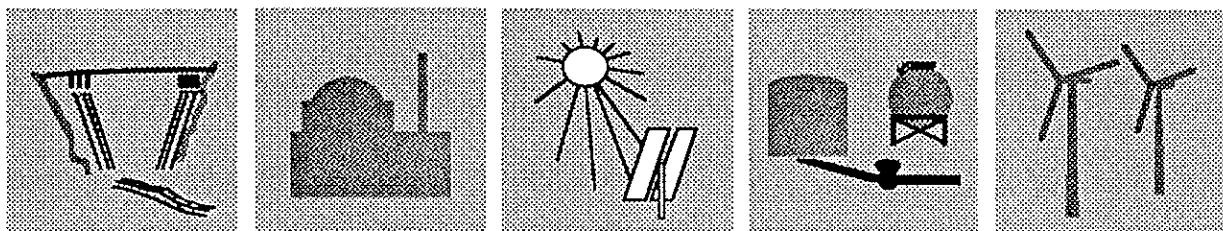


ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTES FILIERES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

(Projet de recherche Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Entreprises Electriques de Suisse Romande)



Rapport final

Th. Carra
Dr. P.-A. Haldi

Confidentiel (C)

(toute publication, même partielle, de ce texte doit avoir reçu au préalable l'autorisation du mandant et du mandataire)

Lausanne, septembre 1992

No 690.110/HI



ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

LASEN - Laboratoire de Systèmes Energétiques

IHE

Prof. G. Sarlos

TABLE DES MATIERES

RESUME

1. INTRODUCTION

- 1.1 Contexte et objectifs de l'étude
- 1.2 Méthodologie

2. DESCRIPTION DES FILIERES

- 2.1 Définition de la notion de "filières"
- 2.2 Recensement des filières envisageables
- 2.3 Description des filières sélectionnées
 - . Agent énergétique "charbon"
 - . Agent énergétique "pétrole"
 - . Agent énergétique "gaz naturel"
 - . Agent énergétique "combustible nucléaire"
 - . Agent énergétique "déchets"
 - . Agent énergétique "eau (énergie hydraulique)"
 - . Agent énergétique "vent (énergie éolienne)"
 - . Agent énergétique "rayonnement solaire"

3. DEFINITION DES CRITERES/INDICATEURS

- 3.1 Hiérarchisation des critères
- 3.2 Qualification des critères/indicateurs
- 3.3 Définition des critères/indicateurs sélectionnés
 - . Classe "sécurité d'approvisionnement et indépendance énerg."
 - . Classe "technologie"
 - . Classe "économie"
 - . Classe "impacts sur l'environnement et la santé"
 - . Classe "risques immédiats"
 - . Classe "risques différés"
 - . Classe "socio-économie et socio-politique"

4. BASE DE DONNEES INFORMATISEE

- 4.1 Principes généraux
- 4.2 Les tables
- 4.3 Accès à la base de données

5. ANALYSE DES MERITES DES FILIERES PAR CRITERES

- 5.1 Diversification géopolitique des réserves
- 5.2 Réserves assurées au niveau mondial
- 5.3 Potentiel suisse exploitable
- 5.4 Facilité de stockage au niveau national
- 5.5 Maturité technique
- 5.6 Facilité de mise en oeuvre
- 5.7 Efficacité énergétique
- 5.8 Coefficient de retour énergétique global
- 5.9 Souplesse de production
- 5.10 Prix de revient de l'énergie produite
- 5.11 Stabilité des coûts de production
- 5.12 Coûts externes
- 5.13 Importance des rejets polluants
- 5.14 Importance des émissions de gaz à effet de serre
- 5.15 Importance des nuisances liées aux déchets solides
- 5.16 Emprise au sol
- 5.17 Impacts microclimatiques
- 5.18 Impact visuel
- 5.19 Impacts d'éventuelles nuisances d'autres types
- 5.20 Impacts directs sur les écosystèmes
- 5.21 Impacts sur la santé des professionnels
- 5.22 Impacts sur la santé du public
- 5.23 Taux normalisé de décès immédiats par suite d'accidents graves
- 5.24 Fréquence cumulée d'accidents graves par unité d'énergie produite
- 5.25 Ampleur des dommages matériels résultant d'un accident grave
- 5.26 Importance des risques sanitaires encourus par les futures générations
- 5.27 Importance des risques autres que sanitaires légués aux futures générations
- 5.28 Impacts macroéconomiques
- 5.29 Acceptation sociale
- 5.30 Compatibilité avec le cadre politique, législatif et administratif suisse
- 5.31 Tableaux d'évaluation des critères/indicateurs

6. CONCLUSIONS GENERALES

REFERENCES**ANNEXES: A. LISTE DES EXPERTS CONSULTES****B. NOTE SUR LES METHODOLOGIES D'EVALUATION ET L'ANALYSE MULTICRITERE**

Caractéristiques et mérites de l'analyse multicritère

Méthodologie d'évaluation de la matrice filières x critères

- Introduction à la méthodologie
 - problématique, définitions et objectifs
 - importance du contexte de l'étude
 - hypothèses de travail
 - postulats de base
- Aide multicritère à la décision et méthodes d'évaluation
 - pourquoi une approche multicritère
 - conditions de mise en œuvre d'une analyse multicritère

C. CALCULS ECONOMIQUES

Investissements

Dépenses d'exploitation

Dépenses de combustible

Coût moyen actualisé du kWh

0. RESUME

0.1 Contexte de l'étude

Le secteur de l'électricité fait partie du secteur énergétique, qui s'inscrit lui-même dans un système socio-économique global où de nombreux objectifs doivent être satisfaits. La complexité grandissante de ce système fait que la planification du secteur de l'électricité ne peut plus aujourd'hui être envisagée en dehors d'une stratégie énergétique d'ensemble et sans prendre en compte ce contexte global, que ce soit au plan national ou international. Les choix à opérer dans ce domaine doivent par conséquent faire intervenir de multiples critères et viser des objectifs généraux tels que le bien-être social, l'efficacité économique, la sécurité des approvisionnements, la sécurité des personnes et des biens, la protection de l'environnement. Les aspects techniques et économiques, qui ont traditionnellement été les critères dominants sinon uniques dans les choix effectués entre différentes options énergétiques, ne suffisent plus de nos jours à faire accepter de nouveaux projets; les nombreux blocages constatés dans ce domaine ces dernières années, en Suisse comme à l'étranger, en témoignent de manière évidente. Pour éviter ce genre de situations, la simple prise en compte des valeurs de la société dans le processus décisionnel ne suffit cependant pas; la participation effective de tous les acteurs concernés - citoyens, industriels, commerçants, producteurs d'électricité, autorités locales, nationales ou internationales - est nécessaire. C'est l'unique façon d'obtenir un soutien social en faveur de l'application des politiques choisies. Ce processus de participation ne doit néanmoins pas conduire à une abrogation des responsabilités des décideurs, ni servir de prétexte à des situations prolongées de "non-décision" qui pourraient avoir des effets macro-économiques, sociaux et environnementaux très négatifs.

Conscientes de ces problèmes et des obligations découlant de leur vocation de service public, les Entreprises Electriques de Suisse Romande ont donné mandat au Laboratoire de Systèmes Energétiques (LASEN) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne de réaliser une étude visant à évaluer d'un point de vue objectif les mérites respectifs des différentes filières de production d'électricité pouvant entrer en ligne de compte pour notre pays, en se référant à un ensemble de critères qui se veulent aussi représentatifs que possible de l'intérêt général.

Il ne s'agit pour l'instant que d'une **étude pilote**, destinée essentiellement à montrer la faisabilité et l'intérêt d'une telle approche et à constituer une base de référence pour d'éventuels développements plus ambitieux. A noter que l'on assiste depuis quelques années à un net regain d'intérêt pour de telles études comparatives. La "conférence d'Helsinki" (Colloque d'experts de haut niveau sur l'électricité et l'environnement, 13-17 mai 1991, Helsinki), en particulier, a permis de faire un bilan très complet de l'état des connaissances dans le domaine des études comparatives de risques et d'impacts des différents systèmes de production d'électricité; à la suite de cette conférence, différents groupes de travail ont été constitués pour s'atteler en priorité aux tâches suivantes:

- i) établissement d'une base de données, coordonnée au niveau *international*, relative aux effets des différentes sources d'énergie sur la santé et l'environnement;
- ii) compilation de méthodes et procédures en vue d'uniformiser l'évaluation comparative des risques;
- iii) mise au point de méthodes permettant d'intégrer l'évaluation comparative des risques dans la planification relative à la production d'électricité;

Cet effort *international* ouvre évidemment d'intéressantes perspectives pour de futurs développements dans le type d'étude comparative qui fait l'objet de ce rapport.

0.2 Méthodologie

Pour remplir les objectifs décrits plus haut, la présente étude a été conçue dans une optique non seulement **multicritère** mais aussi **multiacteurs** ou **multidécideurs**¹. L'approche multicritère consiste à établir une matrice à deux dimensions. La première dimension est donnée par l'ensemble des variantes - dans notre cas les différentes options (filières) de production d'électricité qui pourraient être utilisées dans notre pays - alors que les critères de comparaison constituent la seconde dimension.

¹ Une excellente description des principales situations types de processus décisionnels peut être trouvée dans l'ouvrage de J. Simos "Evaluer l'impact sur l'environnement, une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1990.

A partir d'une telle matrice, il est possible d'établir des tableaux de concordance et de discordance (tenant compte de poids et de seuils fixés par les décideurs) puis, par comparaison des variantes deux à deux, un graphe de surclassement qui permet éventuellement de sélectionner la ou les "meilleure(s)" variante(s) relativement à l'ensemble des critères retenus. Dans la phase actuelle de l'étude, nous en sommes restés à l'établissement de la matrice d'évaluation filières x critères; dans une étape ultérieure, il est envisagé d'utiliser les évaluations ainsi réalisées pour choisir, en suivant jusqu'au bout le processus décrit ci-dessus, entre diverses variantes de combinaisons de systèmes de production d'électricité ("energy mixes") permettant de répondre à la demande d'une région ou d'un pays donné. L'application directe de cette procédure aux différentes filières considérées dans cette étude n'aurait en effet guère eu de sens, le problème posé aux responsables n'étant pas d'accorder un quelconque "prix d'excellence" à une filière plutôt qu'à une autre mais bien de choisir une structure de production qui prenne le mieux possible en considération l'ensemble des contraintes (critères) évoquées plus haut. Il est ainsi possible dans les différentes options envisagées de tenir compte des caractéristiques propres à chaque filière, ce qui permet d'éviter de devoir faire des hypothèses, discutables vis-à-vis du processus de comparaison, telle par exemple l'adjonction de systèmes d'appoint aux installations solaires ou éoliennes pour leur permettre d'assurer la charge de base!

*Pour légitimer les choix et les évaluations faites dans le cadre de cette étude en tenant compte des considérations développées dans l'introduction, un **groupe d'experts** a été constitué comprenant des personnalités de formations et sensibilités diverses. Un certain dialogue a ainsi pu être noué entre, disons, "techniciens" et "humanistes" sur des questions que ces deux groupes de spécialistes n'ont en général guère l'occasion d'aborder ensemble. Ce dialogue constitue un élément essentiel de l'étude; il représente une approche, modeste peut-être, mais décisive vers une analyse qui ne soit effectivement pas seulement multicritère mais aussi multidécideurs.*

Ce groupe d'experts a en particulier entériné la sélection des filières (systèmes de production d'énergie électrique "éligibles" en Suisse dans les 10 ou 15 prochaines années) et le choix des critères pris en considération dans l'étude. Pour les filières, une structure à deux niveaux a été retenue, le premier niveau correspondant à une classification en fonction de l'agent énergétique utilisé - charbon, pétrole, gaz, combustible nucléaire, ordures ou déchets, énergie hydraulique, soleil et vent - et le

second niveau prenant en compte, dans chacune de ces classes, des chaînes particulières de production d'énergie électrique (ce second niveau n'est pris en compte que lorsque des différences significatives dans l'évaluation de certains critères justifie une séparation plus fine que celle correspondant aux seuls agents énergétiques).

Il est important de souligner à ce propos qu'une évaluation comparative correcte suppose un ensemble clair et cohérent d'hypothèses, ainsi qu'une définition uniforme des systèmes à comparer; elle exige en particulier que soit prise en compte la totalité du cycle du combustible des différentes technologies analysées. Il est malheureusement très difficile dans la pratique de définir avec précision et de manière uniforme les limites des systèmes; en outre, les informations permettant de savoir exactement quelles sont les hypothèses faites dans ce domaine par les différents auteurs auxquels nous nous sommes référés pour obtenir les données nécessaires à notre étude font le plus souvent partiellement ou totalement défaut. On peut probablement attribuer en bonne partie à des écarts de définition de ce genre les divergences relativement importantes constatées parfois entre les évaluations réalisées par différents auteurs (en particulier sur les critères d'impacts sur la santé ou l'environnement)¹.

En ce qui concerne les critères, une structure hiérarchique à trois niveaux a été définie, c'est-à-dire, par ordre de détail croissant: les **classes** (regroupement de critères de même nature), les **critères** proprement dits (niveau de référence) et les **indicateurs** (niveau de saisie de l'information de base). Lorsqu'un critère peut être caractérisé par un seul indicateur, le dernier niveau est supprimé (dans ce cas, critère = indicateur). Les critères/indicateurs peuvent être soit de type qualitatif - la valeur attribuée est alors une appréciation choisie parmi un ensemble ordonné de propositions (par exemple: "fort", "moyen", "faible") - soit de type quantitatif - la valeur du critère/indicateur est dans ce cas un nombre, éventuellement deux nombres définissant les bornes d'un intervalle, accompagné de l'indication de l'unité utilisée (exemple: décès/GWe.an). Les informations de type quantitatif proviennent de diverses sources bibliographiques autorisées. Les appréciations de type qualitatif résultent d'une procédure de consultation effectuée au sein du groupe d'experts dont il a été fait mention plus haut.

¹ Voir l'analyse critique réalisée par U. Hauptmanns et W. Werner dans leur ouvrage "Engineering Risks, Evaluation and Valuation", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, London, Tokyo, Hong-Kong, Barcelona, 1987.

0.3 Matrice d'évaluation

La figure 1 décrit schématiquement la structure de la matrice d'évaluation filières x critères utilisée dans cette étude (les subdivisions indiquées sur cette figure sont arbitraires et ne visent qu'à illustrer le concept de niveaux décrits plus haut).

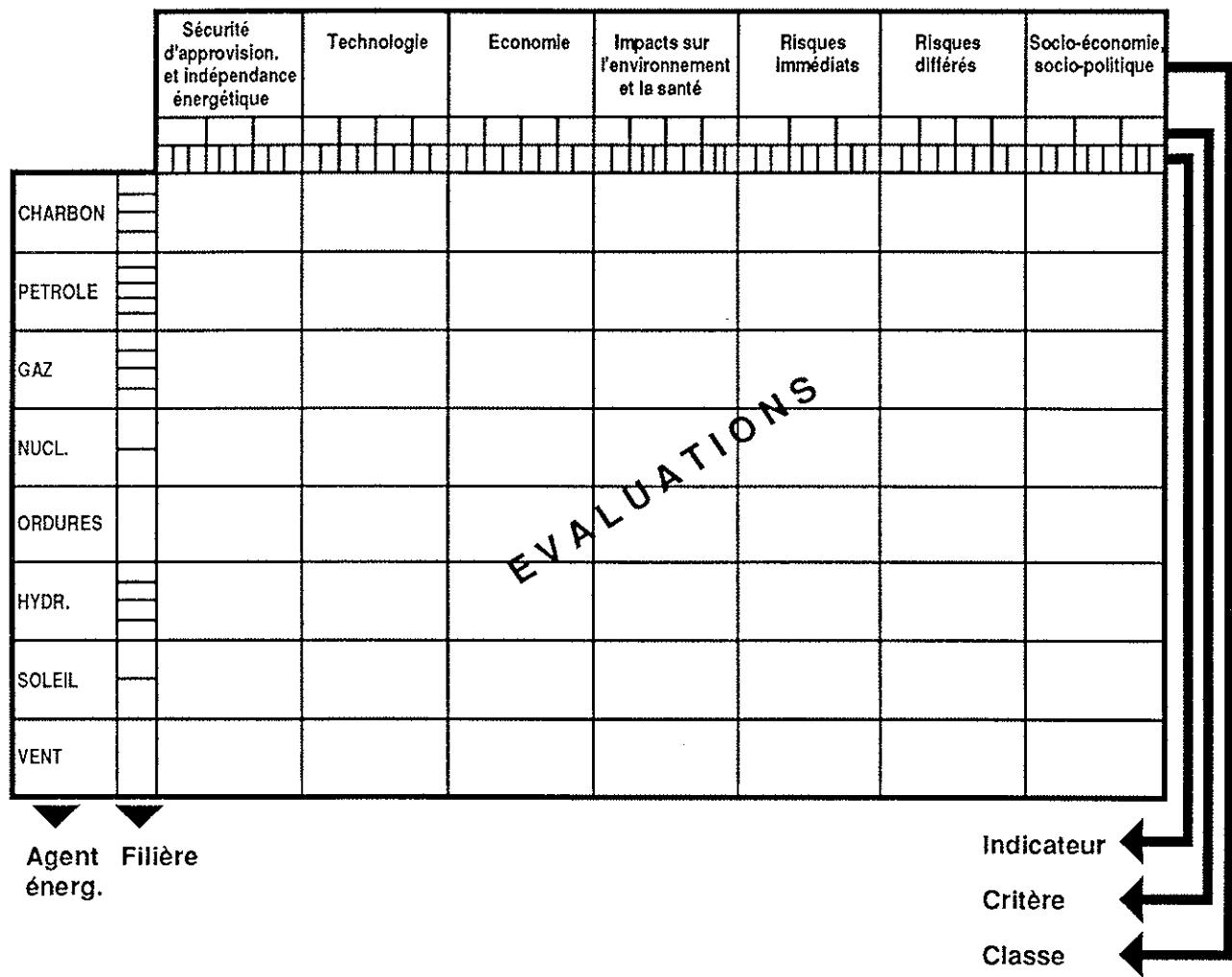


Fig.1 Représentation schématique de la matrice d'évaluation filières x critères

Une brève description des différents critères/indicateurs sélectionnés est donnée dans le tableau qui suit (tableau 1) en suivant la hiérarchie classe/critère/indicateur illustrée dans la figure ci-dessus.

Tableau 1: Critères/indicateurs sélectionnés

Classe	Critère	Indicateur
Sécurité d'approvision. et indépend. énergétique	Diversification géopolitique des réserves	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de pays exportateurs de l'agent énergétique primaire considéré. Pourcentage des réserves de cet agent énergétique primaire situées dans des pays "sûrs" (critère: appartenance OCDE).
	Réserves au niveau mondial	<ul style="list-style-type: none"> Réserves prouvées (EJ). Réserves additionnelles (EJ). Production mondiale de l'agent énergétique primaire considéré (EJ/an).
	Potentiel suisse exploitable	<ul style="list-style-type: none"> Limite imposée par la capacité des réseaux utilisés pour le transport du combustible, év. des déchets à évacuer (EJ/an). Puissance maximale pouvant être installée sur les sites disponibles (MW_e).
	Facilité de stockage au niveau national	<ul style="list-style-type: none"> Volume unitaire de stockage (m³/TJ). Coût unitaire du stockage (Fr/TJ). Capacité de stockage actuelle (TJ).
Technologie	Maturité technique actuelle	<ul style="list-style-type: none"> Maturité est <u>grande</u> si la filière considérée est déjà commercialisée à grande échelle, <u>moyenne</u> si les installations existantes ne sont encore que des prototypes, <u>faible</u> si les développements réalisés à ce jour n'ont pas dépassé le stade de prototypes expérimentaux.
	Facilité de mise en oeuvre	<ul style="list-style-type: none"> Temps de construction (mois). Temps requis pour le démantèlement (mois). Type d'infrastructure nécessaire pour la construction (<u>lourde</u>, <u>mi-lourde</u>, <u>légère</u>). Type d'infrastructure nécessaire pour le démantèlement (<u>lourde</u>, <u>mi-lourde</u>, <u>légère</u>).
	Efficacité énergétique	<ul style="list-style-type: none"> Rapport entre l'énergie électrique produite par une installation du type considéré et l'énergie primaire transformée.

