ 240 ans
Gaz naturel	123'000	1'715 [mia m ³ /an]	≈ 70 ans
Produits pétroliers	134'604	3'149 [mio t/an]	≈ 40 ans



4.4 Transformation d'énergie

De la source d'énergie au consommateur, l'énergie suit différents processus de transformation. Les définitions suivantes sont à prendre en considération.

Energie primaire:

source d'énergie qui n'a pas subi de transformation.

Energie utile:

énergie à disposition du consommateur après sa dernière transformation. L'énergie utile est obtenue à partir de l'énergie primaire à la suite d'une ou de plusieurs transformations. Un aperçu des différentes transformations possibles a déjà été donné dans la première partie de ce cours.

Energie secondaire:

énergie obtenue par transformation d'énergie primaire (ou éventuellement d'énergie secondaire) et qui sera transformée à son tour en énergie utile.

Energie finale:

c'est l'énergie habituellement payée par le consommateur (individu, industrie, administration), comme le gaz, l'essence, chauffage à distance, ...

Par l'application du principe de conservation de l'énergie, nous avons:

$$\text{Energie utile} = \text{Energie primaire} - \text{Pertes}$$

Par pertes, on considère les pertes de transport et les pertes de transformation aussi que l'autoconsommation du secteur énergétique. Selon les statistiques des pays industrialisés, la somme des pertes représente plus de la moitié de l'énergie primaire consommée, d'où résulte un **rendement global** de transformation d'énergie primaire en énergie utile **inférieur à 50 %**.



Les différentes phases de la transformation d'énergie

Energie exploitée: Pétrole, gaz naturel, charbon, uranium, eau courante, biomasse, rayonnement solaire, vent etc.	Primärenergie 	Consommateurs, pertes
	Stockage, transport, transformation	Pertes de transformation et de transport, consommation propre
Energie produite: Huile de chauffage, essence, diesel, gaz liquide, électricité, chaleur à distance etc.	Energie secondaire 	Matières premières pour l'industrie chimique
	Stockage, transport, distribution	Pertes de transformation et de transport, consommation propre
Energie achetée par l'utilisateur final	Energie finale	Ménages, entreprises, administration
	Stockage, transformation, distribution	Pertes de transformation et de transport, consommation propre
Energie mise à disposition de l'utilisateur pour sa transformation en énergie utile, par exemple électricité pour un moteur électrique	Energie mise en oeuvre 	
	Transformation, exploitation de l'énergie	Pertes de transformation
Energie utile pour le consommateur (chaleur, force, lumière etc)	Energie utile (sous différentes formes) 	
	Utilisation de l'énergie utile sous toutes ses formes 	Selon les conditions, plus ou moins d'énergie est nécessaire pour remplir les prestations énergétiques
Les prestations énergétiques effectives sont par exemple une chambre chauffée, une place de travail bien éclairée, un moyen de transport de A à B, du linge propre etc.	Les prestations énergétiques (différentes sortes)  Besoin satisfait	

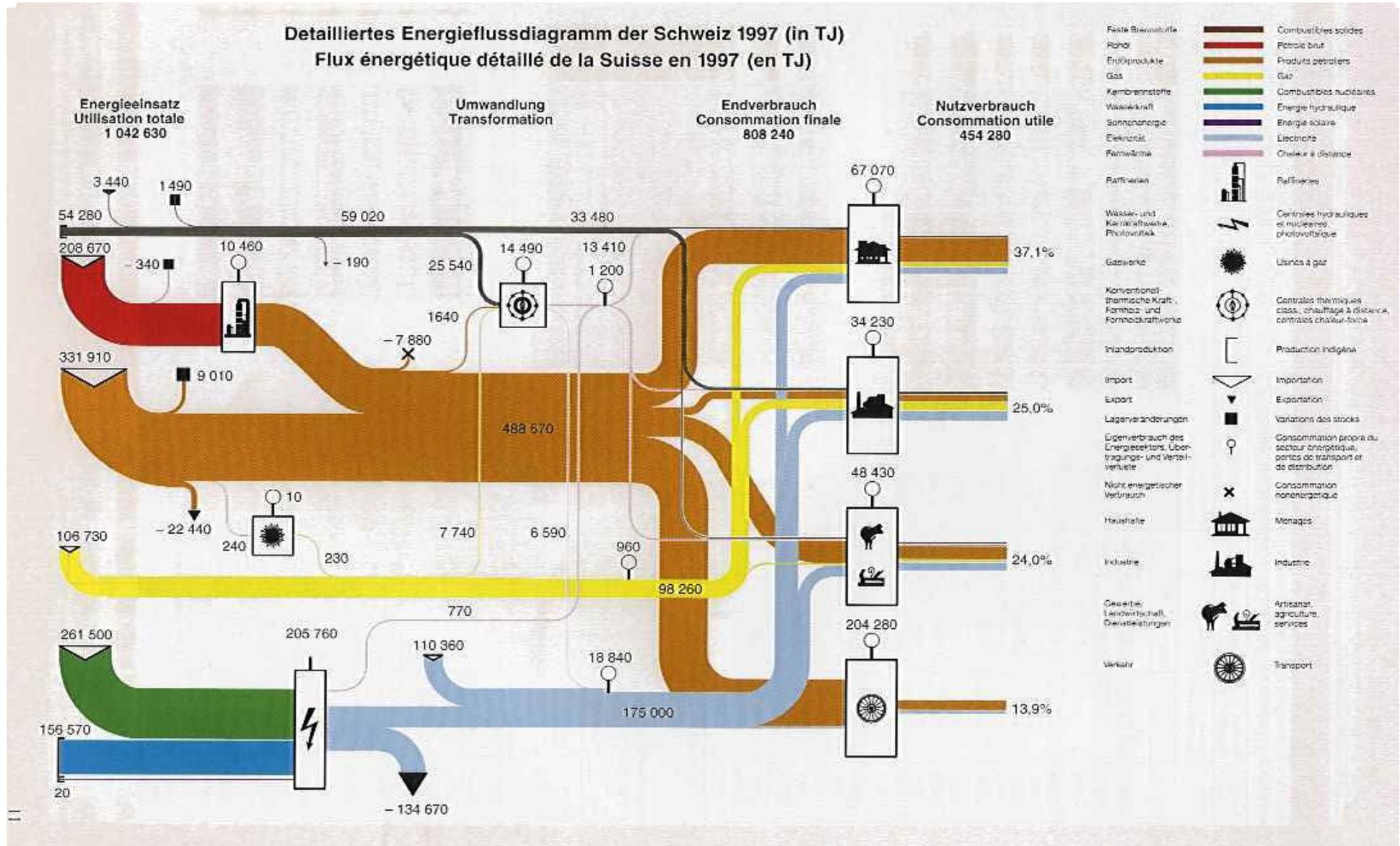


Fig. 10: Diagramme de flux énergétique en Suisse



4.5 Perte d'énergie et rendement

Lors de la transformation d'une forme d'énergie en une autre, il y a toujours des pertes.

Perte d'énergie

$$EP = E_1 - E_2$$

EP: énergie perdue

E_1 : énergie mise en jeu

E_2 : énergie utile

Pour évaluer correctement les pertes, il faut désigner par une même unité les quantités d'énergies mises en jeu et utiles.

Exemple chauffe-eau

Un chauffe-eau, dont la puissance est de 1,4 kW élève 100l. d'eau de 20°C à 78°C en 6 heures. Calculez la perte d'énergie.

Quantité de chaleur fournie:

$$Q_1 = P \cdot t = 1400 \text{ W} \cdot (6 \cdot 3600 \text{ s}) = 30,2 \text{ MJ}$$

Quantité de chaleur utile:

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta T = 100 \text{ l} \cdot 4187 \cdot 58 \text{ K} (78^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 24,3 \text{ MJ}$$

Pertes d'énergie:

$$Q_1 - Q_2 = 30,2 \text{ MJ} - 24,3 \text{ MJ} = 5,9 \text{ MJ}$$

Rendement

$$\eta_G = P_1 / P_2 [\%]$$

η : rendement

P_1 : puissance utile délivrée

P_2 : puissance absorbée

$$\eta_G = \eta_A \cdot \eta_B \cdot \eta_C [\%]$$

η_G : rendement du système global

η_A : rendement du système partiel A

η_B : rendement du système partiel B

η_C : rendement du système partiel C

La fraction utile est le rendement moyen sur une longue durée (par exemple une année).

Exemple transformateur

- énergie absorbée annuellement:	100 MWh
- énergie délivrée annuellement	90 MWh
- rendement moyen annuel	90/100 = 90 %
en comparaison: rendement à charge nominale	98 %



Autre exemple: comparaison chaudière et CCFC
(voir aussi chapitre 4.3)

Installations	Rendement global annuel	
	non pondéré	pondéré
Chaudière conventionnelle à gaz sans condensation des fumées	0,85 ... 0,92	0,9
Chaudière conventionnelle à gaz avec condensation des fumées	0,92 ... 1,02	1,0
CCFC avec turbine à gaz – thermique 0,50...0,60 – électrique 0,20...0,30	0,75 ... 0,85	1,3
CCFC avec moteur à gaz – thermique 0,54...0,58 – électrique 0,30...0,34	0,85 ... 0,92	1,5
CCFC avec moteur à gaz et PAC pour récupération des pertes par rayonnement et condensation des fumées – thermique 0,68...0,73 – électrique 0,25...0,30	0,95 ... 1,00	1,5
Installation chaleur-force combinée – thermique 0,35...0,45 – électrique 0,40...0,50	0,80 ... 0,85	1,75

Pour une comparaison concrète, il ne faut prendre en considération qu'un seul chiffre caractéristique. Le tableau ci-joint indique un rendement global annuel pondéré. Cette valeur correspondrait à une installation où le courant produit servirait uniquement à faire fonctionner une pompe à chaleur dont le coefficient de performance annuel serait de 3,0. Ce chiffre démontre clairement qu'une installation de CCF équipée d'un moteur à gaz, p. ex., utilise l'énergie à disposition une fois et demie mieux que la chaudière la plus moderne.



4.6 Transport et stockage

Distribution d'électricité

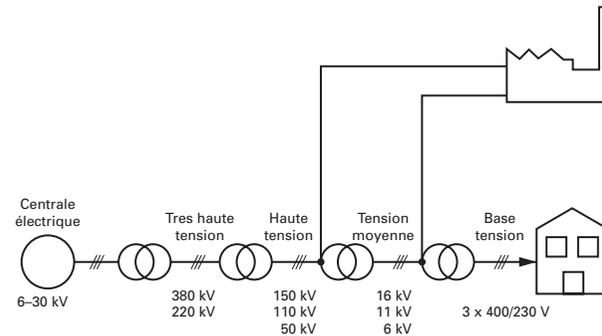


Fig. 11: Réseau de distribution électrique

Le transport de l'électricité à différents niveaux de tension et de capacités de transport peut être comparé à un réseau routier. Les lignes à très haute tension correspondent aux autoroutes pour le trafic à longue distance; les lignes à haute, moyenne ou basse tension, qui s'y raccordent, correspondent aux routes cantonales et communales qui servent au trafic régional et à la distribution fine.

La Suisse est reliée au réseau électrique européen interconnecté. Château d'eau au milieu de l'Europe, elle a un rôle important de plaque tournante à jouer.

Gaz naturel

Normalement le gaz naturel est transporté sous forme gazeuse. Si le transport par gazoducs est difficile ou trop coûteux, on liquéfie le gaz en le refroidissant (-161°C). Les plus gros bateaux-citernes contiennent environ $125'000 \text{ m}^3$ de LNG. En 1991, 24 % du commerce mondial de gaz naturel s'est fait sous forme de LNG.

Le gaz naturel est stocké soit sous forme liquide dans des réservoirs bien isolés (compliqué), soit dans des formations géologiques appropriées (couches de sel, gisements de gaz naturel ou de pétrole épuisés, mines abandonnées, etc.)

Sur le marché suisse, le gaz naturel est transporté principalement par gazoduc. La pression du gaz est très variable d'un réseau de transports à l'autre.



Fig. 12: citerne pour gaz naturel



Mazout

Pour le mazout, il faut différencier entre le pétrole brut et les dérivés du pétrole. Les raffineries et les installations de stockage conditionnent les voies de transport.

Les chiffres suivants sont valables pour l'importation en Suisse:

- Importation de pétrole brut:
 - 100 % par oléoducs
- Importation de produits pétroliers:
 - 47 % par le Rhin
 - 26 % par le rail
 - 15 % par oléoduc et
 - 12 % par la route

en Suisse, les transports sont partagés entre le rail et la route. Les wagons citerne pour le mazout sont noirs, ceux pour les LPG (propane/butane): sont blancs avec ligne orange

le mazout lourd doit être préchauffé pour le pompage et la combustion:

- Pour le pompage: $> 80^{\circ}\text{C}$
- Pour la combustion: $< 130^{\circ}\text{C}$

Le mazout extra léger subit un processus d'altération. Après quelques années, la qualité nécessaire ne peut plus être garantie. Dans des citernes à mazout à l'air libre, il faut veiller au fait que le mazout peut se séparer de la paraffine, lorsque la température est inférieure à 5°C .

Il faut tenir compte des prescriptions techniques sur les installations d'entreposage et de transvasement des liquides (Prescriptions techniques sur les réservoirs, PEL, 21 juin 1990), ainsi que des prescriptions des assurances incendie.

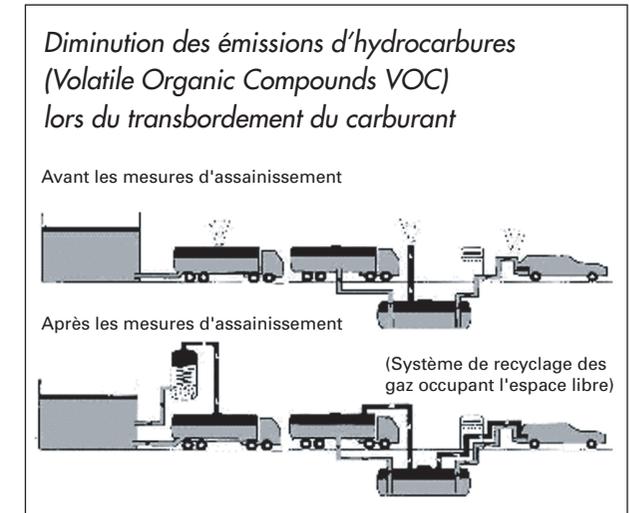


Fig.13: Transbordement de carburants

4.7 Energie grise

L'énergie grise est une énergie cachée que nous consommons quotidiennement par l'intermédiaire des produits que nous achetons au magasin. Il s'agit de l'énergie utilisée pour la fabrication des produits ou de l'énergie nécessaire aux services liés à la production. L'énergie nécessaire à l'élimination des produits arrivés en fin de vie (déchets) est aussi et encore de l'énergie grise.