Classe	Critère	Indicateur
Economie	Coefficient de retour énergét. global	<ul style="list-style-type: none"> Rapport entre l'énergie produite pendant la vie utile d'une installation du type considéré et l'énergie qu'il faut investir pour sa mise en service, son fonctionnement et son démantèlement.
	Souplesse de production	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité de suivi de charge (variation de puissance admissible en % de la puissance nominale). Taux max. de variation de la puissance (%/min). Coefficient de disponibilité (%). Caractère de la production (<u>prévisible</u>, <u>peu prévisible</u>, <u>imprévisible</u>).
	Prix de revient de l'énergie électr. produite	<ul style="list-style-type: none"> Coût actualisé des investissements (Fr/kW installé). Coût actualisé d'exploitation (Fr/kWh produit). Coût actualisé du cycle du combustible (Fr/kWh produit). Total actualisé des heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance.
	Stabilité des coûts de prod.	<ul style="list-style-type: none"> Evaluation de la stabilité à court et moyen terme du coût de l'énergie produite par des installations de la filière considérée.
	Coûts externes	<ul style="list-style-type: none"> Coûts sociaux et environnementaux directement liés à la production d'énergie électrique par des installations de la filière considérée et qui ne sont pas répercutés sur les coûts de production. (Fr/kWh).
Impacts sur l'environnement et la santé	Importance des rejets polluants	<ul style="list-style-type: none"> Volumes de dilution spécifique pour les principaux polluants, SO₂, NO_x, HC, radioactivité (Xe, Kr) ; le volume de dilution spécifique (m³ air/kWh) est donné par le quotient de l'émission spécifique (kg/kWh) par la concentration maximale admissible du polluant considéré, selon l'OPair.
	Importance des émissions de gaz à effet de serre	<ul style="list-style-type: none"> Emissions spécifiques des différents gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, CFC, N₂O) (kg équiv. CO₂/kWh). "Global Warming Potential" des différents gaz à effet de serre.

Classe	Critère	Indicateur
	<p>Importance des nuisances liées aux déchets solides</p> <p>Emprise au sol</p> <p>Impacts micro-climatiques</p> <p>Importance d'éventuelles nuisances d'autres types</p> <p>Impacts directs sur les écosystèmes</p> <p>Impacts sur la santé des professionnels</p> <p>Impacts sur la santé du public</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Volumes de déchets solides produits, classés par catégories de déchets (m^3/kWh). • Niveau de toxicité (ou d'activité) des différentes catégories de déchets (qualitatif). • Possibilités d'isoler efficacement et sûrement les déchets concernés de la biosphère (qualitatif). <ul style="list-style-type: none"> • Surface occupée par l'installation de production d'énergie électrique (m^2/MW installé). <ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de l'importance de l'implantation d'une installation du type considéré sur la climatologie locale (qualitatif). <ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de l'importance de nuisances telles que odeurs, bruit, etc. (qualitatif). <ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de l'importance des perturbations engendrées par la présence d'une installation du type considéré sur les écosystèmes (qualitatif). <ul style="list-style-type: none"> • Evaluation statistique des risques sanitaires courus par l'ensemble de la main d'œuvre employée dans la filière énergétique correspondante (journées de travail perdues ou "Man-Days-Lost"/MWe.an). <ul style="list-style-type: none"> • Evaluation statistique des risques sanitaires auxquels sont soumises les populations concernées du fait de la présence dans leur voisinage plus ou moins immédiat d'installations de la filière considérée (journées de travail perdues ou "Man-Days-Lost"/MWe.an).

Risques immédiats	Taux normalisé de décès immédiats par suite d'accid. graves Fréquence cumulée d'accidents graves Ampleur des dommages matériels occasionnés par un accident grave	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de décès immédiats enregistrés durant une période de référence à la suite d'accidents graves touchant des installations de la filière considérée, rapporté à l'énergie produite par celle-ci pendant la même période (décès/GWe.an) Probabilité par unité d'énergie produite d'accidents provoquant plus de 100 décès. Probabilité par unité d'énergie produite d'accidents provoquant plus de 1000 décès. Ampleur des dégâts matériels (MFr/accident grave) . Etendue concernée (km²/accident grave) .
Risques différés	Importance des risques sanit. encourus par les futures générations Importance des risques autres que sanitaires légués aux futures génér.	<ul style="list-style-type: none"> Probabilité de relâchements différés de substances nocives dans la biosphère (qualitatif). Ampleur des conséquences d'un tel relâchement (qualitatif). Durée de la menace potentielle (années). Risque à long terme de modifications des conditions de vie sur Terre (qualitatif). Risque à long terme de destructions massives d'espèces animales ou végétales (qualitatif). Risque d'épuisement de ressources naturelles de grande valeur (qualitatif).
Socio-économ. socio-politique	Impacts macro-économiques	<ul style="list-style-type: none"> Impact sur le marché suisse de l'emploi (nombre et qualité des emplois liés à la filière considérée). Apport à la "culture technico-scientifique" du pays.

	Acceptation par le public	<ul style="list-style-type: none"> • Compréhension des phénomènes physiques se déroulant dans les installations du type considéré. • Familiarité du public avec le type de risque(s) lié à l'utilisation d'installations de la filière considérée. • Ampleur supposée des conséquences d'un accident grave. • "Dimension humaine" attribuée à la technologie. • Confiance du public dans les responsables des installations du type considéré et dans les autorités de surveillance.
	Compatibilité avec le cadre politique, législ. et administratif suisse	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité du soutien "officiel" à la filière considérée (allant de subventions ou autres encouragements à d'éventuelles taxes de dissuasion ou même interdictions). • Influence de groupes de pression ("lobbies") pour ou contre la filière considérée. • Marge de manœuvre des promoteurs de la filière considérée dans le cadre législatif suisse. • Qualité de l'information fournie au public sur les caractéristiques techniques et d'exploitation de la filière considérée.

0.4 Analyse des mérites des filières par critères

Une brève analyse des mérites des différentes filières considérées (au niveau "agent énergétique") par rapport aux principaux critères définis plus haut est proposée dans cette section. Une telle analyse "monocritère" ne vise évidemment pas à établir un quelconque classement "définitif" ou "absolu" des filières en question, mais bien plutôt à mettre en évidence les points forts, ou au contraire les faiblesses, de celles-ci lorsqu'on s'intéresse à un critère en particulier.

Rappelons que les résultats présentés ci-après, compte tenu du caractère pilote de la présente étude, ne constituent qu'une première esquisse d'analyse comparative globale des différentes filières de production d'électricité; ces premiers résultats devront encore être complétés, étendus et vérifiés dans le cadre de futurs travaux.

Sécurité d'approvisionnement et indépendance énergétique

Les réserves assurées des combustibles fossiles et nucléaires sont suffisantes pour couvrir les besoins mondiaux en énergie pendant encore plusieurs décennies au rythme de consommation actuelle; les réserves connues de charbon suffiraient même pour plusieurs siècles. Ce constat appelle cependant trois observations importantes:

- Le concept de réserves est une notion dynamique qui dépend plus d'un "horizon de prospection" donné que d'une réelle connaissance géologique profonde des ressources de notre planète, comme l'atteste le fait que les réserves ont plutôt eu tendance à croître légèrement dans les trente dernières années malgré une consommation en augmentation constante. Il n'en reste pas moins que les stocks géologiques de combustibles fossiles sont par nature limité et qu'un épuisement de ces ressources à plus ou moins long terme est inéluctable.
- Le fait de comparer les ressources en "années de réserve à consommation actuelle" est certes très parlant, mais ne tient compte ni de la croissance attendue de la consommation globale d'énergie, liée à l'évolution démographique et à l'amélioration du niveau de vie des populations les moins favorisées, ni de possibles (voire même nécessaires, pour des raisons de protection de l'environnement) modifications des parts de marché respectives des différents agents énergétiques.
- L'évaluation des réserves est tout particulièrement difficile dans le cas de l'énergie nucléaire. Etant donné que le prix du combustible n'intervient que pour une faible part (1 à 3% seulement) dans le prix de l'électricité d'origine nucléaire, toute hausse du prix de l'énergie produite à partir d'autres sources abaisse rapidement le seuil d'exploitation économique des gisements de combustibles nucléaires et conduit à une importante augmentation du volume de ces réserves. La valeur énergétique de celles-ci dépend d'autre part très fortement du type de réacteur dans lequel on compte les utiliser; l'utilisation de réacteurs surgénérateurs permettrait en particulier de multiplier les réserves d'uranium par un facteur 50 à 60, ce qui ferait alors passer l'énergie nucléaire très nettement en tête des énergies non-renouvelables dans ce domaine.

En ce qui concerne l'accès à ces réserves, les filières nucléaires et à gaz présentent globalement une plus grande diversification géopolitique (au sens de la sécurité

d'approvisionnement) que les filières utilisant le charbon ou le pétrole. L'avantage du nucléaire provient essentiellement de l'importance des réserves situées dans des pays appartenant à l'OCDE, alors que celui du gaz découle plutôt du nombre de pays exportateurs. Les réserves de pétrole ont l'inconvénient d'être situées très majoritairement hors de la "zone OCDE"; le nombre de pays exportateurs est par contre relativement élevé. Les réserves de charbon sont largement distribuées sur la planète, mais le coût d'extraction élevé de cet agent énergétique et la difficulté de le transporter sur de grandes distances limitent fortement le nombre de pays actuellement exportateurs.

Du point de vue des possibilités de production en Suisse ("potentiel suisse exploitable", basé sur une évaluation "réaliste" des puissances qui pourraient être mise en service en tenant compte en particulier des sites disponibles et d'éventuelles limitations imposées par la capacité des réseaux de transport) les énergies hydraulique et nucléaire offrent de meilleures perspectives que les combustibles fossiles. A l'horizon de temps considéré (une quinzaine d'années) l'apport des énergies renouvelables semble devoir rester très marginal.

Sur le plan des capacités de stockage au niveau national, il est clair que l'énergie nucléaire, en raison de la très grande densité énergétique de son combustible, présente un avantage écrasant si on la compare aux autres filières. Parmi les énergies fossiles, le gaz est pénalisé par l'importance des volumes à stocker (ou la nécessité de prévoir des stockages sous haute pression). Le stockage de l'eau dans des bassins d'accumulation permet de "mettre de l'énergie en réserve" de manière relativement facile, même si les volumes à stocker sont là encore très importants.

Technologie

Mis à part les piles à combustible, les réacteurs à haute température et les surgénérateurs, les filières retenues ont en général pleinement atteint le stade commercial et peuvent donc être considérées comme présentant une grande maturité technique.

Pour ce qui est des exigences en matière d'infrastructure, de temps de construction et de temps de démantèlement, ce sont les installations nucléaires et les grands aménagements hydrauliques qui sont les plus gros consommateurs de ressources.

Il convient néanmoins de remarquer que les ressources en question (infrastructure industrielle, savoir-faire technologique, capitaux) existent dans notre pays; cela place la Suisse dans une situation très différente de celle de pays moins développés qui devraient mettre en place la logistique nécessaire avant de pouvoir envisager le recours à de telles technologies.

Sur le plan de l'efficacité énergétique (rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie brute consommée), aucune amélioration sensible des performances des centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles n'est à attendre dans les années à venir, étant donné que les limites pratiques ont déjà quasiment été atteintes. Tout au plus peut-on espérer gagner encore 1 ou 2%, ce qui permettrait d'aller légèrement au-delà de la barre des 40% (moyenne actuelle: 37%). Ces performances sont du même ordre que celles que l'on peut espérer atteindre avec des réacteurs à haute température; les réacteurs actuels, du type à eau légère, ne peuvent quant à eux guère dépasser des efficacités de l'ordre de 33% en raison de contraintes technologiques qui limitent la température de sortie du caloporteur à environ 300 °C. Par le fait qu'elles mettent en jeu une conversion directe de l'énergie chimique de combustibles fossiles en énergie électrique, sans passer par un cycle thermodynamique, les piles à combustible devraient permettre d'atteindre des efficacités supérieures à 80% (actuellement: ~ 70%). Les installations hydrauliques atteignent des efficacités de conversion du même ordre. Les cellules photovoltaïques, par contre, ont des performances beaucoup plus modestes (entre 5 et 25% selon le type de capteur). Enfin l'efficacité des éoliennes ne dépasse guère 40% en pratique (valeur théorique maximale: 59.3%, selon la formule de Betz).

Le coefficient de retour énergétique global (rapport entre l'énergie produite durant la vie d'une installation donnée et l'énergie qu'il a fallu investir pour la mettre en service, l'exploiter et la démanteler en fin de vie) est particulièrement élevé pour les installations hydrauliques, du fait essentiellement de leur longévité. Ce "retour énergétique" est également très bon pour l'ensemble des filières thermiques, classiques ou nucléaires. Les installations faisant appel aux énergies solaire et éolienne présentent par contre, sur ce plan, un bilan nettement moins favorable (dans l'état actuel de la technique) étant donné qu'il s'agit d'énergies très diffuses qui demandent un important investissement en matériaux pour être captées. Ces conclusions sont sans doute qualitativement correctes; il faut par contre être plus prudent en ce qui concerne les évaluations chiffrées fournies pour cet indicateur, car on manque encore de données précises, fiables et cohérentes dans ce domaine.

La souplesse de production des installations thermiques dépend beaucoup de leur taille (plus pour des raisons économiques que pour des raisons techniques d'ailleurs); les installations de faibles puissances (moteurs par exemple) peuvent plus facilement être utilisées "à la demande" que les grosses installations. Afin de rentabiliser les importants investissements consentis pour leur construction, les centrales nucléaires sont normalement conçues pour fonctionner en permanence à puissance nominale; elles ont donc vocation à couvrir la charge de base (ce qu'elles réalisent en Suisse avec des coefficients de disponibilité remarquablement élevés: 80-90%). La souplesse de production des aménagements hydrauliques avec bassin d'accumulation est évidemment très grande; cette souplesse est d'ailleurs mise à profit pour couvrir les pointes de demande aussi bien sur le plan national que transnational. Les centrales fonctionnant au fil de l'eau sont plus tributaires des aléas de l'hydraulicité; elles se rapprochent en cela des installations utilisant les autres énergies renouvelables - solaire et éolienne - qui ne peuvent assurer une production suffisamment continue qu'à la condition d'être associées à des dispositifs de stockage (qui nécessitent la conversion de l'énergie captée en d'autres formes d'énergies).

Economie

Le prix de revient de l'électricité produite varie pour chaque type d'énergie avec le mode d'exploitation, la durée de fonctionnement annuelle, le constructeur, le site, etc. Il est donc important de s'assurer lors de toute comparaison de prix que les hypothèses économiques de base faites pour les différentes filières sont bien identiques. Pour les filières non encore exploitées en Suisse, on doit en outre tenir compte du biais que peut introduire la simple conversion en francs suisses de coûts enregistrés à l'étranger (les conditions politico-économiques et sociales étant différentes). Quelles que soient les marges d'incertitude et de fluctuation entourant les prix de revient de l'électricité produite, il est indéniable que les sources les moins chères restent les énergies traditionnelles; dans l'état actuel des choses, les filières héliothermiques, photovoltaïques et éoliennes ont des coûts de production beaucoup trop élevés (atteignant ou dépassant même 1 Fr/kWh) pour être compétitives avec les options classiques. En ce qui concerne la comparaison entre énergies fossiles et énergie nucléaire, l'avantage revient à la seconde dès que la durée de fonctionnement annuelle est suffisamment longue (de l'ordre de 6000 h/an au moins). Le prix de revient de l'électricité produite par les installations hydrauliques dépend fortement du type et de l'âge des aménagements.

L'expérience montre que la prévision des prix des combustibles fossiles sur une longue période n'a guère de portée pratique, car des circonstances particulières et imprévisibles peuvent à tout instant invalider les hypothèses faites. C'est tout particulièrement vrai pour le prix du pétrole et, dans une moindre mesure, pour celui du gaz qui lui est pour le moment indexé. Pour le charbon, on peut s'attendre à une hausse modérée de prix dans les prochaines années, variable selon la teneur en soufre; étant donné l'importance et la distribution des réserves de part le monde, il n'y a a priori aucune raison de penser que le marché de cet agent énergétique puisse subir des tensions particulières dans l'intervalle de temps considéré. L'électricité d'origine nucléaire ou hydraulique ne devrait pas non plus connaître de grands bouleversements de prix dans les années à venir. En ce qui concerne les énergies solaire et éolienne, on peut penser que des améliorations techniques permettront éventuellement d'abaisser les coûts d'investissement dans une mesure importante (l'éventualité d'un progrès technique décisif est plus grande pour des techniques naissantes que pour des techniques déjà bien éprouvées).

Tous les systèmes de production d'électricité ont des incidences sociales, environnementales et sanitaires dont une partie des coûts est supportée par la société dans son ensemble, et non par les bénéficiaires des prestations ainsi fournies au prorata de leur consommation; ce sont les coûts dits "externes". Une saine planification de l'énergie et du secteur électrique doit prendre en compte ces coûts externes et chercher à les "internaliser" dans le prix de vente de l'énergie fournie. Ceci nécessite d'identifier précisément la nature et l'importance des sources de nuisances associées à la technologie considérée, d'en analyser les conséquences pour l'homme et l'environnement et enfin d'évaluer le coût social de celles-ci. Etant donné la difficulté de ce processus d'évaluation, il n'est pas surprenant que les études réalisées dans ce domaine soient encore peu nombreuses et leurs résultats assez divergents. Parce que son cycle du combustible est le plus "intégré", on peut néanmoins estimer que l'énergie nucléaire bénéficie d'une certaine avance sur les autres énergies en ce qui concerne la prise en compte, dans le prix de revient de l'énergie produite, du coût des mesures destinées à protéger l'homme et l'environnement, depuis le stade de l'extraction du minerai jusqu'au démantèlement final des installations. Les énergies fossiles devraient par contre être plus fortement pénalisées par une "internalisation" des coûts sociaux et environnementaux, liés aux émissions de polluants et de gaz à effet de serre essentiellement. Les coûts externes associés à l'énergie éolienne sont à l'évidence très limités; ils sont par contre nettement plus importants semble-t-il pour le solaire photovoltaïque.