Pour comparer différents produits, on calcule l'énergie grise par franc du pris d'achat. Par exemple, l'énergie grise nécessaire pour une voiture de 20'000 francs est de 44000 kWh, c'est à dire la consommation en électricité d'un ménage moyen pendant 10 ans (1 kWh se lit «kilowatt-heures» et représente une énergie de 3'600'000 joules).

Etant donné qu'un produit peut comprendre de nombreux matériaux et avoir nécessité diverses prestations de services, il est difficile de calculer l'énergie grise. Suite à des études, les scientifiques s'accordent à estimer l'énergie grise à environ 1,2 kWh/fr pour tous les biens de consommation d'un ménage. Cela ne concerne par uniquement l'électricité, mais l'énergie dans son ensemble.

Le calcul de l'énergie grise est particulièrement intéressant lorsqu'on envisage de remplacer un vieil appareil par un neuf plus économe en énergie. Par exemple, pour un réfrigérateur de 800.- fr., on peut établir le bilan énergétique suivant:

- Energie grise (Fr. 800.- x 1,2 kWh/Fr.)
→ 1000 kWh
- Consommation de l'ancien appareil
→ 1,8 kWh/Tag
- Consommation du nouvel appareil
→ 1,2 kWh/Tag
- Economie réalisée → 0,6 kWh/Tag
- Temps pour amortir l'énergie grise dépensée pour l'achat du nouveau réfrigérateur ($1000/0,6 = 1666$ Tage)
→ 4,5 Jahre

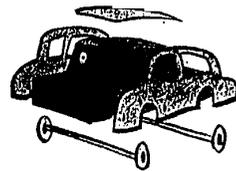
Alerte à l'énergie grise

" Grise ", parce qu'elle n'attire pas l'attention. Mais il en a fallu partout !

Où ça ?



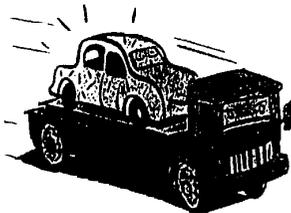
■ Dans les matières premières



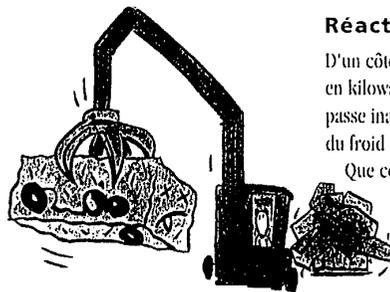
■ Dans la fabrication



■ Dans l'emballage et le stockage
(matériel, entrepôts, conservation)



■ Dans le transport
(véhicules, carburant, réfrigération)



■ Dans l'élimination des déchets
(collecte, destruction, lutte contre la pollution).

Réaction en chaîne

D'un côté, vous avez la consommation connue, en litres, en kilowatt-heure, en mètres cubes. De l'autre, celle qui passe inaperçue. Exemple classique, le coût de la chaîne du froid dans un surgelé.

Que ce soit une moto, un ordinateur, un démaquillant ou une feuille de papier, tout a englouti sa dose d'énergie grise. Il en faut encore pour leur élimination, voire leur recyclage.

Face à cette prise de conscience, les fabricants de véhicules comme les autres réagissent intelligemment en mettant sur le marché des produits de plus en plus durables, fiables et recyclables.

Fig. 14: L'énergie grise



En règle générale, on peut dire qu'une mesure d'économie d'énergie rentable financièrement l'est aussi du point de vue énergétique.

Agriculture	1,7 kWh/fr
Fer et acier	10,8 kWh/fr
Aluminium	15,0 kWh/fr
Ciment	5,6 kWh/fr
Machines	1,6 kWh/fr
Véhicules	2,2 kWh/fr
Alimentation	1,7 kWh/fr
Textiles	1,9 kWh/fr
Papier	5,6 kWh/fr
Imprimerie	1,9 kWh/fr
Caoutchouc	2,5 kWh/fr
Génie civil	1,9 kWh/fr
Commerce	1,1 kWh/fr
Prestations de services	0,6 kWh/fr

Fig. 15: L'énergie grise dans les produits et prestations des divers secteurs de l'économie (par Franc Suisse du prix de vente)



5 Exercices et solutions proposées

Exercice 1:

Déterminer le travail que fournit un apprenti qui soulève à une hauteur de 0,5 m sa caisse à outils d'une masse de 11,5 kg.

Solution:

Force de pesanteur

$$G = m \cdot g = 11,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ ms}^{-2} = 113 \text{ N}$$

Travail

$$E = G \cdot s = 113 \text{ N} \times 0,5 \text{ m} = 56,5 \text{ J}$$

Exercice 2:

Une machine soulève 110 kg en 3 minutes et 20 secondes sur une hauteur de 15 m.
Calculer la puissance de la machine.

Solution:

Force de pesanteur

$$G = m \cdot g = 110 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ ms}^{-2} = 1'079 \text{ N}$$

Travail

$$W = G \cdot s = 1079 \text{ N} \cdot 15 \text{ m} = 16'185 \text{ J}$$

Puissance

$$P = W / t = 16'185 \text{ J} / 200 \text{ s} = 81 \text{ W}$$

Exercice 3:

On a relevé sur un compteur électrique une consommation de 19 kWh pour une durée de 5 h 15 min.
Quelle est la puissance de récepteur ?

Solution:

Temps

$$t = 5 \text{ h } 15 = 5,25 \text{ h}$$

Puissance

$$P = W / t = 19 \text{ kWh} / 5,25 \text{ h} = 3,62 \text{ kW}$$

Exercice 4:

Calculer le rendement global d'un alternateur de $\eta = 0,92$ raccordé à un transformateur de $\eta = 0,99$ raccordé à un moteur de $\eta = 0,88$.

Solution:

Rendement global

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,92 \cdot 0,99 \cdot 0,88 = 0,8 = 80\%$$

Exercice 5:

On désire chauffer 2 litres d'eau de 20° C à 90° C.
Quelle quantité de chaleur utile cette eau a-t-elle emmagasinée ?

Solution:

Quantité de chaleur utile

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$= 2 \text{ kg} \cdot 4'187 \text{ J/kg} \cdot (90 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 586 \text{ kJ}$$



6 Bibliographie

- ASE/USC: Electricité, Faits et chiffres, Zürich, 1993.
- Avanzi P., Kespy A., Perret-Gentil J., Pfister D., Physique, sciences expérimentales, GREME-LEP, 1995.
- DFTCE, Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, Programme Energie 2000, 7e rapport annuel 1997, EDMZ 805.063.tf, 1997.
- Guide de la technique 4 : l'énergie, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1993.
- L'économie mondiale de l'énergie, Jean-Marie Martin, éd. La découverte, 1990.
- LITRA: Chiffres de la circulation 1995, Service d'information pour le trafic public, Berne, 1995.
- OFEN, Office fédéral de l'énergie : L'énergie grise, Berne, 1993.
- OFS – OFEFP, L'environnement en Suisse, Berne, 1997.
- Société suisse de physique, Energie et environnement, Zurich, août 1990.
- Tout savoir sur la pollution atmosphérique, Département de l'environnement et du territoire, service de la protection de l'environnement, Sion.
- L'énergie - facteur-clé de notre temps (document de base), LEP, Le Mont-sur Lausanne, 1998. Tél. 021 651 25 70



7 Sources

- Electrotechnique, fascicule 1 – Greme – FET
- L'énergie facteur-clé de notre temp – LEP
- Physique, science expérimentale, énergie – chaleur – électricité – Greme, LEP
- Cours d'énergie, Ecole d'ingénieur de Sion, Marcel Maurer
- Cours de physique, Ecole d'ingénieur de Sion, Michel Bonvin
- Ravel – CD-ROM Impuls Compact V3
- Statistique global Suisse de l'énergie – Office fédéral de l'énergie (OFEN), édition chaque année
- www.swissolar.ch
- www.carnot.org



8 Modèles

8.1 Formules et unités pour les calculs en énergie

1) Energie et puissance mécanique ou travail

$$E = F \cdot s$$

$$E = G \cdot h \text{ (h = hauteur, distance verticale)}$$

$$P = E / t$$

$$E = \text{travail en joules [J]}$$

$$F = \text{force en newtons [N]}$$

$$s = \text{déplacement en mètres [m]}$$

$$G = \text{force de pesanteur en newtons [N]}$$

$$g = \text{Erdbeschleunigung (= 9,81 m/s}^2\text{)}$$

$$P = \text{puissance en watts [W]}$$

$$t = \text{temps en secondes [s]}$$

2) Energie et puissance électrique

$$E = U \cdot I \cdot t$$

$$P = E / t$$

$$P = U \cdot I$$

$$P = U^2 / R$$

$$P = R \cdot I^2$$

$$E = \text{énergies en joules [J]}$$

$$U = \text{tension en volts [V]}$$

$$I = \text{Intensité du courant en Ampères [A]}$$

$$t = \text{temps en secondes [s]}$$

$$P = \text{puissance en watts [W]}$$

$$R = \text{résistance en ohms [Ω]}$$

3) Rendement

$$\eta = P_2 / P_1$$

$$\eta = E_2 / E_1$$

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$$

$$\eta = \text{rendement [-]}$$

$$P_2 = \text{puissance débitée ou utile en watts [W]}$$

$$P_1 = \text{puissance absorbée en watts [W]}$$

$$E_1 = \text{énergie absorbée en joules [J]}$$

$$E_2 = \text{énergie débitée en joules [J]}$$

4) Quantité de chaleur

$$Q_1 = R \cdot I^2 \cdot t$$

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q_1 = \text{quantité de chaleur fournie en joules [J]}$$

$$R = \text{résistance en ohms}$$

$$I = \text{intensité du courant en ampères [A]}$$

$$t = \text{temps en seconde [s]}$$

$$Q_2 = \text{quantité de chaleur utile en joules [J]}$$

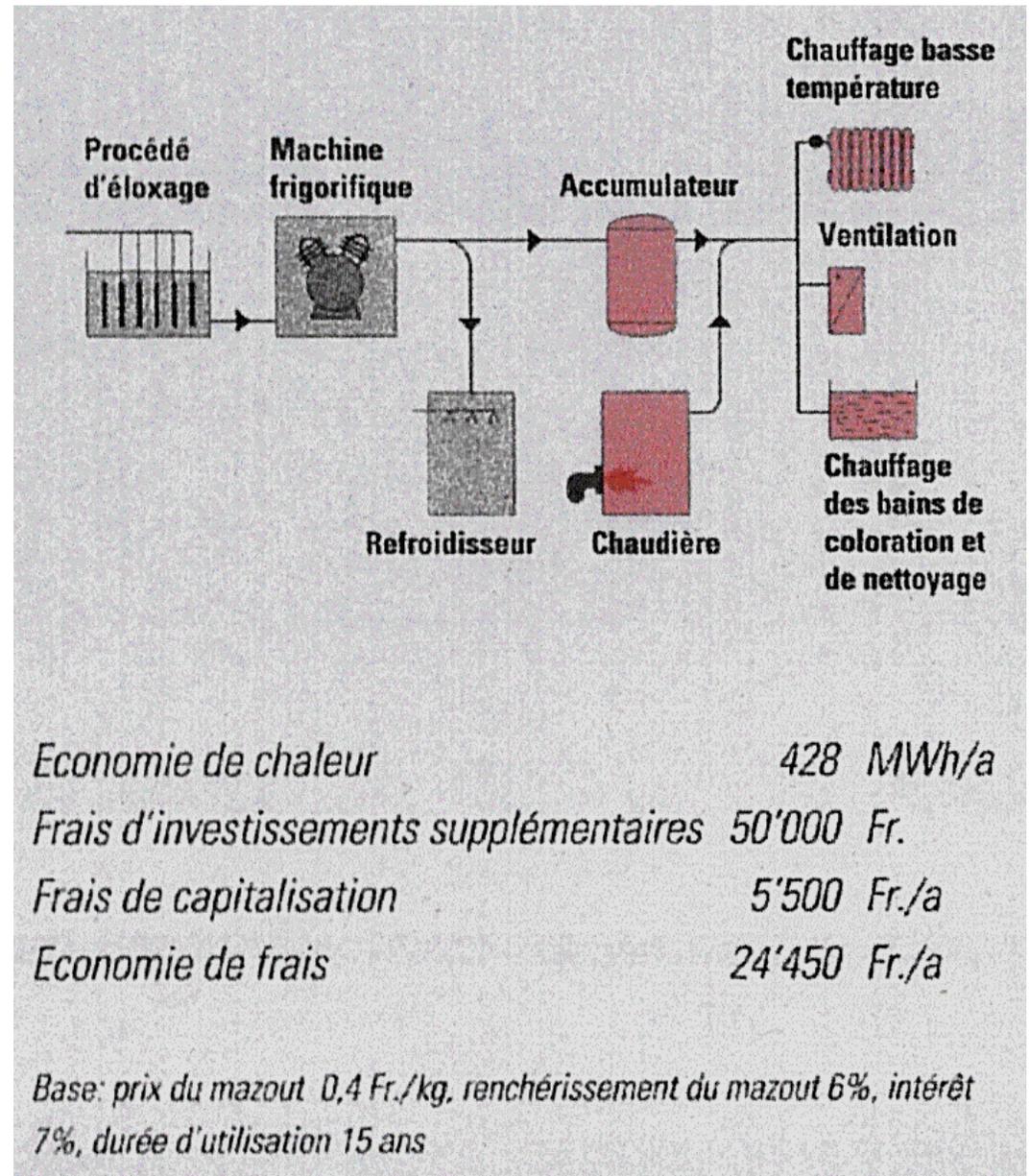
$$m = \text{masse en kilogrammes [kg]}$$