Risques et impacts

Les niveaux de risques pour la santé et l'environnement attribuables aux systèmes de production d'électricité en fonctionnement normal dépendent dans une large mesure de dispositions telles que l'implantation, les techniques, l'organisation et l'exploitation des installations. Il n'est de ce fait pas toujours possible d'appliquer sans autre à la Suisse des résultats enregistrés à l'étranger (cas des filières qui ne sont pas encore exploitées dans notre pays). Les résultats des évaluations comparatives montrent néanmoins de manière constante que, dans les conditions d'exploitation normale, les systèmes de production d'électricité faisant appel aux énergies renouvelables et à l'énergie nucléaire tendent à se situer en bas de l'échelle des risques sanitaires, tandis que ceux qui reposent sur l'utilisation du pétrole et, plus encore, du charbon se situent en haut de cette même échelle. Le groupe des combustibles fossiles présente des taux d'accidents professionnels élevés au niveau de l'extraction, du transport et du conditionnement de ces agents énergétiques. Les risques pour le public sont dominés par les rejets relativement importants de déchets gazeux et solides auxquels donne lieu l'utilisation des combustibles en question. Le groupe des énergies renouvelables (énergies éolienne et solaire) se caractérise par un risque minime pour le public, mais par un risque plus élevé pour les travailleurs au stade de la construction et du montage des installations, du fait que ces énergies demandent des installations très importantes par unité d'électricité produite en raison de leur faible densité énergétique. Pour la raison inverse - haute densité énergétique, et par conséquent quantités proportionnellement très limitées de matériaux et de déchets à manipuler, transporter ou conditionner - les risques pour les professionnels et plus encore pour le public sont particulièrement bas dans le domaine nucléaire. Le principal impact des centrales nucléaires sur l'environnement est dû aux émissions de gaz et de liquides de très basse activité; ces émissions sont néanmoins strictement réglementées et surveillées.

En ce qui concerne le risque d'accidents graves, tous les systèmes énergétiques, à l'une ou l'autre des étapes de leur cycle du combustible, peuvent être la cause d'accidents de ce genre (généralement définis comme des accidents présentant un risque important, en dehors du site de l'installation, pour les personnes, les biens ou l'environnement). De tels accidents peuvent survenir du fait de défaillances structurelles ou mécaniques, de dysfonctionnements des procédés, d'erreurs humaines ou d'actes de malveillance (attentat, sabotage), ou d'événements extérieurs naturels tels que tremblements de terre, inondations, cyclones, etc.

Les statistiques concernant les accidents graves (probablement incomplètes car il n'y a pas encore de collecte systématique et centralisée de ces données au niveau international, exception faite pour celles touchant au domaine nucléaire), relevées sur la période de référence 1969-1986, font apparaître que c'est de loin l'énergie hydraulique qui conduit au taux de décès par énergie produite (décès/GWe.an) le plus élevé (3839 décès pendant la période considérée, pour une énergie produite de 2700 GWe.an). On trouve ensuite le charbon, essentiellement du fait des catastrophes minières. L'accident de Tchernobyl, le plus grave qu'ait connu l'industrie nucléaire civile, a entraîné 31 décès immédiats parmi les travailleurs et sauveteurs ayant eu à intervenir sur le réacteur endommagé immédiatement après l'accident (à titre de comparaison, l'énergie produite par l'ensemble des installations nucléaires durant la période de référence considérée s'est élevée à environ 1100 GWe.an). A cela s'ajoutent la contamination de vastes zones et l'évacuation immédiate de quelque 130'000 personnes; des effets différés, dont l'ampleur sera néanmoins difficile à cerner avec précision, sont d'autre part à attendre. Relevons cependant que le type de réacteurs mis en cause dans cet accident présente des caractéristiques de sécurité qui ne répondent pas aux normes imposées aux réacteurs mis en service dans les pays Occidentaux ou d'Extrême-Orient; l'accident le plus grave survenu à un réacteur du type de ceux qui sont (ou pourraient être mis) en service en Suisse, celui survenu à l'un des deux réacteurs à eau pressurisée de la centrale américaine de Three Mile Island, n'a eu qu'un impact négligeable sur la santé des populations ou l'environnement (les conséquences financières de cet accident, par contre, ont été beaucoup plus sérieuses).

Pour des raisons d'éthique, une attention particulière doit être portée aux éventuelles conséquences pour les générations futures de nos activités présentes dans le domaine de la production d'énergie électrique. Dans ce contexte, l'énergie nucléaire, en raison de la nécessité de gérer à très long terme des déchets de moyenne ou haute activités, et les énergies fossiles, pour leur contribution à un éventuel réchauffement de l'atmosphère, sont les agents énergétiques qui suscitent le plus de craintes. Le risque potentiel que présentent les déchets atomiques de moyenne et haute activité est certes important, cependant des techniques capables de satisfaire les objectifs de sécurité les plus stricts existent et leur mise en oeuvre est en route; le danger est donc bien réel, mais des parades efficaces sont disponibles pour éviter toute éventualité de retour de ces déchets dans la biosphère avant que leur activité ait suffisamment baissé pour qu'ils ne présentent plus qu'un risque négligeable.

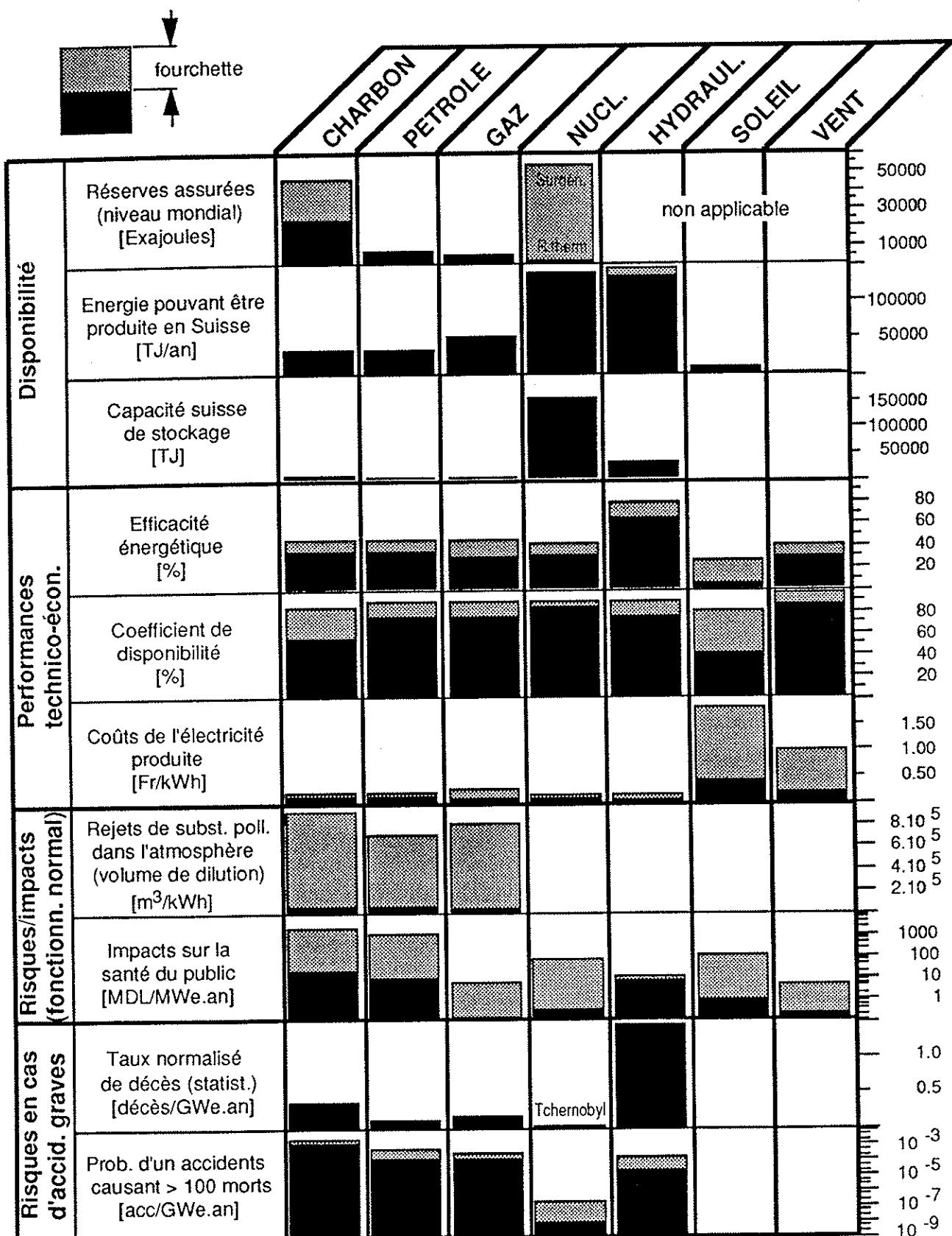


Fig.2 Tableau (partiel) de comparaison des filières de production d'électricité

Il est par contre beaucoup moins aisé de maîtriser la "machine climatique" que constitue notre atmosphère; c'est pourquoi les émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre provenant des combustibles fossiles doivent retenir l'attention en priorité (si l'on prend en considération la totalité du cycle du combustible, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire contribuent  g galement à l'émission de gaz à effet de serre, mais dans une proportion bien moindre - environ cent fois moins par unité d'énergie électrique produite - que les énergies fossiles). Une modification globale des conditions climatiques aurait en effet des répercussions sociales, politiques et économiques qu'il est encore difficile d'évaluer précisément mais que la prudence impose de prévenir dans toute la mesure du possible étant donné le caractère de quasi-irréversibilité des phénomènes en cause.

Suivant en cela l'opinion du groupe d'experts, les critères à prédominance "sociétale" n'ont pas été évalués dans le cadre de la présente phase pilote. Une telle évaluation aurait demandé pour être crédible une procédure de consultation  labor e , parmi un groupe de personnalités vraiment représentatives du tissu social de notre pays, ce qui ne pouvait être réalisé dans le cadre du budget et du temps alloués à cette étude.

La figure 2 résume, sous forme d'un tableau synoptique, les principaux résultats discutés plus haut. Le choix des critères présentés dans ce tableau est bien entendu en partie arbitraire étant donné qu'aucun processus de négociation n'a été réalisé dans cette phase pilote de l'étude pour déterminer les poids respectifs à attribuer aux différents critères sélectionnés.

0.5 Conclusions

L'étude présentée dans ce rapport n'avait pas pour ambition de fournir un classement définitif des différentes filières de production d'électricité en fonction d'un quelconque "indice de mérite global", qui resterait d'ailleurs à définir. Il s'agissait plus modestement de réaliser une première évaluation de la possibilité de prendre en compte aussi largement que possible l'ensemble des critères qui interviennent (ou peuvent intervenir) dans les décisions concernant le développement du secteur de production d'électricité, en associant à ce processus décisionnel des personnalités de formations et de sensibilités diverses.

Il faut par conséquent considérer que les critères sélectionnés dans le cadre de cette étude et les valeurs qui leur ont été attribuées n'ont pas un caractère définitif mais plutôt celui d'une première ébauche qui devrait encore être affinée dans le cadre d'un travail plus ambitieux et de plus longue haleine.

S'il fallait résumer les enseignements que l'on peut déjà tirer de cette étude pilote, on pourrait dire qu'une analyse comparative complète et détaillée permet dans bien des cas de relativiser certaines idées préconçues sur les risques et impacts respectifs des différentes filières de production d'électricité. Le public en particulier a en effet une vision souvent partielle et faussée de ces problèmes; cela provient entre autre de la publicité faite à certains accidents, certes spectaculaires, mais faisant finalement beaucoup moins de victimes cumulées ou de dégâts que des accidents plus familiers et plus routiniers auxquels on ne prête plus guère attention, ainsi que de la tendance à ne prendre pour base de comparaison de différentes options énergétiques qu'une partie seulement des filières énergétiques en question (ce qui permet par exemple de qualifier de "propres" et "sans risque" les énergies solaire et éolienne, alors que ce n'est plus vrai lorsqu'on considère les risques et impacts associés à la production des importantes quantités de matériaux nécessaires à leur mise en oeuvre). Il faut être bien conscient qu'aucune énergie n'est exempte de risques; c'est le prix à payer pour éviter les conséquences plus désastreuses encore qu'entraînerait une pénurie d'énergie ou, en d'autres termes, le prix à payer pour éviter le risque découlant d'une politique de *refus du risque*!

0.6 Principales références bibliographiques

- (1) J. Simos: "Evaluer l'impact sur l'environnement, une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1990.
- (2) Rapport BP: "BP Statistical Review of World Energy", British Petroleum Company, Corporate Communications Services, 1990.
- (3) Rapport OCDE: "Electricité, énergie nucléaire et cycle du combustible dans les pays de l'OCDE, données principales", Agence pour l'Energie Nucléaire, OECD/OCDE, 1988.
- (4) Rapport OCDE: "Uranium, ressources, production et demande, mise à jour statistique", Agence pour l'Energie Nucléaire, OECD/OCDE, 1990.
- (5) CCE, CAEM, CEE, AIEA, BIRD, AIE, IIAAS, AEN/OCDE, PNUE, OMS, OMM: "Colloque d'experts de haut niveau sur l'électricité et l'environnement, Helsinki, 13-17 mai 1991, document de synthèse", Agence Internationale de l'Energie Atomique, Vienne, 1991.
- (6) U. Hauptmanns, W. Werner: "Engineering Risks", Evaluation and Valuation", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, London, Tokyo, Hong-Kong, Barcelona, 1987.
- (7) J. Devooght: "Méthodologie de l'analyse du risque associé aux différentes formes d'énergie", EPE, Vol. XVII, n° 2, 1982.
- (8) H. Inhaber: "Risk of Energy Production", Atomic Energy Control Board Rep., AECB 119/REV-3, 4th. ed., Ottawa, 1980.
- (9) L. D. Hamilton: "Comparative Risks from Different Energy Systems, Evolution of the Methods of Studies", IAEA Bulletin - Vol. 22 No. 5/6, 1980.
- (10) Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique: "Effets atmosphériques de la production thermique à base de combustibles", Congrès d'e Bruxelles, 6-11 juin 1982.
- (11) Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique: "Acceptation et risques comparés des différentes sources d'énergie", Congrès d'Athènes, 9-14 juin 1985.
- (12) P. Suter: "Energie et environnement", Bulletin ASE/UCS, 81-2, 1990.

- (13) J.-F. Dupont: "Test comparatif des moyens de production d'électricité", OFEL, cours pour cadres, octobre 1989.
- (14) American Medical Association: "Rapport du Conseil des affaires scientifiques de l'American Medical Association sur les aspects sanitaires de l'énergie nucléaire", AMA, CSA G (I-88), 1988.
- (15) OCDE/OECD: "Incidences sur l'environnement des énergies renouvelables, le projet COMPASS de l'OCDE", Paris, 1988.

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Les lignes qui suivent, extraites du document de synthèse du "Colloque d'experts de haut niveau sur l'électricité et l'environnement", Helsinki, mai 1991, situent parfaitement le contexte de la présente étude, confiée au Laboratoire de systèmes énergétiques (LASEN) de l'EPFL par les entreprises électriques de Suisse romande:

*"La planification du secteur de l'électricité s'inscrit dans une stratégie énergétique générale et, au-delà, dans un processus de planification économique globale. Elle fait intervenir de **multiples critères** et vise des **objectifs généraux** tels que le bien-être social, l'efficacité économique, la sécurité des approvisionnements, la protection de la santé et de l'environnement. Ces objectifs devraient être traités dans un **cadre intégré**, par des modèles et des instruments qui cherchent des solutions **assurant un niveau homogène de satisfaction des différents objectifs...***

*... La participation effective de tous les acteurs concernés - citoyens, consommateurs commerciaux et industriels, compagnies d'électricité, autorités locales, nationales ou internationales - **est nécessaire** pour que tous les objectifs soient pris en considération. Elle est indispensable pour l'obtention d'un soutien social en faveur de l'application des politiques choisies. Il ne faudrait pas cependant qu'elle se traduise par une abrogation des responsabilités des décideurs...*

*... Cela suppose des approches et des processus décisionnels à **plusieurs niveaux et à acteurs multiples.**"*

Les aspects techniques et financiers, qui ont traditionnellement été les critères dominants sinon uniques dans les choix opérés entre différentes options énergétiques, ne suffisent par conséquent plus aujourd'hui à faire accepter à eux seuls de nouveaux projets. La vocation de service public des entreprises électriques leur fait d'autre part une obligation de tenir compte des aspirations de leurs clients, à la fois consommateurs et citoyens. En effet, ce sont souvent eux qui décident du sort final de la plupart des projets dans notre système de démocratie directe.

La présente étude a précisément pour objectif d'évaluer de manière objective les mérites respectifs des différentes filières de production d'électricité pouvant entrer en ligne de compte pour notre pays, en se référant à un ensemble de critères qui se veulent aussi représentatifs que possible de l'intérêt général. Il ne s'agit pour l'instant que d'une **étude pilote**, destinée essentiellement à montrer la faisabilité et l'intérêt d'une telle approche et à constituer une base de référence pour des développements plus ambitieux.

1.2 Méthodologie

Pour remplir les objectifs ci-dessus, cette étude a été conçue dans une optique à la fois **multicritère** et **multiacteurs** (ou multidécideurs). L'approche multicritère consiste à établir une matrice à deux dimensions. La première dimension est donnée par un série de variantes, représentant dans notre cas les différentes filières de production d'électricité caractérisées en particulier par l'agent énergétique primaire utilisé (charbon, pétrole, gaz, nucléaire, hydraulique, solaire, vent). Les critères d'évaluation sélectionnés constituent la seconde dimension.

En ce qui concerne précisément la sélection des critères d'évaluation, nous sommes partis du principe:

- 1°) que les critères devaient fondamentalement refléter les **valeurs de la société** et
- 2°) que les **évaluations retenues** ne pouvaient pas être légitimées par les seuls experts techniques mais qu'elles devaient l'être par l'**ensemble de la société**.

Pour cela, un **groupe d'experts** (voir Annexe A) a été constitué, dont une partie des membres étaient de formation non technique; ce groupe avait pour mission de suivre le déroulement de cette étude et de se prononcer sur l'approche utilisée et les résultats obtenus.

On a ainsi pu établir un **dialogue** entre "techniciens" et, disons, "humanistes" sur le choix des valeurs ainsi que sur la sélection et l'évaluation des critères à associer à ces valeurs pour les besoins de l'analyse. Ce dialogue est un élément essentiel de l'étude. Il constitue une approche, modeste peut-être, mais décisive vers une analyse qui ne soit effectivement pas seulement multicritère mais aussi multidécideurs.

2. DESCRIPTION DES FILIERES

2.1 Définition de la notion de "filière de production d'électricité"

L'électricité est une forme d'énergie **intermédiaire**, ce qui signifie qu'elle n'est pas tirée directement de la nature. L'électricité provient de la transformation de différentes énergies **primaires** (charbon, pétrole, gaz, énergie nucléaire, énergie hydraulique, etc) par des techniques appropriées. Le processus de génération d'électricité est bien connu depuis des lustres et il existe aujourd'hui de nombreuses techniques éprouvées pour produire cette énergie intermédiaire. Les préoccupations concernant l'accessibilité à certaines ressources et la protection de l'environnement ont d'autre part conduit ces dernières décennies au développement et à la mise en oeuvre d'une nouvelle génération de techniques, dont certaines sont réellement nouvelles et d'autres des adaptations de systèmes plus anciens. L'offre de systèmes entre lesquels les milieux producteurs peuvent choisir est donc a priori très vaste.

Partant d'une énergie primaire donnée, toute une chaîne d'installations techniques diverses est nécessaire pour générer l'énergie électrique désirée d'une part et maîtriser les différentes étapes du **cycle du combustible** (de l'extraction ou du captage de l'énergie primaire jusqu'à la gestion des déchets) d'autre part. Nous définirons une "filière" comme étant l'ensemble des installations techniques d'une telle chaîne associées à un agent énergétique (énergie primaire) donné et un système de production d'électricité particulier (chaudière, turbine à gaz, réacteur nucléaire, turbine hydraulique, cellules photovoltaïques, éolienne, etc).