$$c = \text{chaleur massique en joules par kilogrammes et degré Kelvin [K]}$$

$$\Delta T = \text{différence de température en degré Kelvin [K]}$$



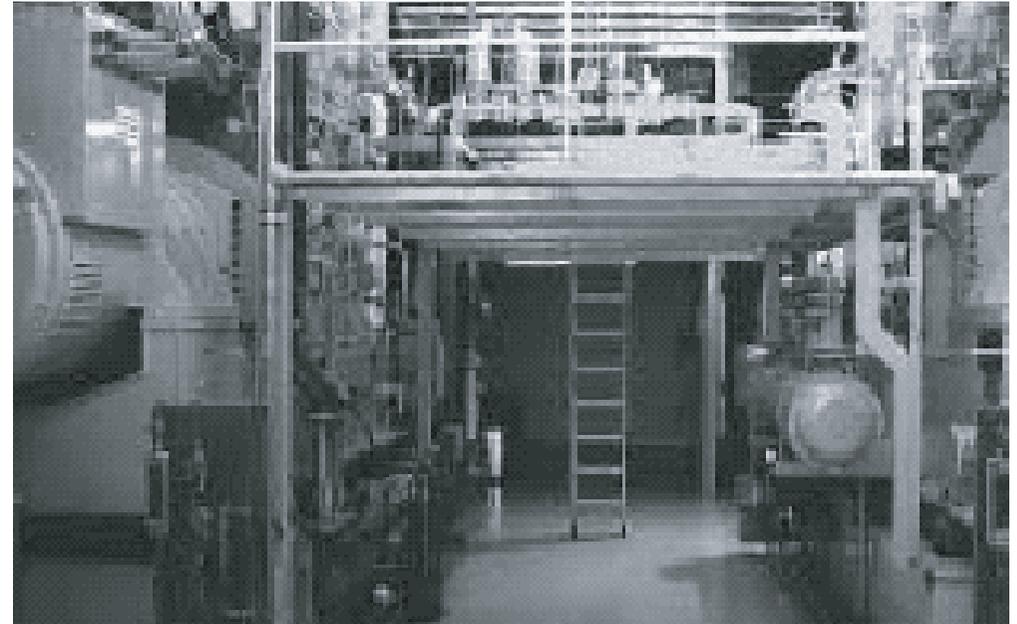
8.2 Illustrations du chapitre 4

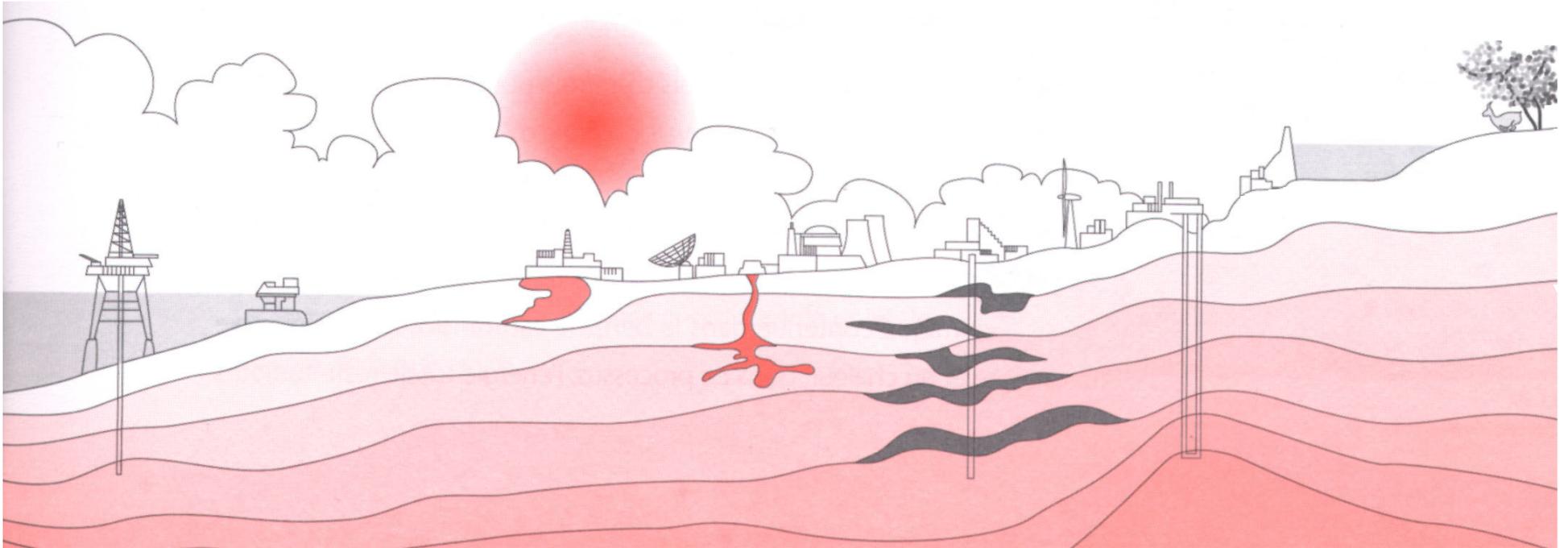


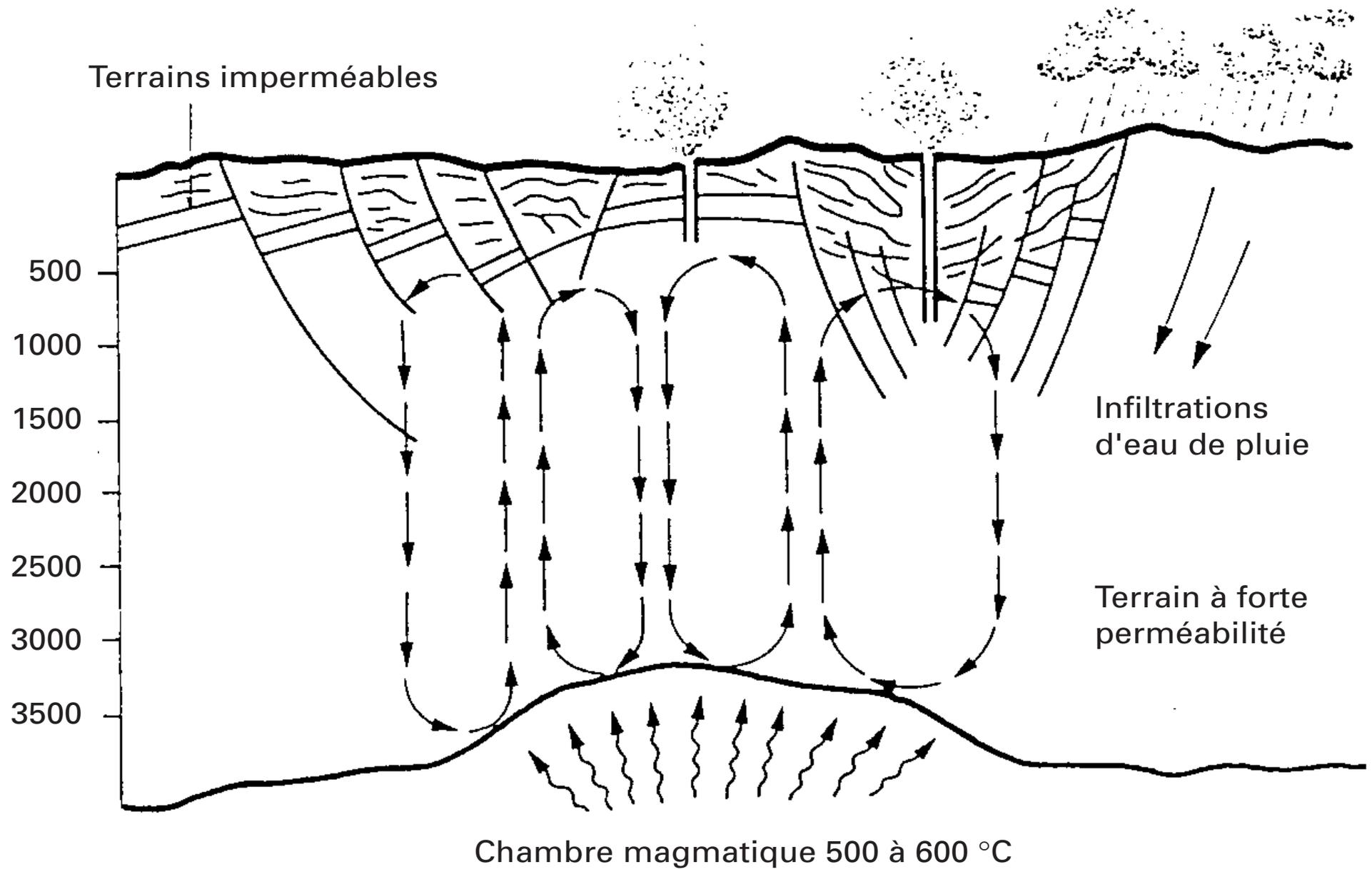


<i>Puissance thermique nécessaire</i>	<i>7'000 kW</i>
<i>Energie annuelle nécessaire (chaleur)</i>	<i>14'000 MWh/a</i>
<i>Puissance électrique du CCFC :</i>	<i>2x 450 kW</i>
<i>Temps d'enclenchement du CCFC</i>	<i>6'000 h/a</i>
<i>Taux d'utilisation annuelle du CCFC</i>	<i>93%</i>
<i>Investissements</i>	<i>2'600'000 Fr.</i>
<i>Prix revient du courant</i>	<i>10 ct./kWh</i>
<i>Tarif haut de reprise (hiver)</i>	<i>15 ct./kWh</i>

Base: Tarifs gaz et électricité de la ville Zurich, entretien 1,8 ct/kWh, prix de revient de la chaleur 3,2ct/kWh, intérêt 5,5%, durée d'utilisation 18 ans, sans tenir compte du renchérissement de l'énergie





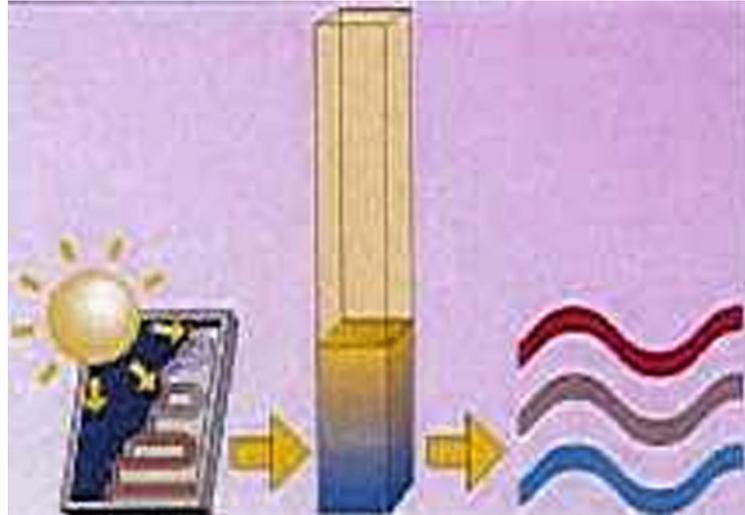














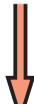


Source	Energie/volume MJ/m ³	Energie/masse MJ/kg	Temp. caractér. K
Charbon	36'000	27,4	10 ⁴
Pétrole	38'500	43,2	10 ⁴
Gaz naturel	39,6	54	10 ⁴
Uranium 235	15,8 · 10 ¹¹	8,3 · 10 ⁷	10 ¹¹
Deutérium	4,3 · 10 ⁷	24,1 · 10 ⁷	10 ⁷
Géothermie (moyenne)			300
Géothermie (sites privilégiées)			500
Energie solaire			1'000–6'000
Energie hydraulique, chute 367 m	3,6	0,0036	

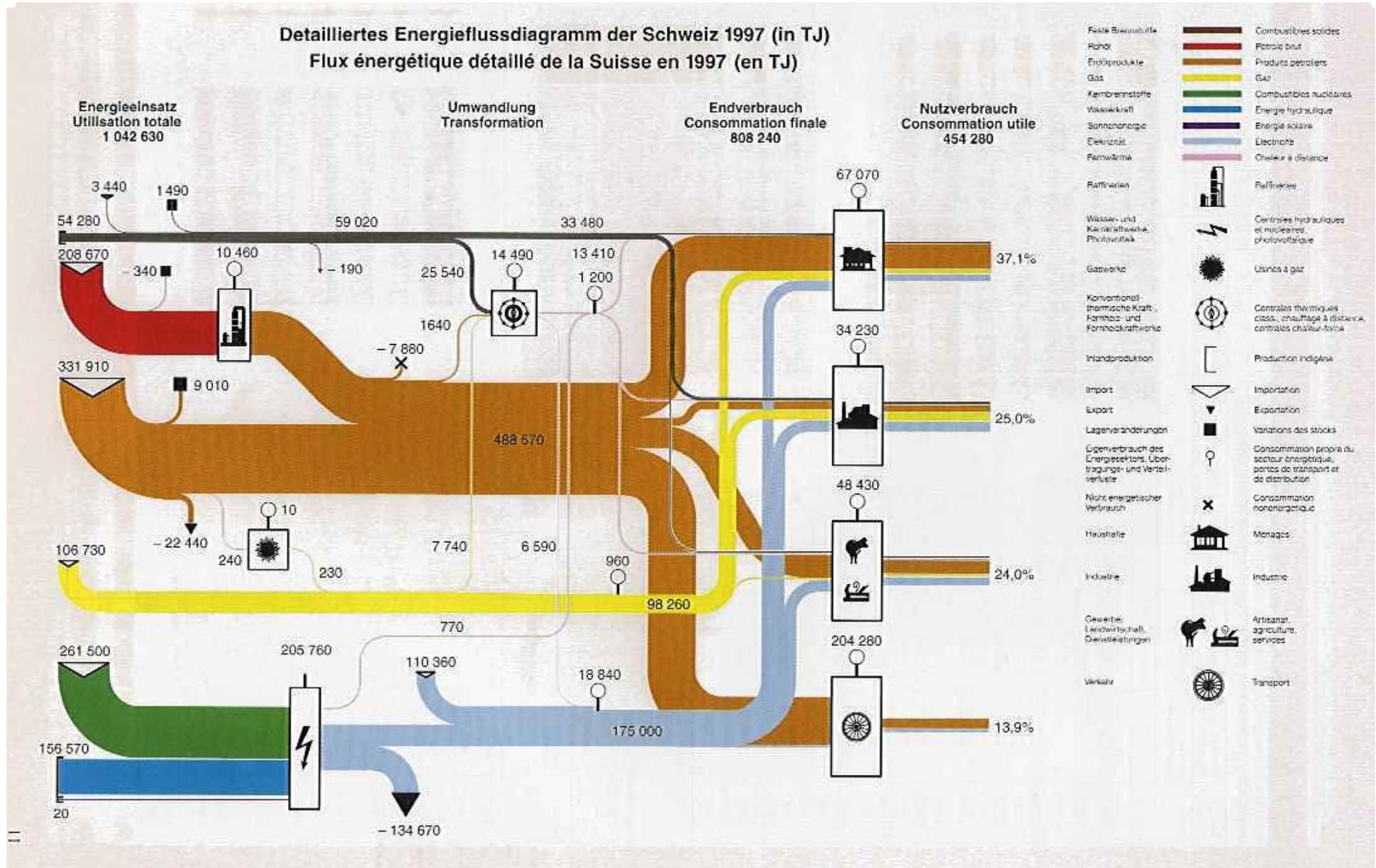


Quelques réserves et ressources mondiales d'énergie			
	Réserves prouvées en tep	Extraction	Réserves prouvées en années
Charbon	530'000	2'200 [tep/an]	≈ 240 ans
Gaz naturel	123'000	1'715 [mia m ³ /an]	≈ 70 ans
Produits pétroliers	134'604	3'149 [mio t/an]	≈ 40 ans