2.2 Recensement des filières envisageables

Un premier recensement des filières à disposition (ou susceptibles de le devenir dans un futur plus ou moins proche) pour produire de l'électricité a permis d'établir la liste donnée dans les deux pages suivantes; on y a également fait figurer les gammes de puissances types de ces différentes filières.

Agent énergétique: charbon

- . Centrales thermiques conventionnelles de grande puissance, 300 - 800 MWe (mégawatts électriques).
- . Centrales industrielles conventionnelles et à lit fluidisé (LFA, LFC, LFP)¹, quelques MWe - 100 MWe.
- . Centrales avec gazéification, 100 - 750 MWe.
- . Centrales à cycle combiné gaz/vapeur, 300 - 600 MWe.

Agent énergétique: pétrole

- . Centrales thermiques conventionnelles, 300 - 800 MWe.
- . Centrales industrielles, quelques MWe - 100 MWe.
- . Centrales à cycle combiné gaz/vapeur, 300 - 600 MWe.
- . Moteurs diesel, 0,1 - 25 MWe.

Agent énergétique: gaz naturel

- . Centrales thermiques conventionnelles, 300 - 800 MWe.
- . Centrales à cycle combiné gaz/vapeur, 14 - 900 MWe.
- . Turbines à gaz, 5 - 50 MWe.
- . Moteurs à gaz, 0,5 - 30 MWe.
- . Turbines/Moteurs de détente, 0,5 - 5 MWe.
- . Piles à combustible, 1 - 10 MWe.

Agent énergétique: combustible nucléaire**- Fission**

- . Réacteurs à eau légère, 300 - 1200 MWe.
- . Réacteurs à haute température, 300 - 900 MWe.
- . Surgénérateurs, 1200 MWe.

- Fusion

¹ LFA : lit fluidisé à pression atmosphérique

LFC : lit fluidisé circulant

LFP : lit fluidisé sous pression

Agent énergétique: eau chaude naturelle sous pression

- . Forages thermiques, 50 kW_e - 1MWe.
- . Sondes thermiques.

Agent énergétique: eau (énergie hydraulique)

- . Centrales au fil de l'eau, 10 - 100 MWe.
- . Centrales à bassin d'accumulation, 1 - 400 MWe.
- . Micro-, mini-centrales, 10kWe - 10MWe.

Agent énergétique: force marémotrice

- . Usines marémotrices.

Agent énergétique: vent

- . Eoliennes de petites, moyennes et grandes puissances, 10 kW_e - 1MWe.

Agent énergétique: rayonnement solaire

- . Centrales héliothermiques, 1 - 30 MWe.
- . Installations à cellules photovoltaïques, 1 - 500 kW_e.

Agent énergétique: déchets

- . Centre d'incinération des ordures et déchets spéciaux, 1 - 20 MWe.

Agent énergétique: biomasse

- . Centrales bois, < 100 kW_e.
- . Centrales biogaz, <150 kW_e.
- . Moteurs à alcool.

2.3 Description des filières sélectionnées

De la liste précédente, n'ont été retenues que les filières dont il est raisonnablement possible d'envisager l'implantation en Suisse à l'horizon de temps considéré (une quinzaine d'années). Dans ce processus de sélection, il a été admis en particulier que seules les filières qui sont actuellement au moins au stade de la démonstration ont une chance réelle de s'introduire sur le marché dans un délai aussi rapproché étant donné la durée de gestation de nouvelles techniques. Une brève description de chacune des filières retenues est proposée dans la suite de ce paragraphe.

Agent énergétique: "Charbon"

- Généralités sur les centrales thermiques:

Les centrales thermiques sont des installations convertissant l'énergie chimique contenue dans le combustible en énergie électrique à l'aide de processus thermiques. L'équipement et les sous-systèmes qui les constituent assurent: le convoyage du combustible à la centrale, la conversion de l'énergie chimique en chaleur, la transformation de la chaleur en énergie électrique, le rejet des déchets de combustion, le rejet des pertes de chaleur, la livraison de l'énergie électrique au réseau.

Filière : "Centrales thermiques traditionnelles de grande puissance"

- Description:

Les unités envisagées sous cette rubrique sont les centrales thermiques traditionnelles utilisant le charbon comme combustible. Le foyer des chaudières de chaque unité fonctionne au charbon pulvérisé. La chaleur dégagée est utilisée pour produire de la vapeur surchauffée qui alimente des turbines à vapeur. L'utilisation du charbon engendre des déchets plus ou moins polluants qu'il faut ensuite traiter, neutraliser, récupérer ou recycler.

- Schéma type d'une installation:

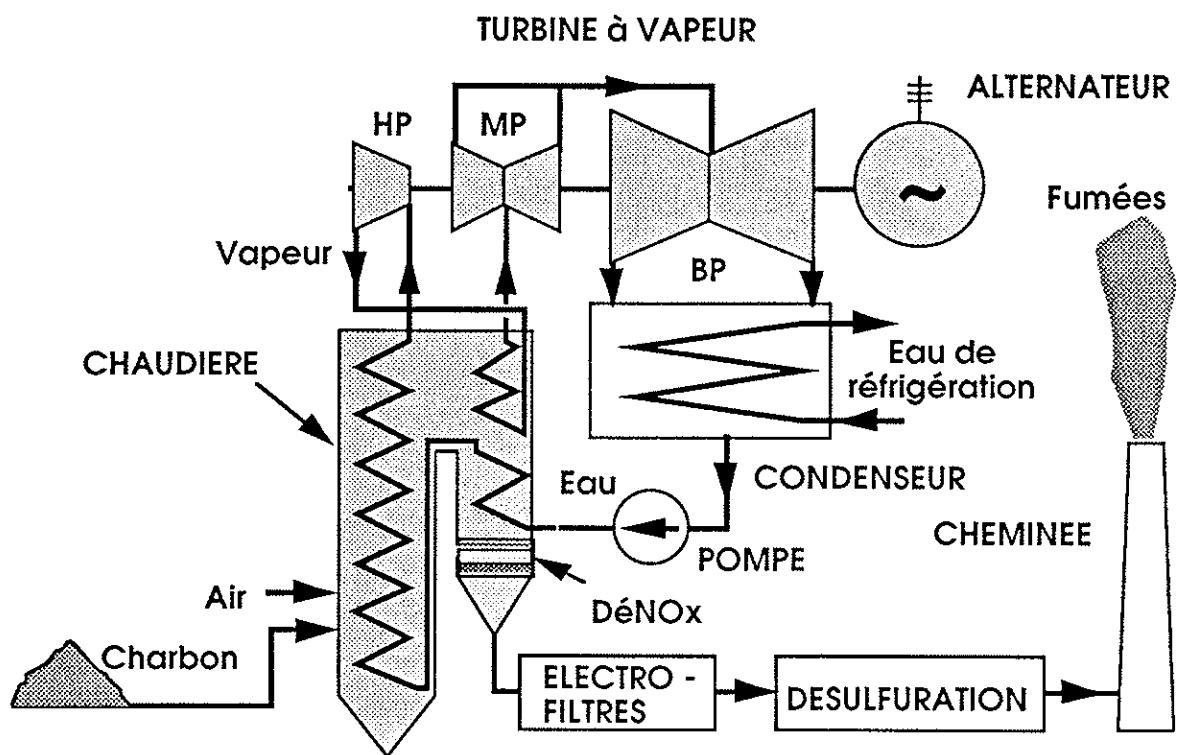


Fig. 2.3.1 Centrale thermique de grande puissance (charbon)

Filière : "Centrales industrielles et/ou centrales à lit fluidisé (atmosphérique, circulant ou sous pression)"

- Description:

Il s'agit d'unités utilisées dans les industries:

- qui ont à disposition un combustible à brûler résultant de l'incinération de déchets industriels.
- qui utilisent simultanément de grandes quantités de chaleur et d'électricité (industries chimiques, raffineries, sucreries, etc).

Ces installations sont spécialement conçues pour la production combinée de chaleur et d'électricité. Elles sont semblables aux installations décrites dans la section précédente avec en plus un prélèvement de chaleur pour des besoins de chauffage.

Certaines centrales industrielles utilisent la technique du lit fluidisé: lit fluidisé atmosphérique, lit fluidisé circulant, lit fluidisé sous pression. Le principe de combustion diffère de celui des centrales traditionnelles: dans le foyer des centrales à lit fluidisé, le charbon, mélangé avec des particules de fine granulation de calcaire ou de chaux et de cendres, est brûlé en état flottant. Les particules fluidisées se comportent comme dans un liquide en ébullition; leur brassage assure une combustion et un échange de chaleur très efficaces.

Ces installations présentent les caractéristiques suivantes:

- 1) le calcaire mélangé au charbon permet de retenir une grande partie des gaz sulfureux;
- 2) ce type de foyer fonctionne à des températures moins élevées ce qui permet de limiter la production des oxydes d'azote.

- Schéma type d'une installation:

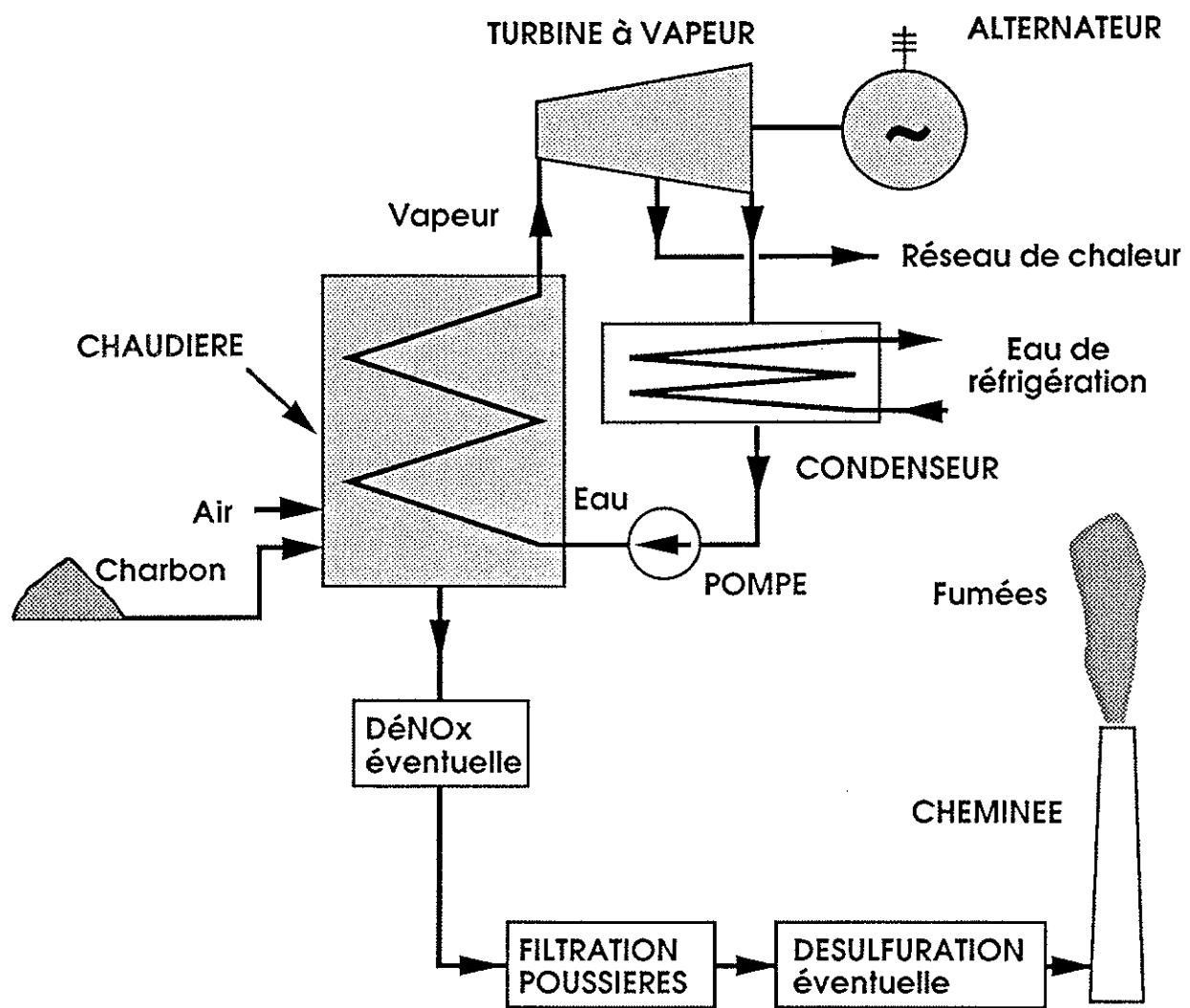


Fig. 2.3.2 Centrale thermique industrielle (charbon)

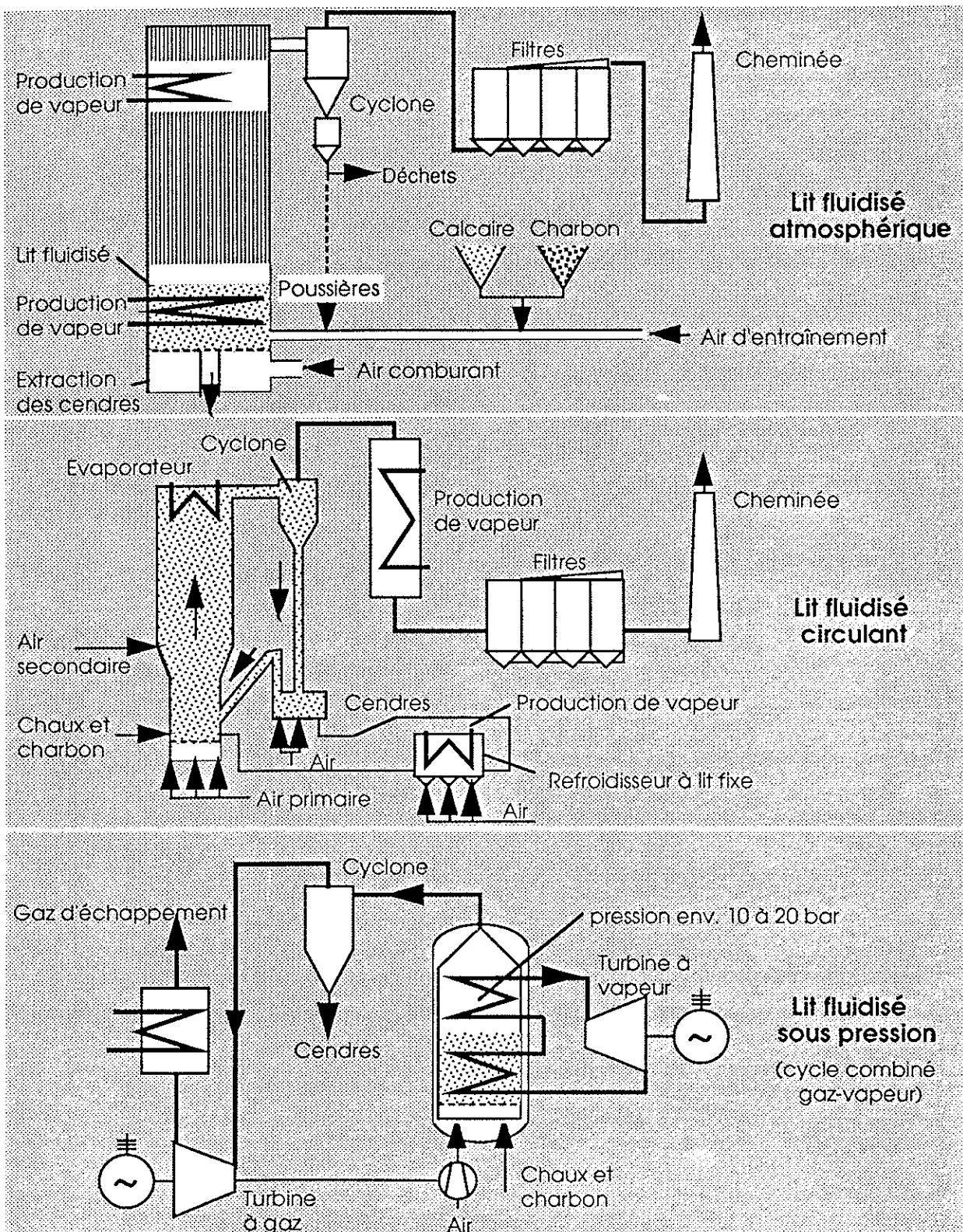


Fig. 2.3.3 Centrales industrielles avec chaudières à lits fluidisés

Filière : "Centrales avec gazéification du charbon"

- Description:

La gazéification consiste à transformer et épurer le charbon pour produire un gaz combustible propre et plus facilement utilisable. Le gaz combustible ainsi libéré est composé essentiellement de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le gaz refroidi, débarrassé à sa production des particules en suspension et du soufre qu'il contient, est brûlé pour alimenter des turbines à gaz puis les chaudières de récupération dans des centrales combinées gaz-vapeur (le rendement plus élevé de l'installation permet de couvrir les frais de gazéification). Des recherches sont en cours pour gazéifier directement le charbon dans son filon et éviter ainsi les problèmes liés à l'extraction de ce combustible. Il existe différents procédés de gazéification.

- Schéma type d'une installation:

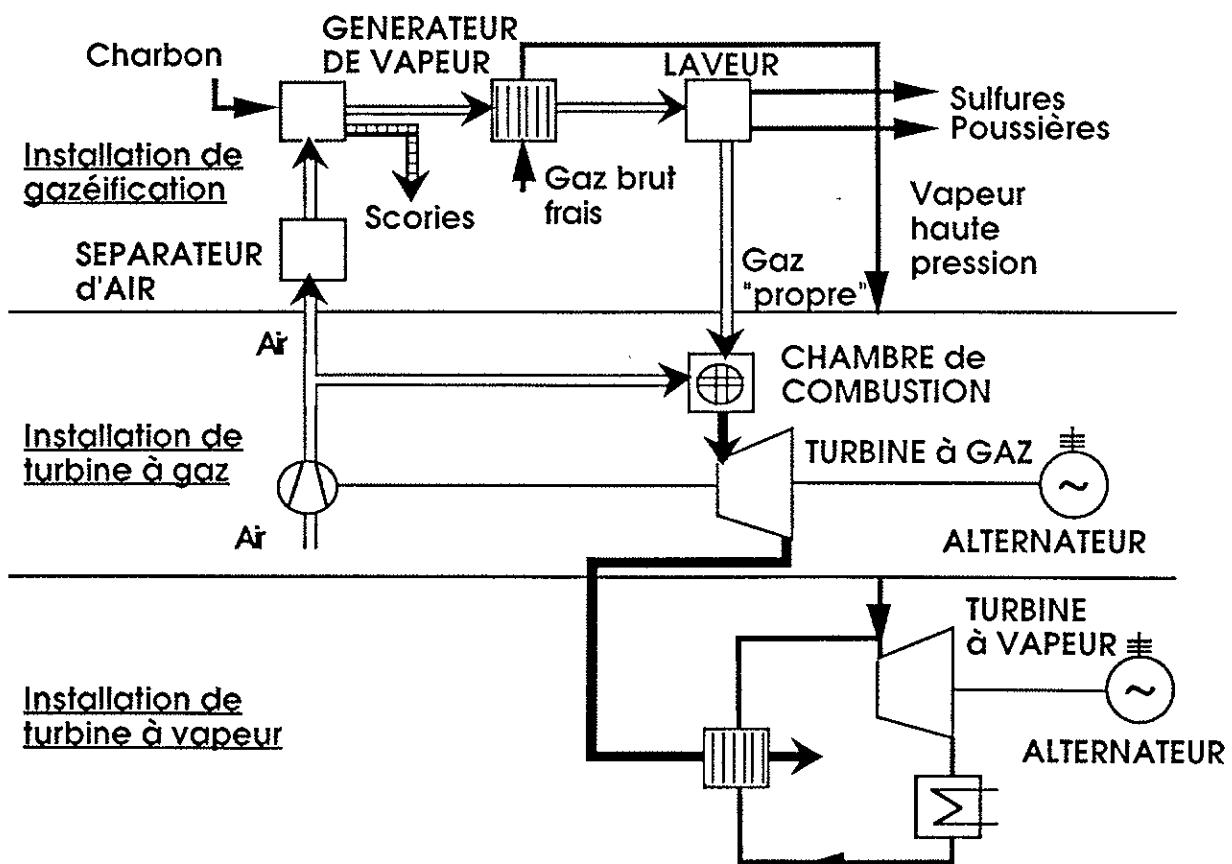


Fig. 2.3.4 Installation avec gazéification du charbon

Agent énergétique: "Pétrole"

Filière : "Centrales thermiques traditionnelles de grande puissance"

- Description:

Par rapport aux centrales du même type au charbon, les principales différences sont:

- pas de dépoussiérage des fumées (moins de poussières que pour le charbon);
- la "déNOx" peut être supprimée si l'on arrive à limiter la production de NOx à la combustion.