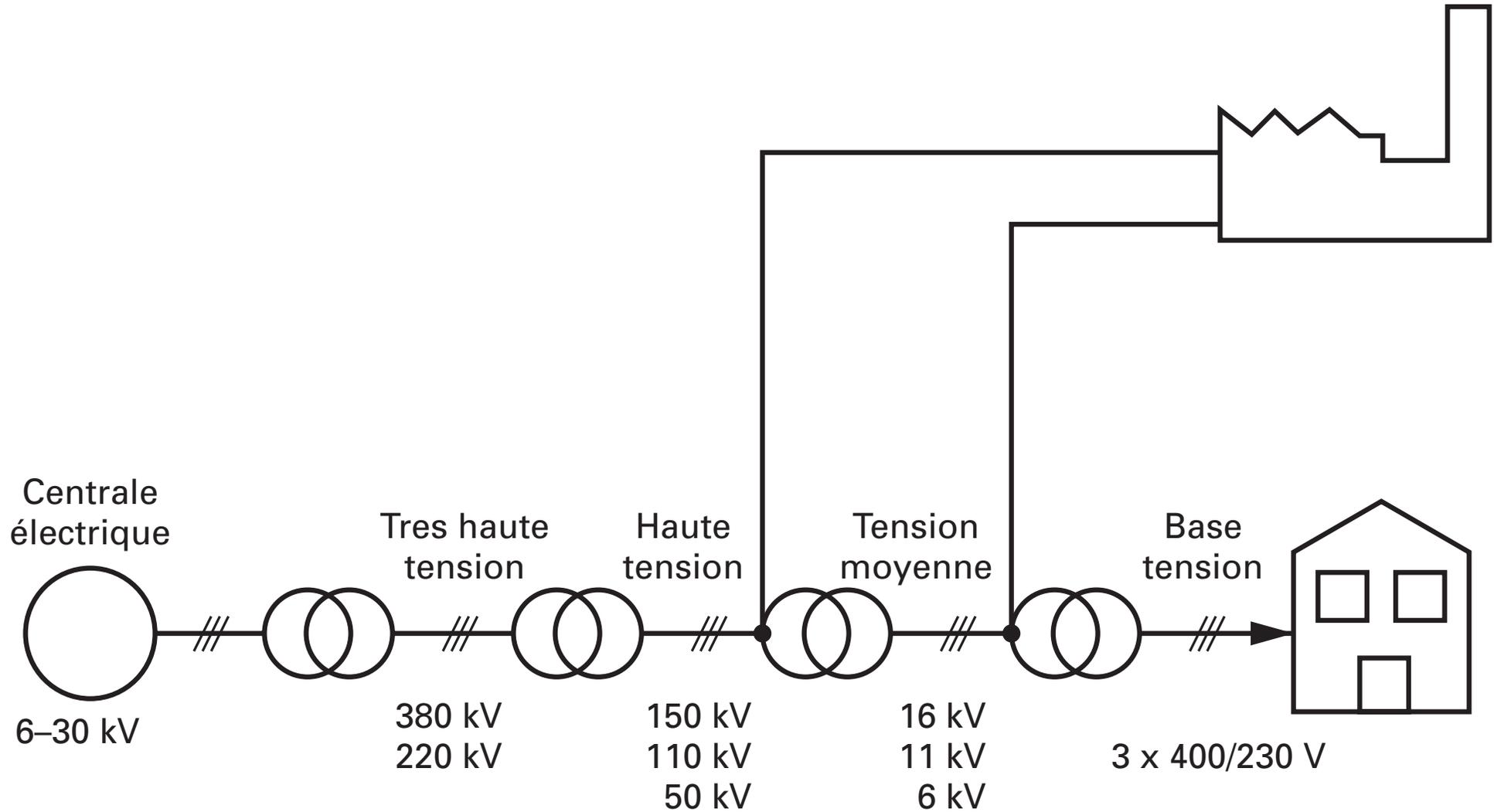
Energie exploitée: Pétrole, gaz naturel, charbon, uranium, eau courante, biomasse, rayonnement solaire, vent etc.	Primärenergie 	Consommateurs, pertes
	Stockage, transport, transformation	Pertes de transformation et de transport, consommation propre
Energie produite: Huile de chauffage, essence, diesel, gaz liquide, électricité, chaleur à distance etc.	Energie secondaire 	Matières premières pour l'industrie chimique
	Stockage, transport, distribution	Pertes de transformation et de transport, consommation propre
Energie achetée par l'utilisateur final	Energie finale	Ménages, entreprises, administration
	Stockage, transformation, distribution	Pertes de transformation et de transport, consommation propre
Energie mise à disposition de l'utilisateur pour sa transformation en énergie utile, par exemple électricité pour un moteur électrique	Energie mise en oeuvre 	
	Transformation, exploitation de l'énergie	Pertes de transformation
Energie utile pour le consommateur (chaleur, force, lumière etc)	Energie utile (sous différentes formes) 	
	Utilisation de l'énergie utile sous toutes ses formes 	Selon les conditions, plus ou moins d'énergie est nécessaire pour remplir les prestations énergétiques
Les prestations énergétiques effectives sont par exemple une chambre chauffée, une place de travail bien éclairée, un moyen de transport de A à B, du linge propre etc.	Les prestations énergétiques (différentes sortes)  Besoin satisfait	

Detailliertes Energieflussdiagramm der Schweiz 1997 (in TJ)
Flux énergétique détaillé de la Suisse en 1997 (en TJ)





Installations	Rendement global annuel	
	non pondéré	pondéré
Chaudière conventionnelle à gaz sans condensation des fumées	0,85 ... 0,92	0,9
Chaudière conventionnelle à gaz avec condensation des fumées	0,92 ... 1,02	1,0
CCFC avec turbine à gaz – thermique 0,50...0,60 – électrique 0,20...0,30	0,75 ... 0,85	1,3
CCFC avec moteur à gaz – thermique 0,54...0,58 – électrique 0,30...0,34	0,85 ... 0,92	1,5
CCFC avec moteur à gaz et PAC pour récupération des pertes par rayonnement et condensation des fumées – thermique 0,68...0,73 – électrique 0,25...0,30	0,95 ... 1,00	1,5
Installation chaleur-force combinée – thermique 0,35...0,45 – électrique 0,40...0,50	0,80 ... 0,85	1,75

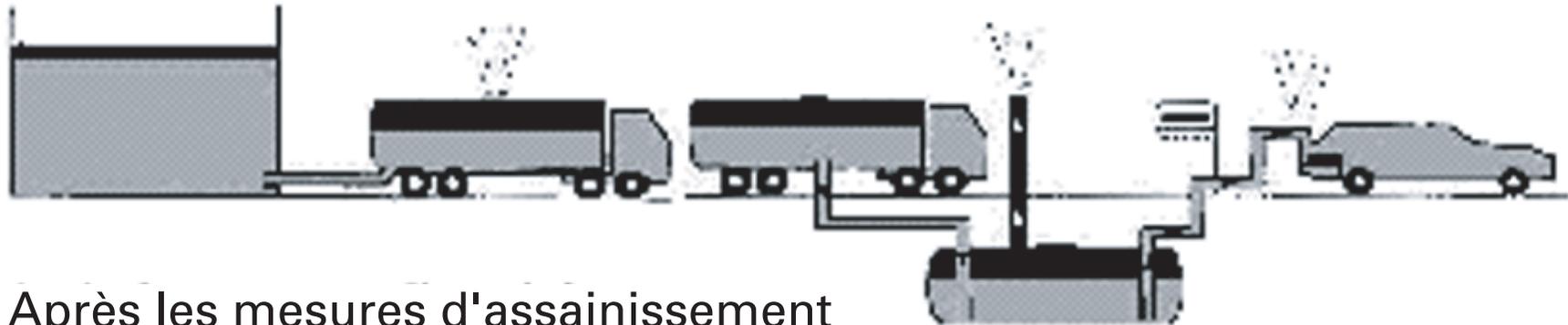




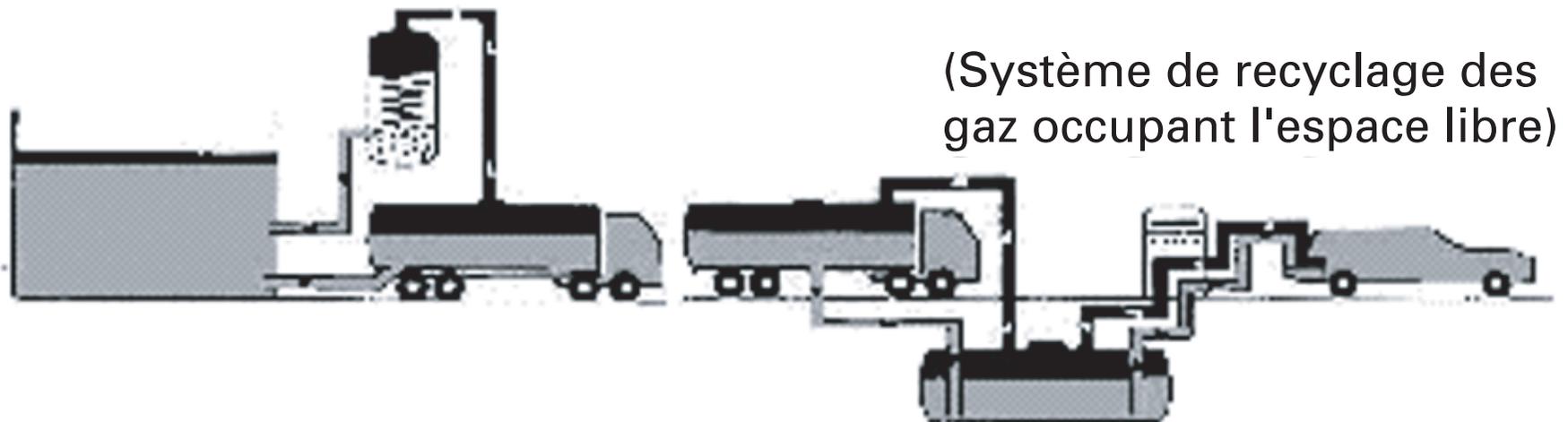


Diminution des émissions d'hydrocarbures (Volatile Organic Compounds VOC) lors du transbordement du carburant

Avant les mesures d'assainissement



Après les mesures d'assainissement



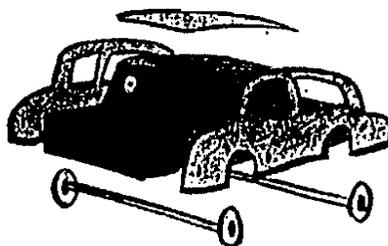
Alerte à l'énergie grise

" Grise ", parce qu'elle n'attire pas l'attention. Mais il en a fallu partout !

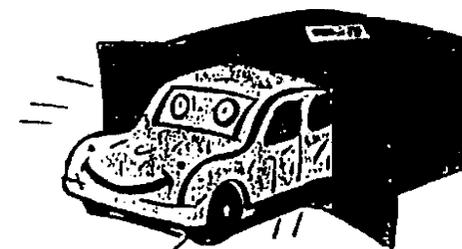
Où ça ?



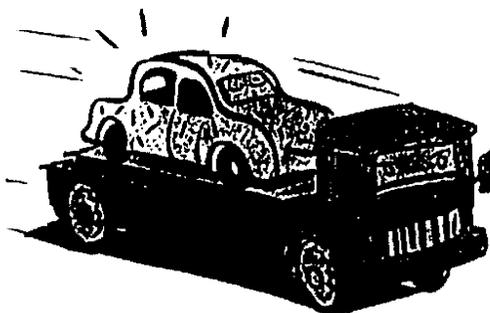
☒ Dans les matières premières



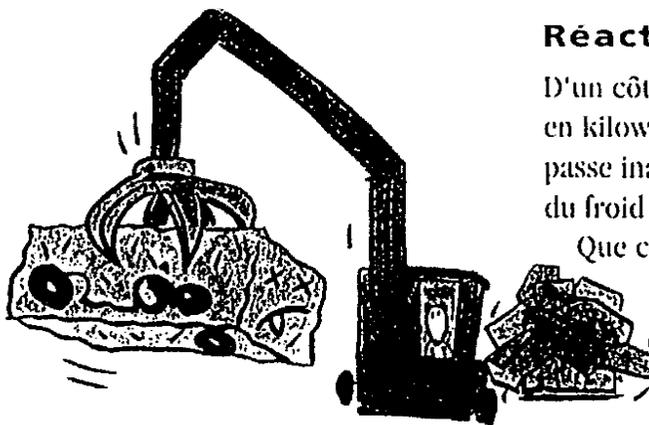
☒ Dans la fabrication



☒ Dans l'emballage et le stockage
(matériel, entrepôts, conservation)



☒ Dans le transport
(véhicules, carburant,
réfrigération)



☒ Dans l'élimination des déchets
(collecte, destruction, lutte contre
la pollution).

Réaction en chaîne

D'un côté, vous avez la consommation connue, en litres, en kilowatt-heure, en mètres cubes. De l'autre, celle qui passe inaperçue. Exemple classique, le coût de la chaîne du froid dans un surgelé.

Que ce soit une moto, un ordinateur, un démaquillant ou une feuille de papier, tout a englouti sa dose d'énergie grise. Il en faut encore pour leur élimination, voire leur recyclage.

Face à cette prise de conscience, les fabricants de véhicules comme les autres réagissent intelligemment en mettant sur le marché des produits de plus en plus durables, fiables et recyclables.



Agriculture	1,7 kWh/fr
Fer et acier	10,8 kWh/fr
Aluminium	15,0 kWh/fr
Ciment	5,6 kWh/fr
Machines	1,6 kWh/fr
Véhicules	2,2 kWh/fr
Alimentation	1,7 kWh/fr
Textiles	1,9 kWh/fr
Papier	5,6 kWh/fr
Imprimerie	1,9 kWh/fr
Caoutchouc	2,5 kWh/fr
Génie civil	1,9 kWh/fr
Commerce	1,1 kWh/fr
Prestations de services	0,6 kWh/fr