- Schéma type d'une installation:

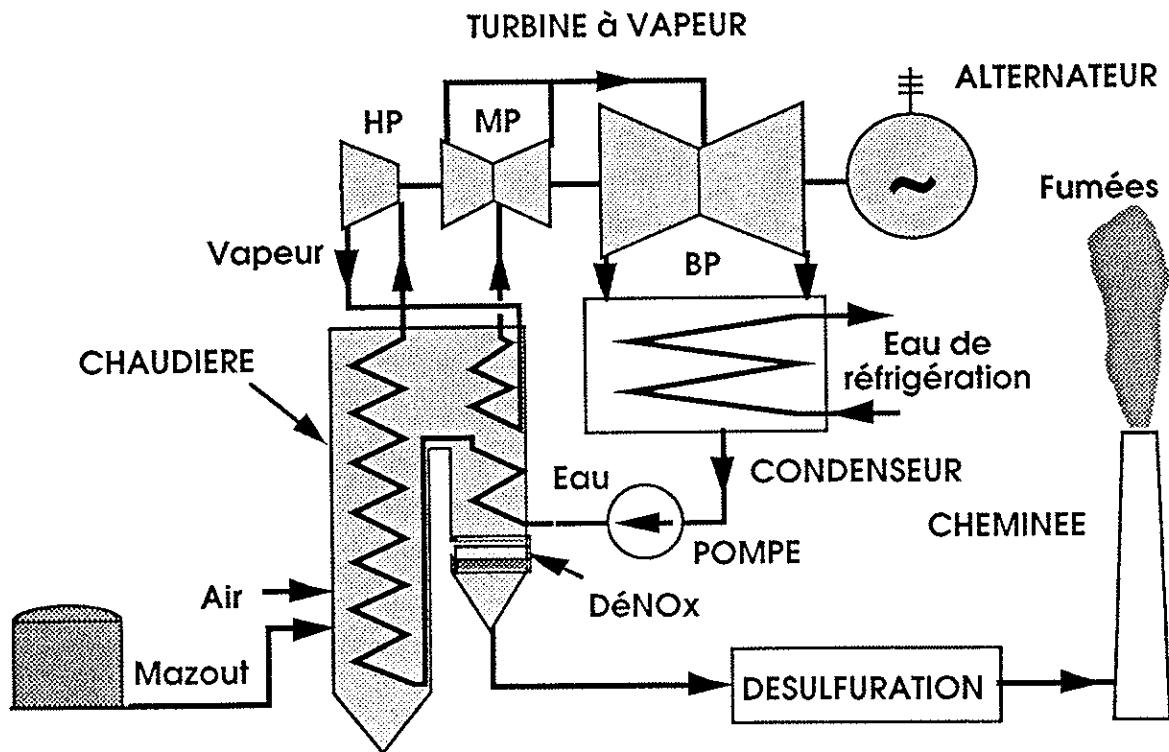


Fig. 2.3.5 Centrale thermique de grande puissance (Pétrole)

Filière : "Centrales industrielles"

- Description:

Ce type d'installation utilise les mêmes éléments que les centrales industrielles au charbon, à ceci près que la désulfuration n'est pas toujours obligatoire et qu'il est plus facile de limiter la production de NOx à la combustion.

- Schéma type d'une installation:

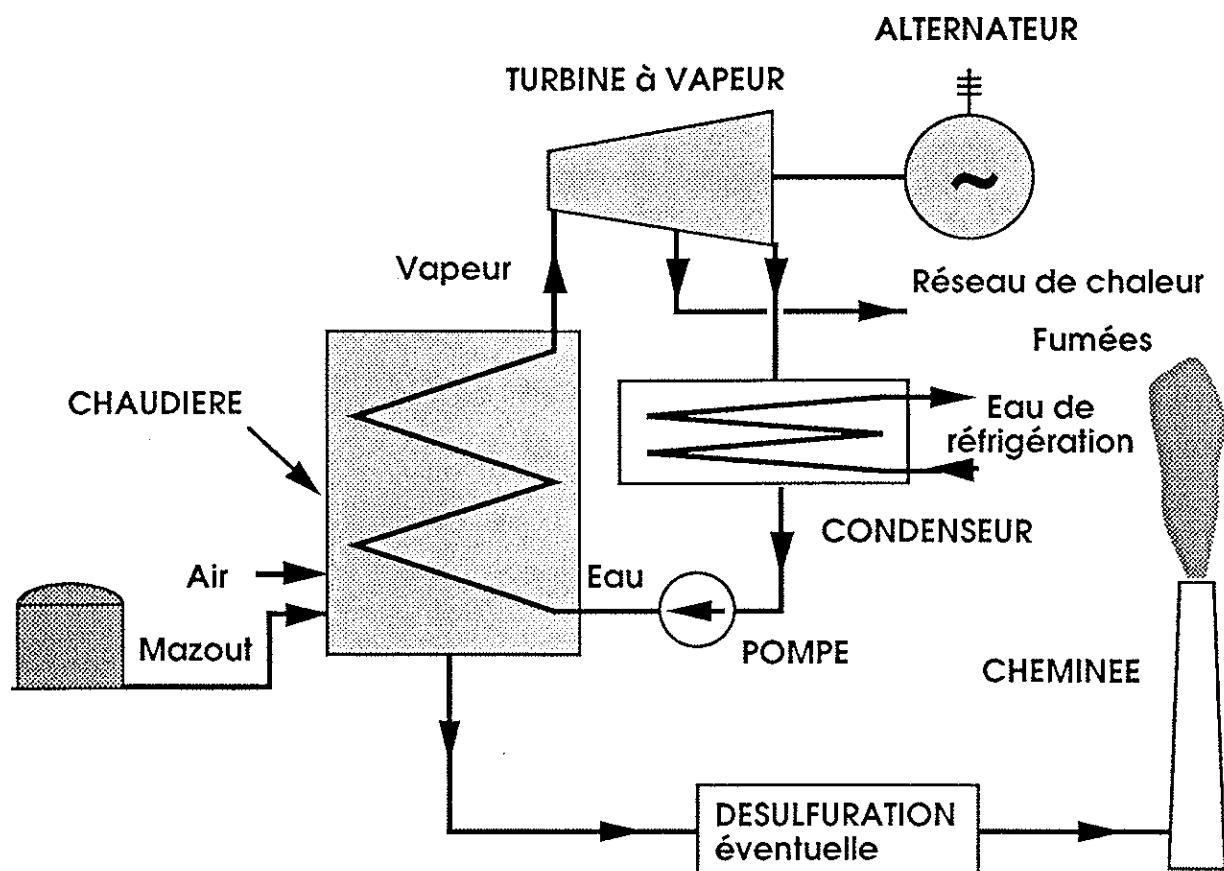


Fig 2.3.6 Centrale thermique industrielle (pétrole)

Filière : "Moteurs Diesel"

- Description:

Le combustible brûlé dans la chambre de combustion libère l'énergie chimique qu'il contient. L'énergie mécanique obtenue (moteur) sert à actionner une génératrice qui fournit l'énergie électrique désirée. La chaleur des gaz d'échappement et celle emmagasinée par le système de refroidissement du moteur peuvent être utilisées pour le chauffage; il s'agit dans ce cas de petites centrales, ou groupes, chaleur/force.

- Schéma type d'une installation:

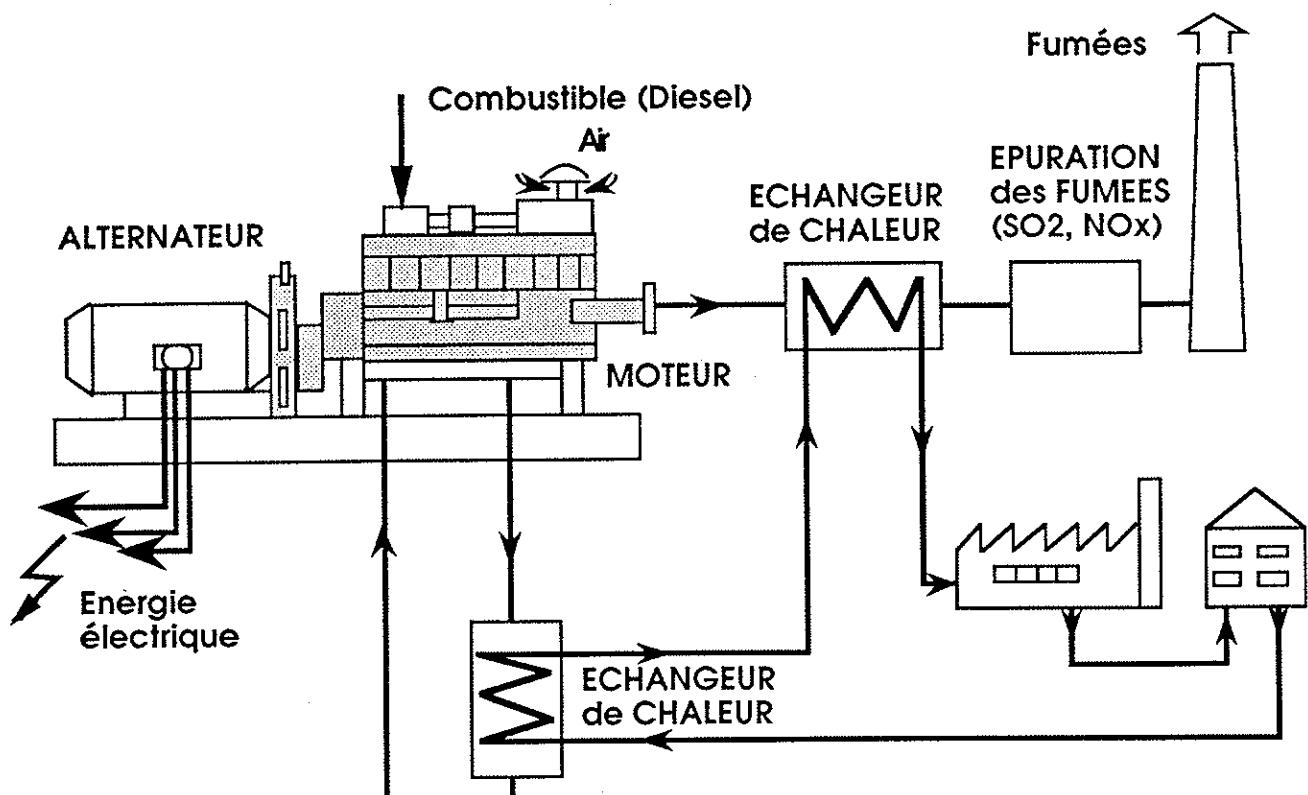


Fig. 2.3.7 Groupe chaleur/force fonctionnant au Diesel

Agent énergétique: "Gaz naturel"

Filière : "Centrales thermiques traditionnelles"

- Description:

Les éléments principaux de ce type d'installation reprennent ceux des centrales thermiques traditionnelles au charbon ou au fuel avec les particularités suivantes:

- le gaz ne peut pas être facilement stocké, sa liquéfaction entraîne des coûts de stockage élevés;
- la combustion du gaz est beaucoup moins polluante que celle du charbon ou du pétrole, désulfuration et dénitrification ne sont pas nécessaires.

- Schéma type d'une installation:

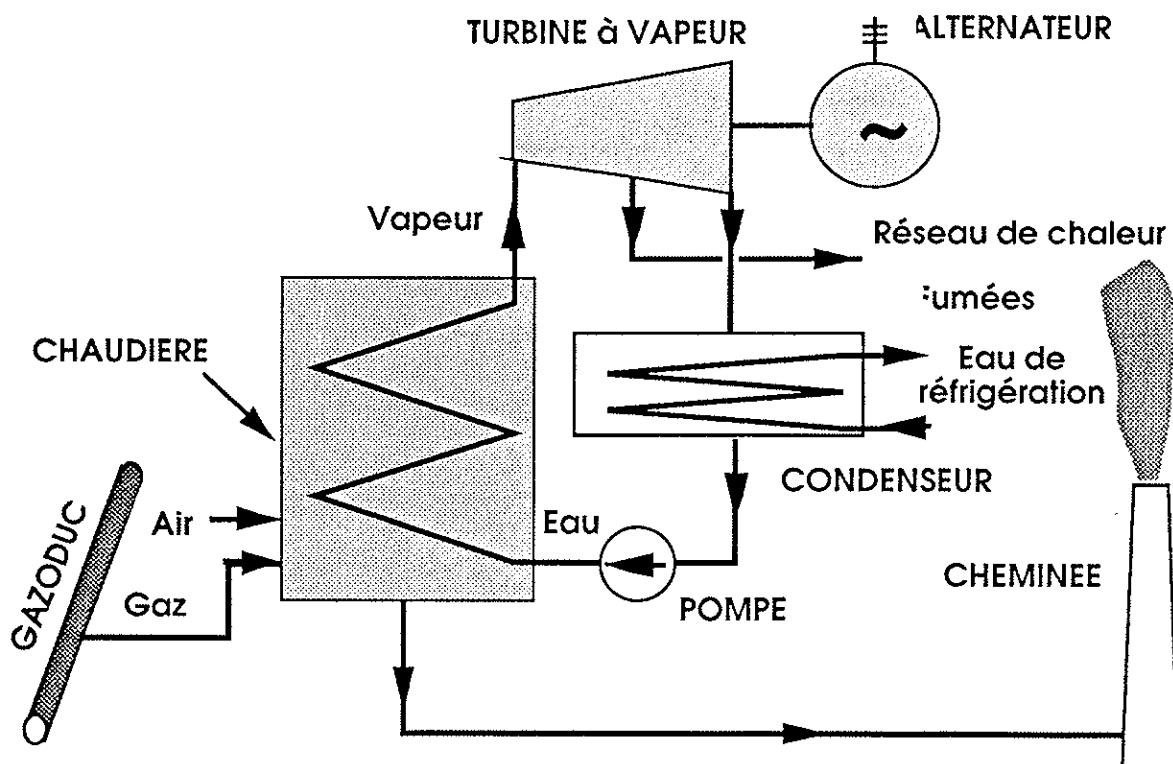


Fig. 2.3.8 Centrale thermique traditionnelle (gaz)

Filière : "Centrales combinées gaz/vapeur"

- Description:

On désigne sous ce nom des installations basées sur le couplage de turbines à gaz et de turbines à vapeur. Un cycle gaz est combiné à un cycle vapeur afin d'améliorer l'efficacité thermodynamique. Les rejets de chaleur se font à une température plus proche de la température ambiante. Le premier cycle (turbine à gaz) s'effectue à une température élevée et le second (turbine à vapeur) à plus basse température. Le lien entre le cycle de turbine à gaz et le cycle à vapeur est assuré par la chaudière de récupération. L'énergie thermique est ainsi valorisée en cascade, chaque cycle permettant une conversion adaptée à sa tranche de température ce qui permet d'atteindre un rendement exergétique élevé.

- Schéma type d'une installation:

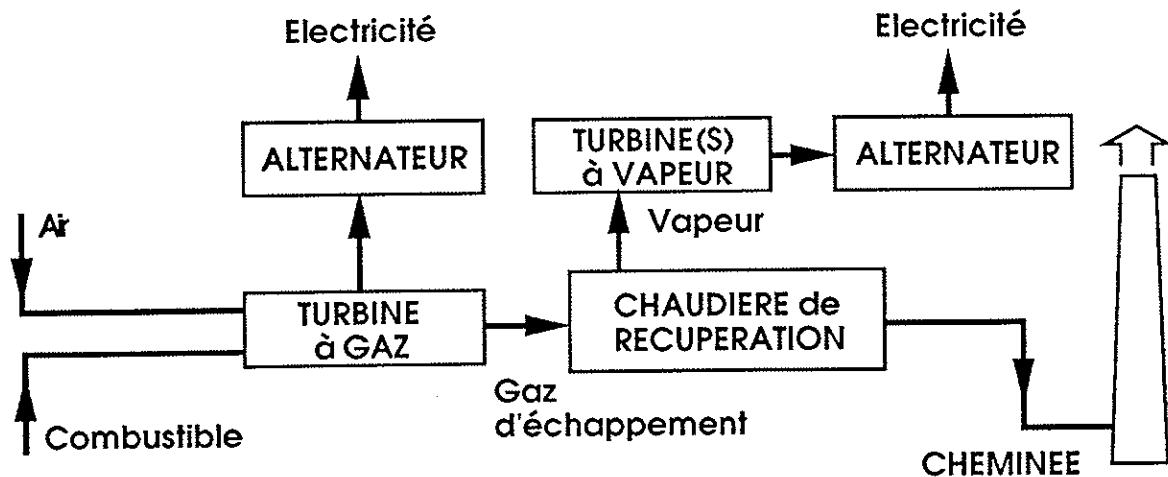


Fig. 2.3.9 Principe d'une installation utilisant un cycle combiné gaz/vapeur

Filière : "Turbines à gaz"

- Description:

Les turbines à gaz utilisent le gaz, le pétrole brut, ou le mazout comme combustible. Ces installations transforment directement l'énergie thermique provenant de la combustion en énergie mécanique au moyen d'une turbine à gaz couplée à l'alternateur qui produit l'électricité. Ces turbines existent sous forme de petites unités; elles ont de plus en plus tendance à disparaître, car il est plus avantageux d'utiliser des centrales combinées gaz-vapeur.

- Schéma type d'une installation:

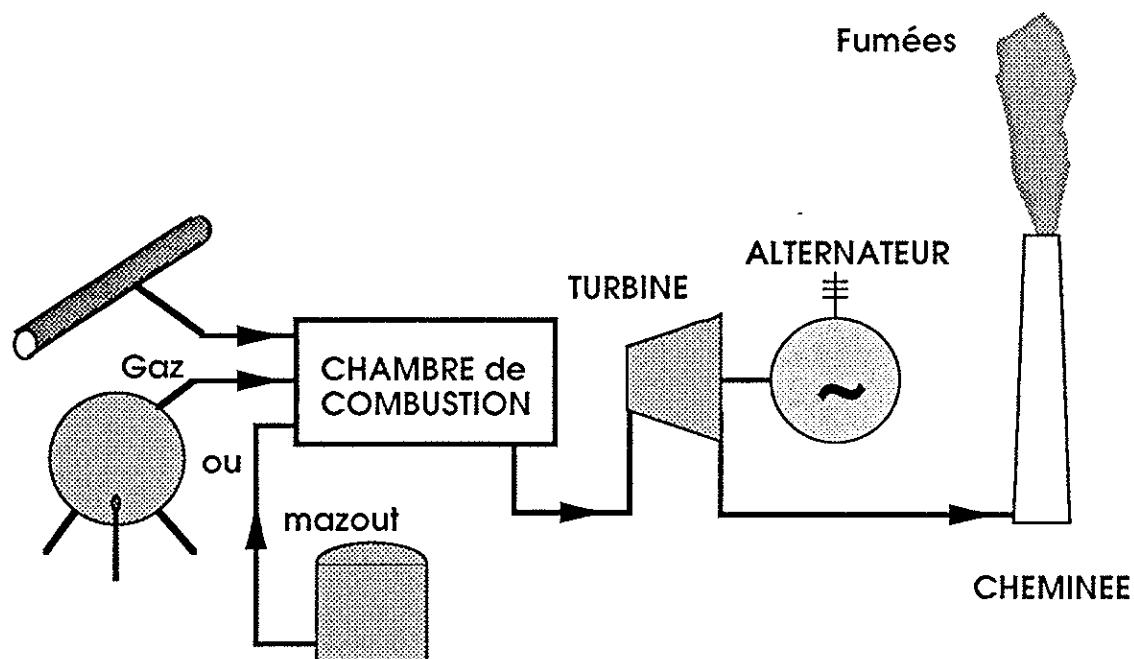


Fig. 2.3.10 Turbine à gaz

Filière : "Moteurs à gaz"

- Description:

Les moteurs à gaz fonctionnent selon le cycle d'Otto qui permet d'avoir des facteurs d'air très proches du facteur de combustion stoechiométrique.

Cette caractéristique permet l'utilisation de catalyseur simple (à trois voies par exemple) qui fonctionnent bien en présence simultanée de CO et de NOx.

- Schéma type d'une installation:

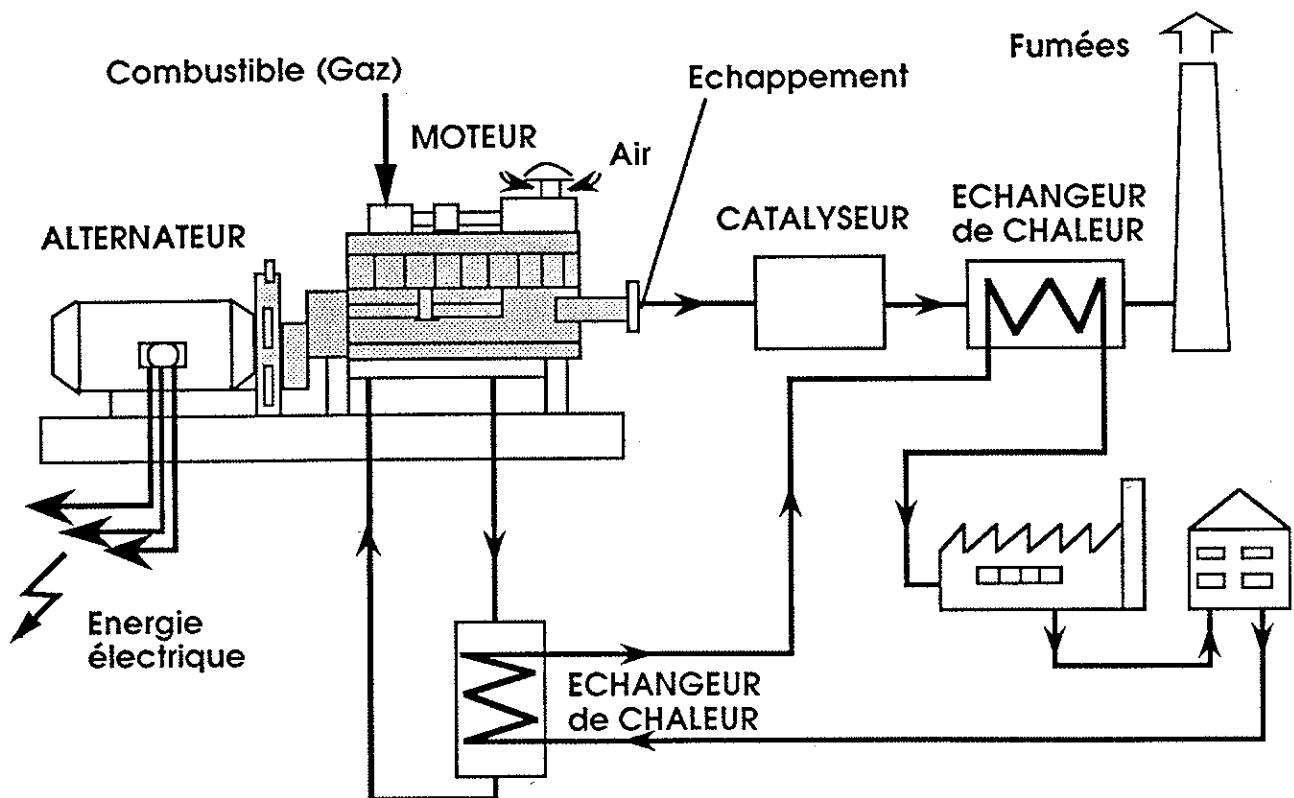


Fig. 2.3.11 Groupe chaleur/force fonctionnant au gaz naturel

Filière : "Turbines/moteurs de détente"

- Description:

Ces installations sont utilisées en différents points de prélèvement des réseaux de transport et de distribution de gaz naturel à haute pression. Elles interviennent lors de la dépressurisation du gaz qui doit alimenter le réseau de distribution à basse pression. La récupération de l'énergie de détente dans une turbine à gaz permet de produire de l'électricité. Ces installations atteignent des puissances électriques de l'ordre de 250-400 kWe.

- Schéma type d'une installation:

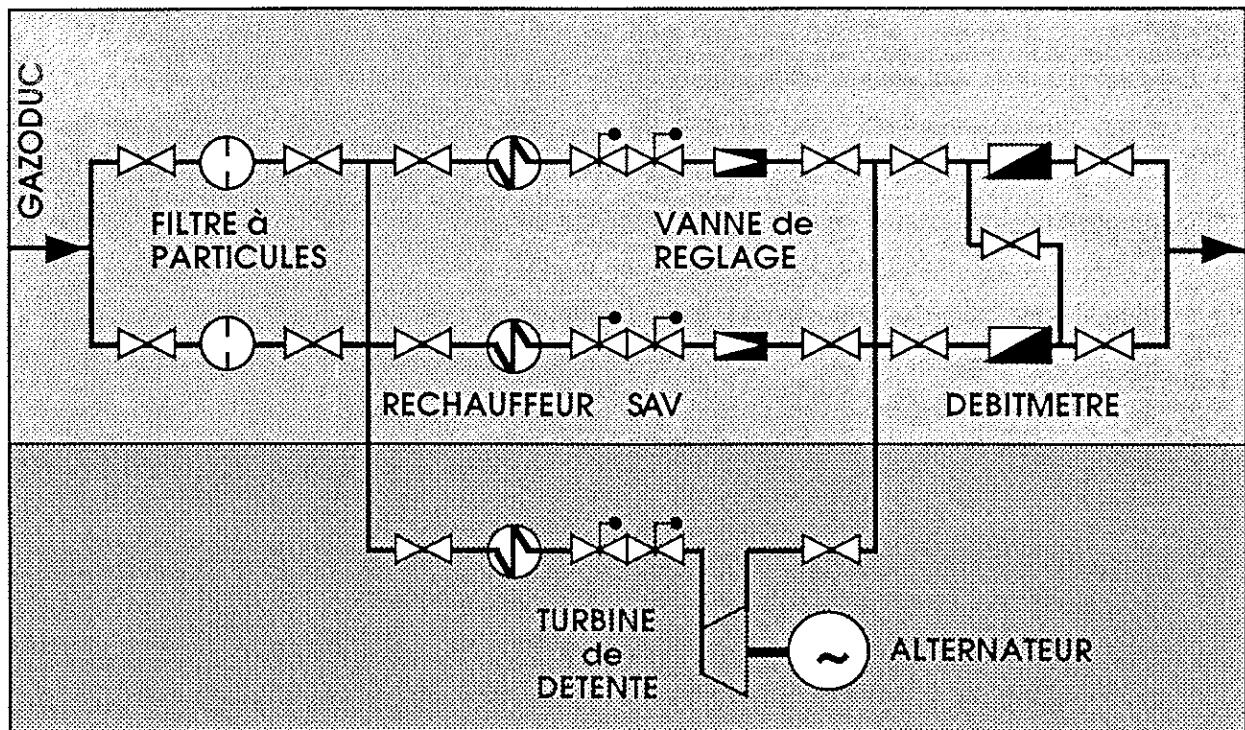


Fig. 2.3.12 Station de réglage de pression de réseau avec utilisation d'une turbine de détente

Filière : "Piles à combustibles"

- Description:

Les piles à combustibles sont des appareils qui convertissent l'énergie d'une réaction chimique (combustible) directement en énergie électrique. La conversion met en jeu un procédé électrochimique comparable à une électrolyse inversée.

Une pile à combustibles est constituée:

- d'une électrode positive (réceptrice d'électrons du circuit extérieur) où l'oxydant agit;
- d'une électrode négative (donc émettrice d'électrons vers le circuit extérieur) où le combustible réagit (anode);
- d'un électrolyte permettant le transport des ions en phase liquide ou solide.

L'énergie "chimiquement" disponible dans le combustible est convertie dans la pile, avec éventuellement une postcombustion complémentaire. La réaction aux électrodes se produisant jusqu'à l'équilibre, cette dernière n'est pas complète. Pour améliorer la rentabilité de la réaction, la température est maintenue la plus uniforme possible: préchauffage de l'oxydant et du combustible, soutirage de chaleur, etc. La pureté des électrodes, de l'oxydant, du combustible et de l'électrolyte est essentielle. Suivant le type d'électrolyte choisi, on distingue plusieurs catégories de piles: PEFC (polymère), AFC (alcalin), PAFC (acide phosphorique), MCFC (carbonates fondus) et SOFC (oxydes solides).

Une pile constitue un système ouvert, continuellement alimenté en réactifs chimiques (combustible, oxygène, agent oxydant). Les piles à combustibles peuvent utiliser différents combustibles, y compris le gaz naturel et l'hydrogène. La chaleur émise peut être récupérée et mise à disposition de consommateurs. Etant donné ces avantages - haute efficacité énergétique, diversité d'approvisionnement en combustible et récupération de la chaleur émise - les piles à combustibles offrent un potentiel important d'économies et de réduction des impacts sur l'environnement. Certains types de piles à combustible, notamment les piles à acide phosphorique, sont d'ores et déjà opérationnelles (les SI de Genève vont mettre en service prochainement une installation de ce type d'une puissance de 200 kWe).

- Schéma type d'une installation:

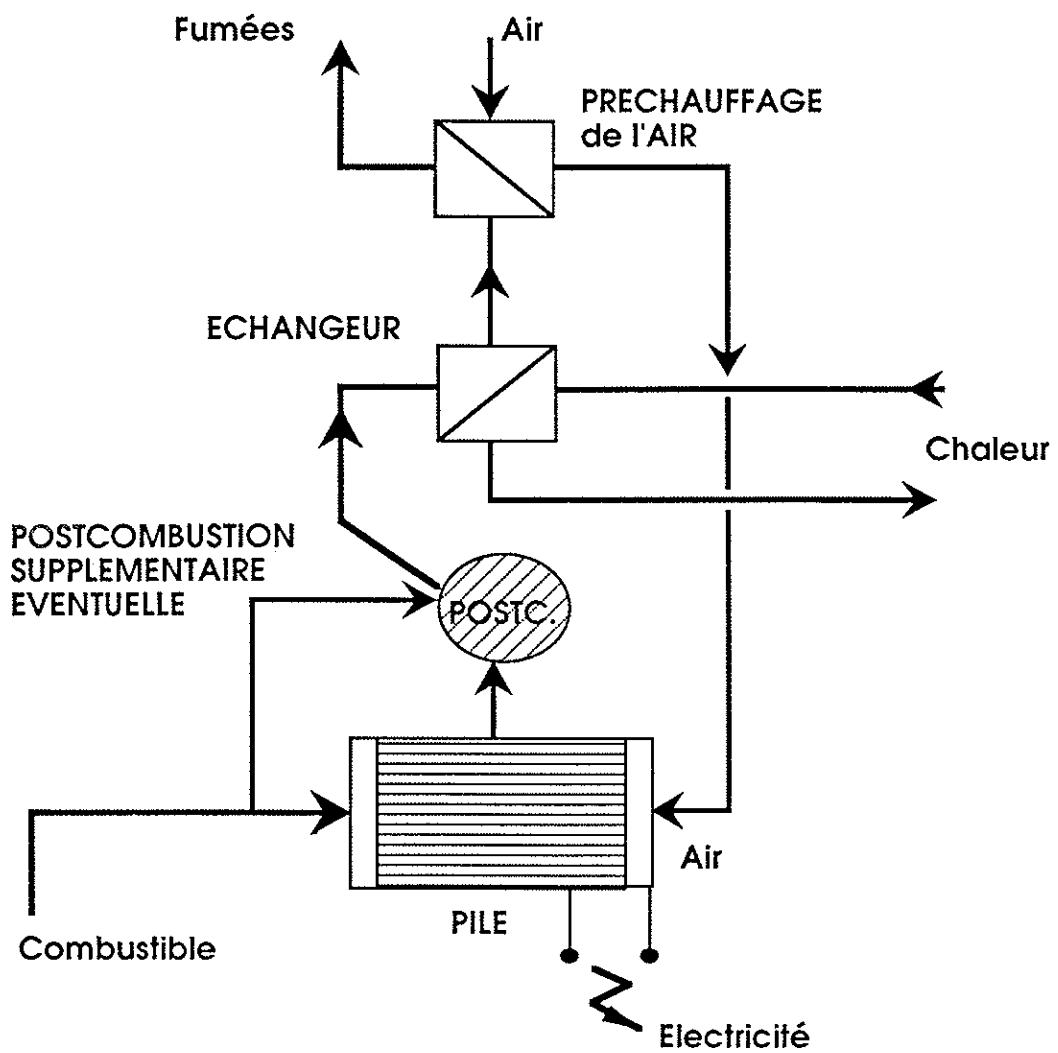


Fig 2.3.13 Schéma d'un module de pile à combustibles

Agent énergétique: "Combustibles nucléaires"

Les schémas décrivant ci-après les filières nucléaires utilisent les notations et symboles suivants:

1	Coeur du réacteur		Eau légère/Vapeur
2	Générateur de vapeur		
3	Turbine		Gaz (He)
4	Condenseur		
5	Générateur		Graphite
6	Pompe		
7	Ventilateur		
8	Séparateur de vapeur		Sodium liquide

Filière : "Réacteurs à eau légère (LWR)"

Plus de 85% des réacteurs nucléaires actuellement en service dans le monde appartiennent à la famille des réacteurs à eau légère. Dans ce type de réacteurs, l'eau légère est utilisée à la fois comme modérateur et comme caloporteur. On distingue deux types ("sous-filières") de réacteurs à eau légère: dans les **réacteurs à eau pressurisée** (PWR), la pression imposée au caloporteur dans le coeur du réacteur est choisie de manière à prévenir toute ébullition (la vapeur est produite dans des générateurs de vapeur externes) alors que dans les **réacteurs à eau bouillante** (BWR) une pression moins élevée autorise la formation de vapeur dans la cuve même du réacteur.

L'expérience d'exploitation généralement bonne obtenue avec les réacteurs à eau légère actuels fournit une bonne base pour la mise au point d'une nouvelle génération d'installations de ce type, que l'on désigne par le terme de réacteurs avancés. Ces filières avancées, qui devraient être mises en oeuvre dans les prochaines décennies, comportent des améliorations dans les techniques et les procédures de conduite, de meilleurs taux de combustion et performance du combustible, un recours plus systématique à des techniques de sécurité passive, une meilleure interface homme-machine et une plus grande normalisation des matériels. Ces réacteurs n'ayant néanmoins pas encore fait leurs preuves, on se basera dans cette étude essentiellement sur les performances des réacteurs actuels.

Réacteurs à eau pressurisée (PWR)

- **Description:**

Cette sous-filière est caractérisée par:

- l'existence de générateurs de vapeur extérieurs au cœur du réacteur (chaque boucle du circuit primaire - un réacteur en compte généralement trois ou quatre - est équipée d'un tel générateur);
- la présence d'un pressuriseur destiné à maintenir le niveau de pression nécessaire dans le circuit primaire et à permettre les variations de volume du fluide caloporteur;
- le fait que la salle des machines est située en zone non contrôlée.

- **Schéma type d'une installation:**

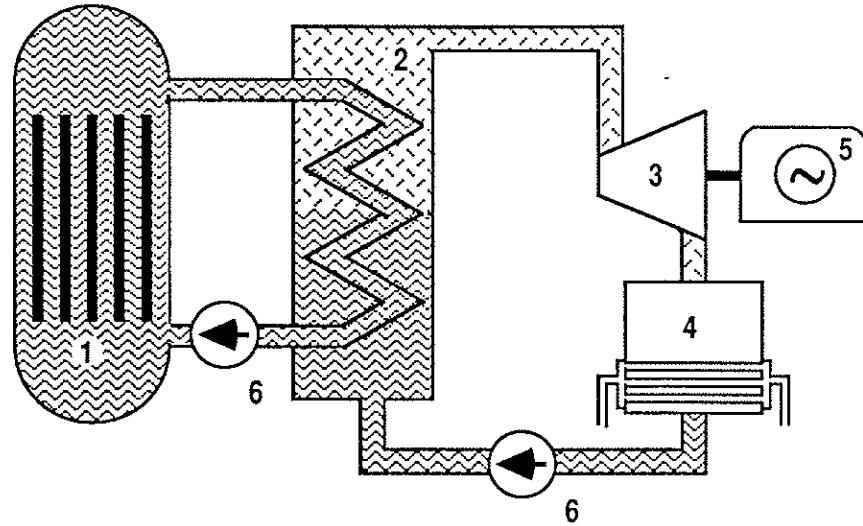


Fig. 2.3.14 Réacteur à eau pressurisée

Réacteurs à eau bouillante (BWR)

- Description:

Cette sous-filière se distingue de la précédente par:

- 1 - une pression du circuit primaire moins élevée qui permet de porter l'eau à ébullition dans la partie supérieure de la cuve du réacteur;
- 2 - l'absence concomitante de générateurs de vapeur externes, de pressuriseur et de circuit secondaire;
- 3 - le fait que la salle des machines est située cette fois en zone contrôlée (la vapeur qui circule dans les turbines provient directement du cœur du réacteur et est donc légèrement radioactive).

- Schéma type d'une installation:

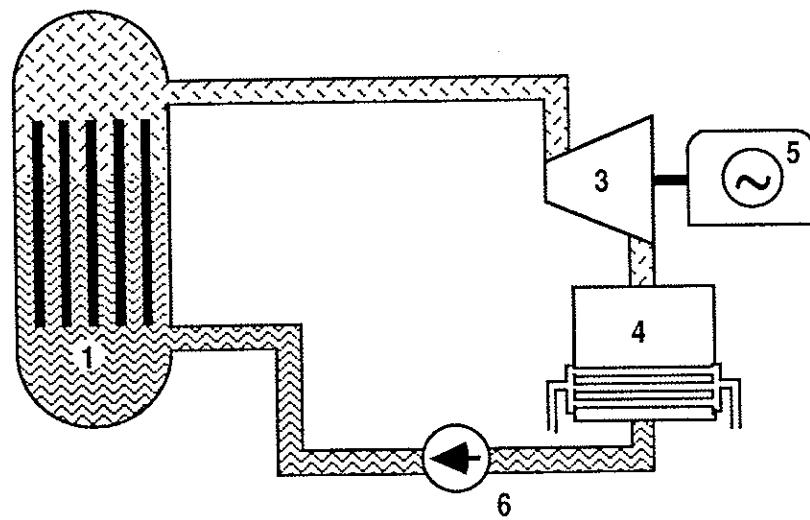


Fig. 2.3.15 Réacteur à eau bouillante

Filière : Réacteurs à haute température (HTGR)

- Description:

Ce type de réacteur permet d'atteindre de hautes températures de sortie grâce à l'utilisation d'un gaz (hélium) comme fluide caloporteur et du graphite comme modérateur. La chaleur évacuée du cœur du réacteur par l'hélium circulant dans le circuit primaire est transmise à l'eau du circuit secondaire dans les générateurs de vapeur. Les performances thermodynamiques de ces installations sont comparables à celles des centrales thermiques les plus modernes. L'utilisation d'un gaz inerte pour le refroidissement du cœur présente en outre d'importants avantages du point de vue de la sécurité et des contraintes technologiques. Les réacteurs à haute température n'ont cependant pas encore dépassé le stade du prototype.

- Schéma type d'une installation:

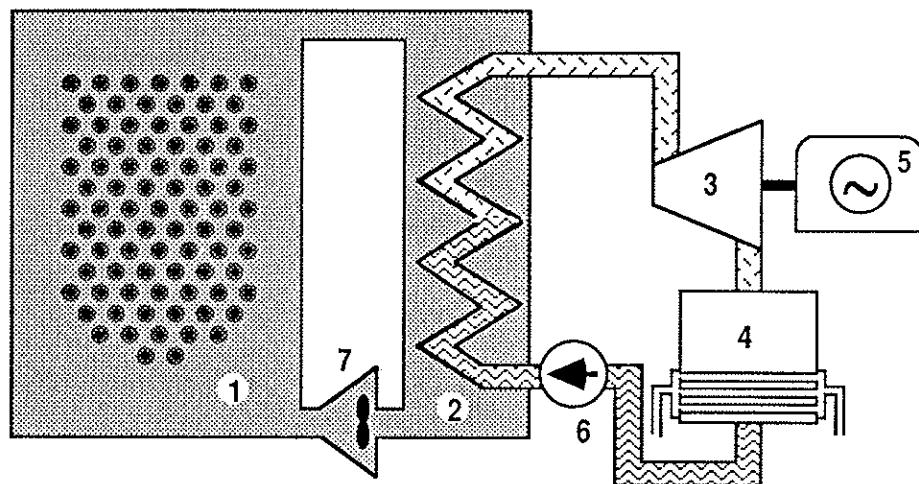


Fig. 2.3.16 Réacteur à haute température

Filière : Surgénérateurs (LMFBR ou Liquid Metal Fast Breeder Reactor)

- Description:

La particularité de cette filière de réacteur est de permettre la surgénération, c'est-à-dire la formation de nouvelle matière fissile en quantité supérieure à celle consommée dans le réacteur. Les surgénérateurs permettent une utilisation beaucoup plus efficace des ressources en uranium, l'isotope fertile uranium-238 étant progressivement transmuté en plutonium-239 fissile. Pour obtenir ce résultat, il faut que les neutrons conservent une énergie moyenne aussi élevée que possible, d'où l'absence de tout modérateur et l'utilisation d'un caloporeur ralentissant peu les neutrons comme le sodium liquide. Ces réacteurs comportent un triple circuit de sodium pour éviter tout risque d'une réaction chimique violente dans le cœur du réacteur entre ce métal et de l'eau.

- Schéma type d'une installation:

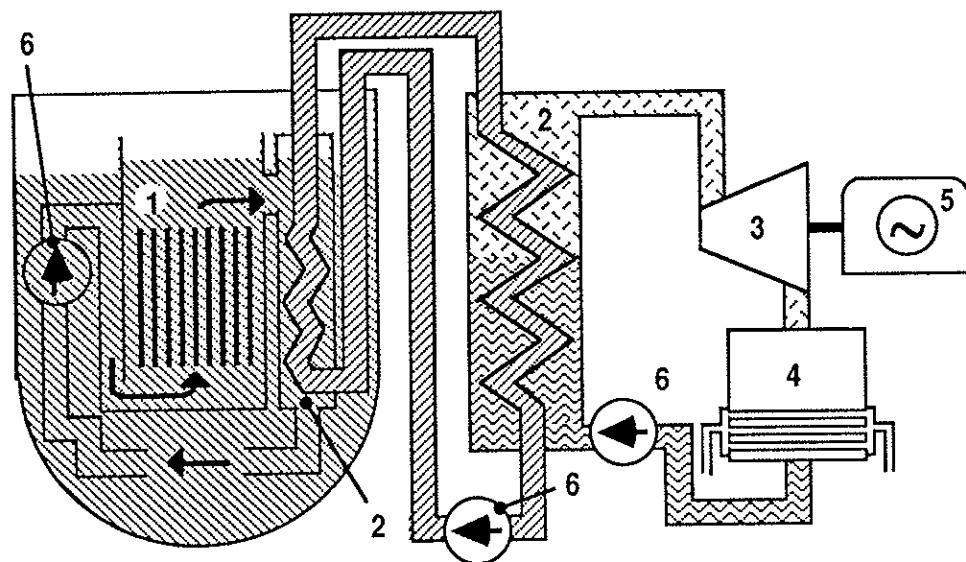


Fig. 2.3.17 Réacteur surgénérateur

Agent énergétique: "Energie hydraulique"

Partout où une quantité suffisante d'eau peut être captée à une certaine altitude puis restituée à un niveau inférieur, la production d'énergie électrique par voie hydraulique est en principe possible. L'énergie produite dépend du débit d'eau et de la hauteur de chute, qui peut aller de quelques mètres (très basses chutes) à plus de 1000 m (max. 1700 à 1800 m). Les bassins versants sont généralement faibles en haute montagne (où sont réalisés les captages de hautes chutes), ils sont par contre beaucoup plus grands en plaine (où seuls des aménagements de basses chutes sont réalisables). Quel que soit le type d'aménagement, l'eau captée est conduite par des canalisations à ciel ouvert ou souterraines, construites de manière à occasionner le minimum de pertes par frottement, puis mise sous pression et enfin dirigée sur une (ou plusieurs) turbine(s). L'énergie transmise à la machine entraîne une génératrice électrique, tandis que l'eau est restituée, sans pression, au cours d'eau. Le réglage de la marche d'une centrale hydraulique est beaucoup plus simple que celui d'une centrale thermique ou nucléaire, les machines y tournent moins vite, travaillent à température ambiante et sous plus faible pression; il s'agit donc de machines et d'installations plus simples et plus robustes.

Les centrales et aménagements hydrauliques sont classés selon les critères suivants:

- **chute**
 - . basse chute : $\Delta H \leq 40 \text{ m}$
 - . moyenne chute : $40 \text{ m} < \Delta H < 200 \text{ m}$
 - . haute chute : $\Delta H \geq 200 \text{ m}$
- **accumulation**
 - . aménagements sans accumulation ou "au fil de l'eau" (basse, moyenne ou haute chute)
 - . aménagements à accumulation gravitaire (moyenne ou haute chute)
 - . aménagements à accumulation par pompage (moyenne ou haute chute / pompage "d'adduction" uniquement ou pompage-turbinage / exploitation journalière ou saisonnière)

Energie : "Centrales au fil de l'eau"

Aménagements de basse chute au fil de l'eau

- Description:

Ces aménagements sont caractérisés par des chutes à la fois faibles et variables, ainsi que par de gros débits. L'importance du débit de crues nécessite très souvent la construction de barrages mobiles qui peuvent s'effacer entièrement pendant les crues. La centrale se trouve soit sur le lit du cours d'eau soit sur un canal de dérivation parallèle.

- Schéma type d'une installation:

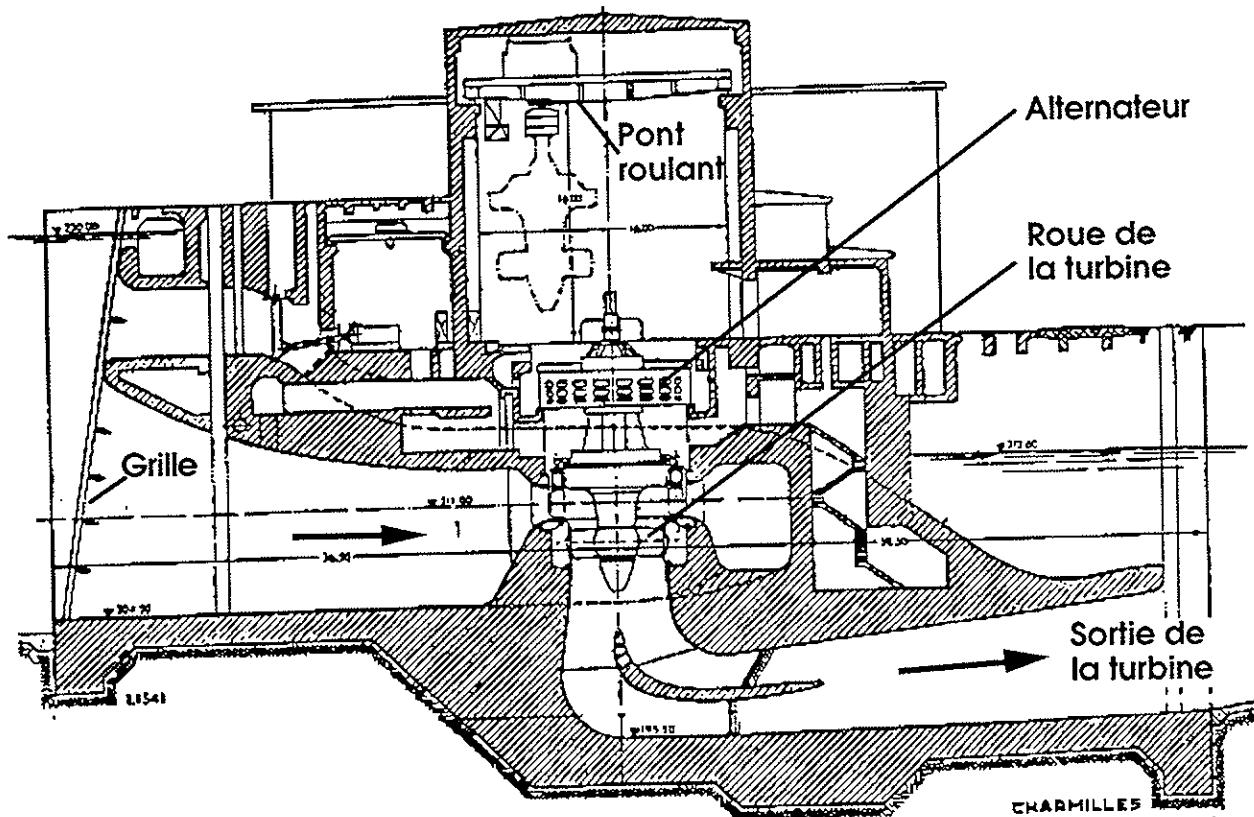


Fig. 2.3.18 Centrale basse chute au fil de l'eau

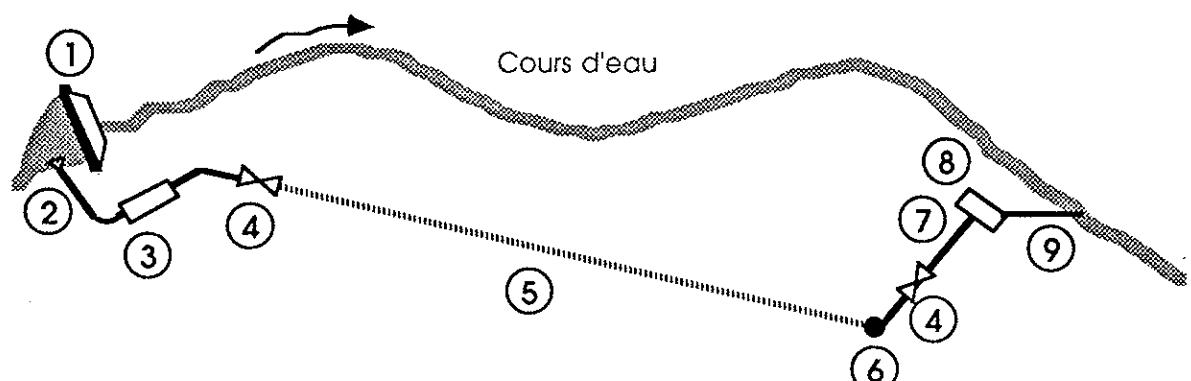
Aménagements de moyenne ou haute chute au fil de l'eau

- Description:

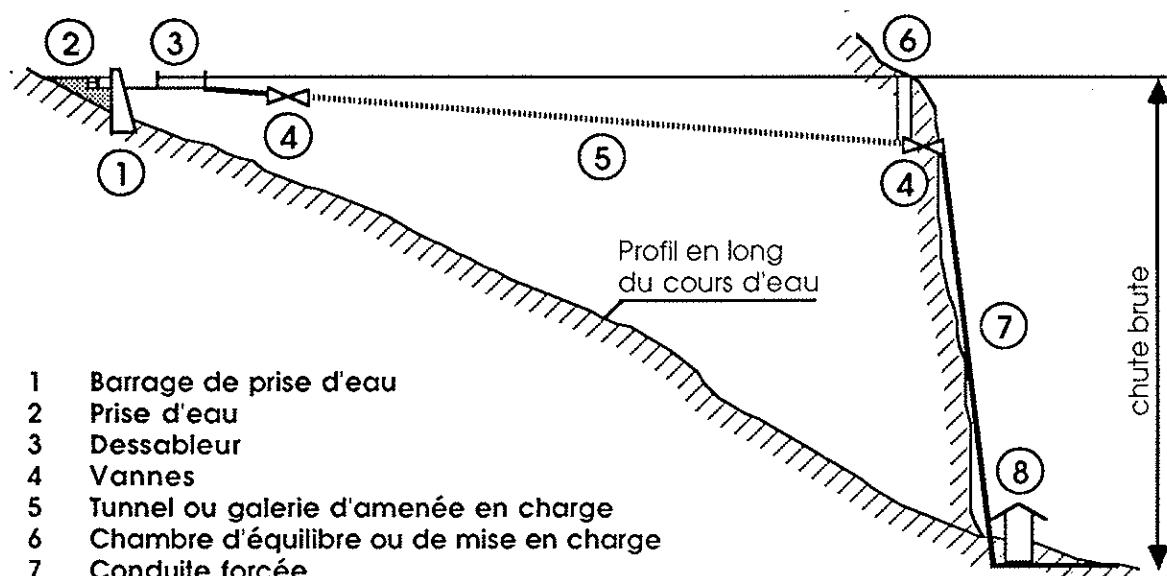
Un aménagement de ce type est habituellement construit sur des rivières de montagne ou des torrents. Les divers ouvrages d'une telle réalisation ne diffèrent guère de ceux d'une installation haute chute à accumulation.

- Schéma type d'une installation:

En plan



En élévation



- 1 Barrage de prise d'eau
- 2 Prise d'eau
- 3 Dessableur
- 4 Vannes
- 5 Tunnel ou galerie d'aménée en charge
- 6 Chambre d'équilibre ou de mise en charge
- 7 Conduite forcée
- 8 Usine
- 9 Canal de fuite

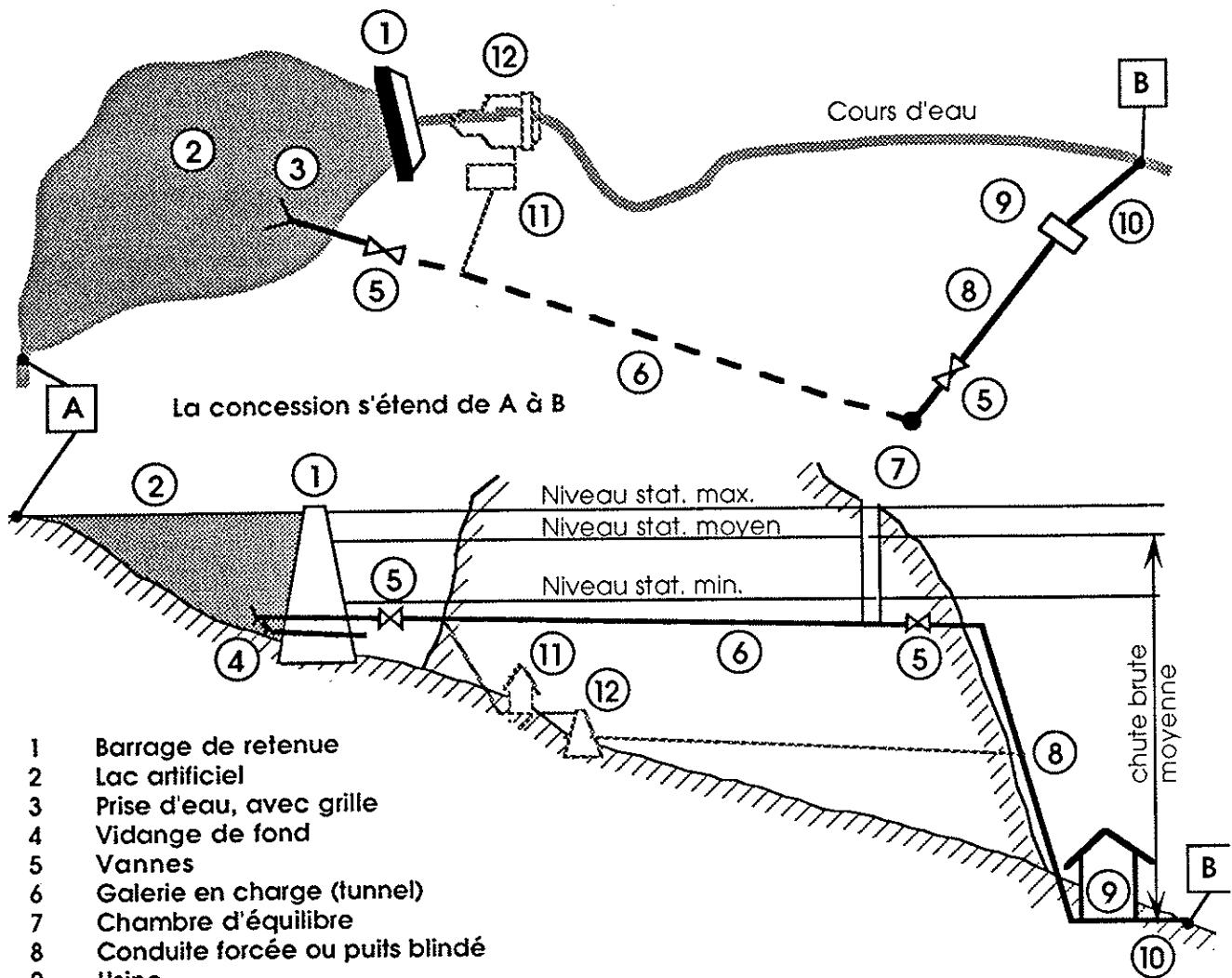
Fig. 2.3.19 Aménagement de moyenne ou haute chute au fil de l'eau

Filière : "Aménagements à bassin d'accumulation"

- Description:

C'est l'aménagement caractéristique des Alpes (exploité en un ou plusieurs paliers). L'eau est accumulée en été (fonte des neiges) pour une production hivernale.

- Schéma type d'une installation:



Variante

- 11 Usine au pied du barrage ou dans son voisinage
- 12 Bassin de compensation, petit barrage, prise d'eau et installations

Fig. 2.3.20 Aménagement à accumulation

Filière : "Mini-centrales, micro-centrales"

- Description:

Il s'agit d'aménagements de petites ($0.3 \text{ MW} < P \leq 10 \text{ MW}$) ou très petites ($P \leq 0.3 \text{ MW}$) puissances. Ces aménagements couvrent une fourchette extrêmement étendue aussi bien en ce qui concerne les chutes (quelques mètres à plusieurs centaines de mètres) que les débits (0.1 à 50 m^3/s , à titre indicatif); ils connaissent un essor important dans les pays en voie de développement et devraient revenir d'actualité en Europe et en Suisse en particulier.

- Exemple d'une installation (Muslen):

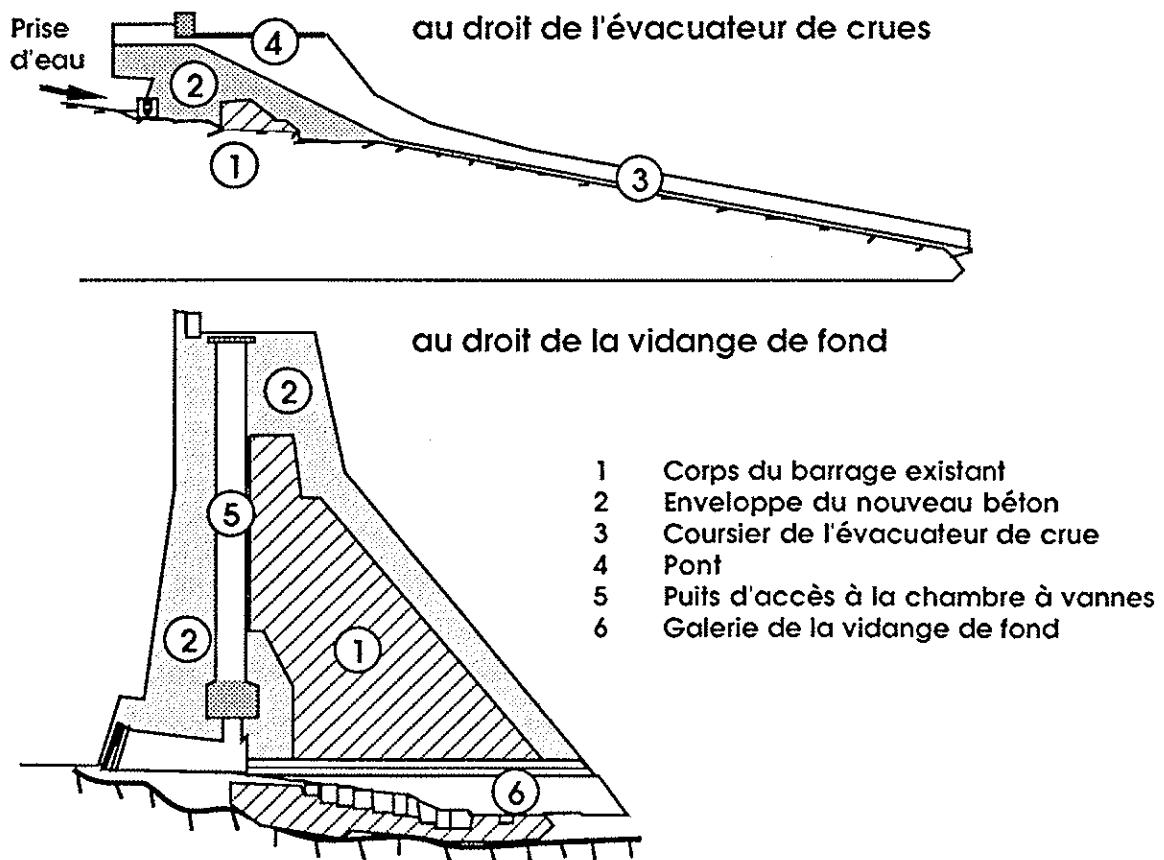


Fig. 2.3.21 Exemple de mini-barrage (Muslen)

Agent énergétique: "Déchets urbains"

Filière : "Centres d'incinération des ordures et des déchets spéciaux"

- Description:

Le problème de l'élimination des déchets est actuellement en Suisse dans une phase de transition. Il s'agit de concrétiser les principes contenus dans les "lignes directrices pour la gestion des déchets", afin que leur traitement soit conforme aux critères de protection de l'environnement. Le recyclage devrait gagner en importance ces prochaines années, mais l'incinération figure encore au premier plan des techniques d'élimination des déchets. Par le biais de l'incinération, la minéralisation des déchets est très rapide et peut être contrôlée, ce qui n'est pas le cas lors de leur dégradation en décharge. L'incinération des déchets urbains dans les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) ne requiert aucun autre agent énergétique; au contraire, l'énergie dégagée par cette opération peut être récupérée pour alimenter des installations de chauffage à distance ou pour produire de l'électricité en lieu et place de combustibles fossiles. Il faut noter à ce propos que la capacité des installations de traitement des déchets n'a pas réussi à suivre en Suisse l'augmentation des flux de matières à éliminer résultant de l'accroissement général de la consommation enregistré ces dernières décennies; il y a donc là sur le plan énergétique un potentiel "indigène" qui n'est pas encore entièrement exploité.

L'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) fixe des valeurs limites très strictes pour les polluants contenus dans les fumées émises par les UIOM. Pour s'y conformer, ces installations sont équipées de dispositifs permettant un dépoussiérage puissant, suivi d'une épuration complémentaire des fumées. Le procédé d'épuration des fumées le plus efficace est sans conteste celui du lavage par voie humide; après avoir été dépoussiérées dans un électrofiltre et avant d'entrer dans le laveur, les fumées sont refroidies par pulvérisation d'eau jusqu'à une température de 60 à 65°C, afin de protéger les stades ultérieurs du lavage. Le lavage proprement dit se déroule en deux temps. Les fumées sont d'abord saturées de vapeur d'eau, et les gaz polluants - acides chlorhydrique et fluorhydrique - sont dissous dans l'eau. Quant aux métaux lourds à l'état gazeux, ils sont condensés par l'abaissement de température. L'eau de lavage circule en circuit fermé. Pour une désulfuration efficace, on peut recourir dans un second temps à des alcalis (soude caustique le plus souvent).

Les UIOM travaillent en général à relativement basses températures. Certains déchets, dits "spéciaux", ne peuvent cependant être incinérés de manière sûre qu'à des températures élevées en raison des substances dangereuses qu'ils contiennent. Ceci est réalisé dans des usines particulières - les centres de traitement de déchets spéciaux ou CTDS - qui sont équipées de fours atteignant des températures de l'ordre de 1200°C. Les gaz chauds résultant de la combustion sont conduits à une chambre de post-combustion, puis à une chaudière de récupération où se forme de la vapeur qui peut ensuite servir à produire de l'électricité ou à alimenter un chauffage urbain. Comme dans les UIOM, les gaz de combustion sortant de la chaudière sont épurés et lavés avant d'être relâchés dans l'atmosphère.

- Schéma type d'une installation:

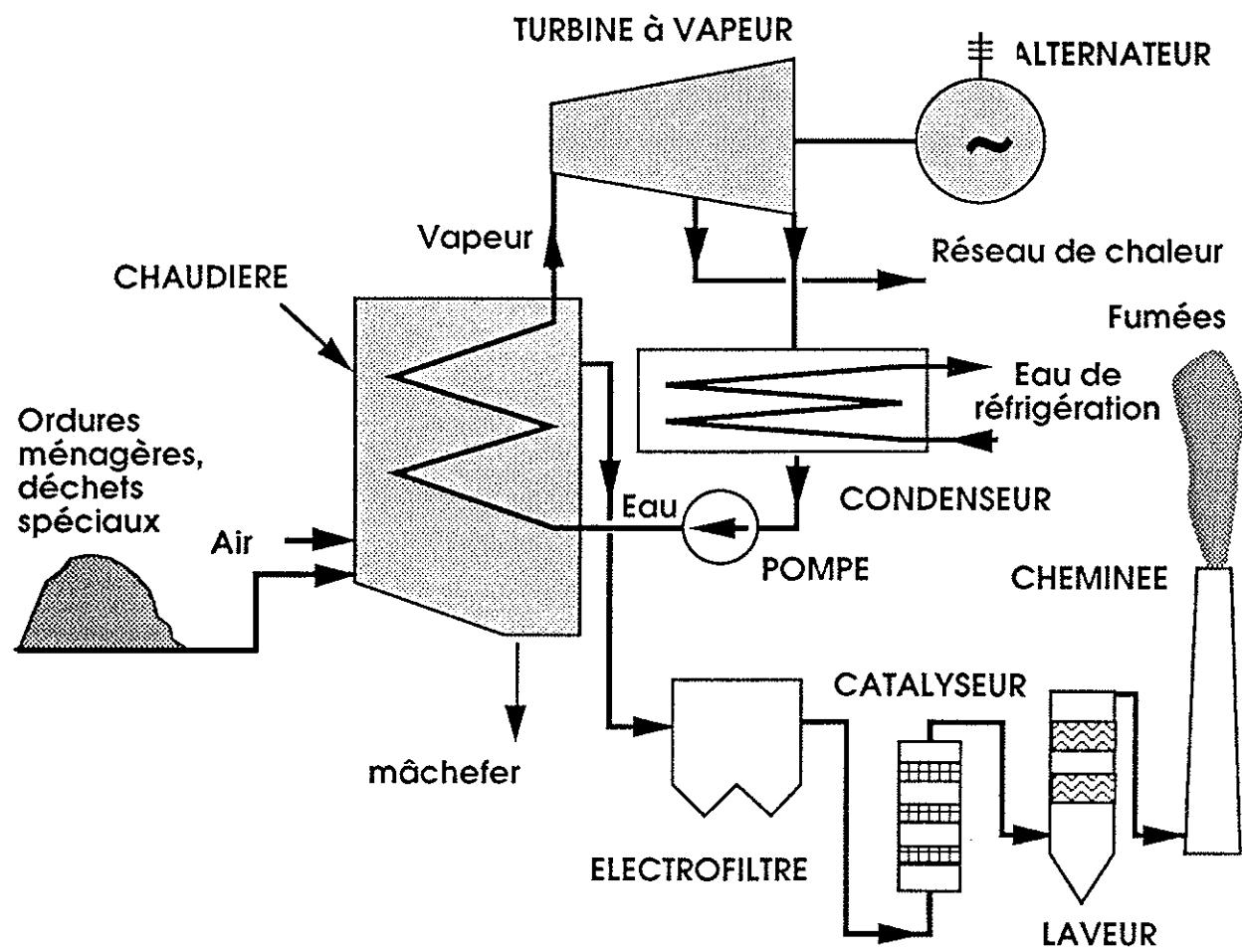


Fig. 2.3.22 Installation d'incinération des ordures

Agent énergétique: "Energie éolienne"

Filière : "Eoliennes de petite, moyenne ou grande puissances"

- Description:

L'énergie cinétique du vent est captée à l'aide de pales disposées sur un axe de rotation qui peut être horizontal ou vertical suivant le type d'éolienne utilisé. Les éoliennes peuvent être installées soit isolément soit en groupes ("parcs éoliens"), les caractéristiques du site potentiel dictant le choix de l'une ou l'autre possibilité; il est ainsi possible d'obtenir des gammes de puissances installées très variées. La quantité d'énergie que peut produire une éolienne est très sensible à la vitesse du vent, c'est pourquoi les sites potentiels sont limités aux régions (relativement rares en Suisse) où les vents soufflent avec une intensité et une constance suffisantes.

- Schéma type d'une installation:

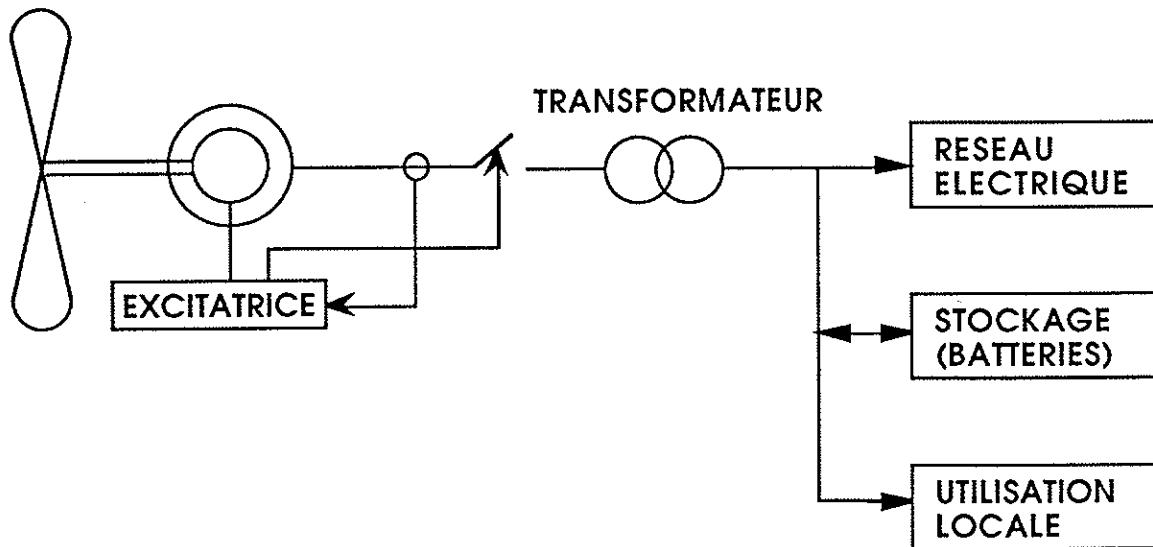


Fig. 2.3.23 Eolienne

Agent énergétique: "Rayonnement solaire"

Filière : "Centrales hélio-thermiques"

- **Description:**

Les centrales hélio-thermiques utilisent l'énergie solaire concentrée par des miroirs (héliostats) pour porter un fluide de travail à haute température; ce fluide entraîne ensuite une machine thermodynamique à laquelle est couplée un alternateur. Les héliostats sont solidaires d'une monture orientable permettant de réfléchir en permanence les rayons du soleil vers la chaudière placée au foyer de convergence. Seul le rayonnement direct peut être réfléchi, donc utilisé.

- **Schéma type d'une installation:**

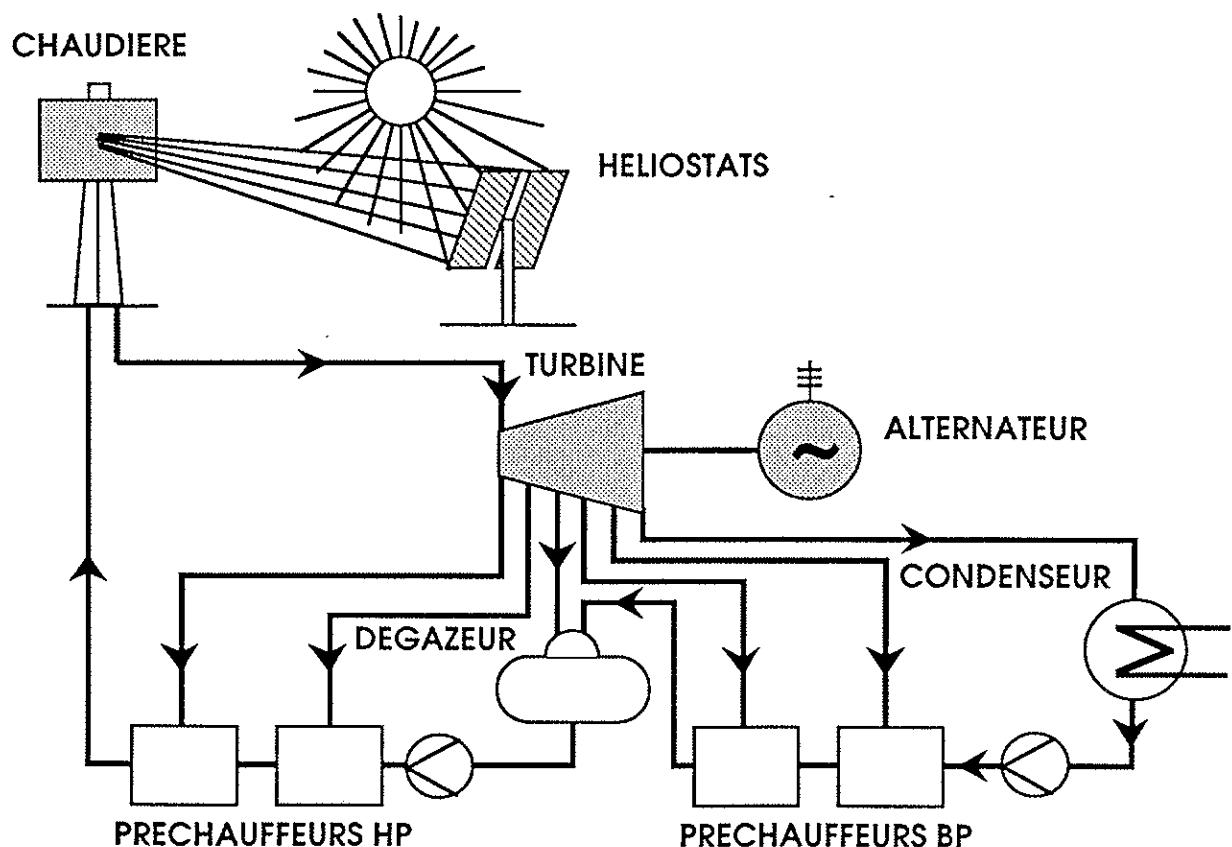


Fig. 2.3.24 Centrale hélio-thermique

Filière : "Installations photovoltaïques"

- Description:

La production d'énergie électrique par voie photovoltaïque est basée sur la conversion du rayonnement solaire direct ou diffus en électricité (courant continu) au moyen de cellules utilisant la technologie des semi-conducteurs. Le matériau le plus communément utilisé pour ces photopiles est le silicium monocristallin ou polycristallin, mais l'arséniure de gallium, le tellure de cadmium et le disélénium de cuivre et d'indium sont également employés. Les photopiles sont groupées en modules, comportant un grand nombre de cellules, qui peuvent être montés sur un support fixe ou au foyer de systèmes concentrant la lumière solaire. Pour pouvoir être injecté dans le réseau, le courant continu doit être transformé en courant alternatif à l'aide d'un dispositif électronique appelé onduleur.

- Schéma type d'une installation:

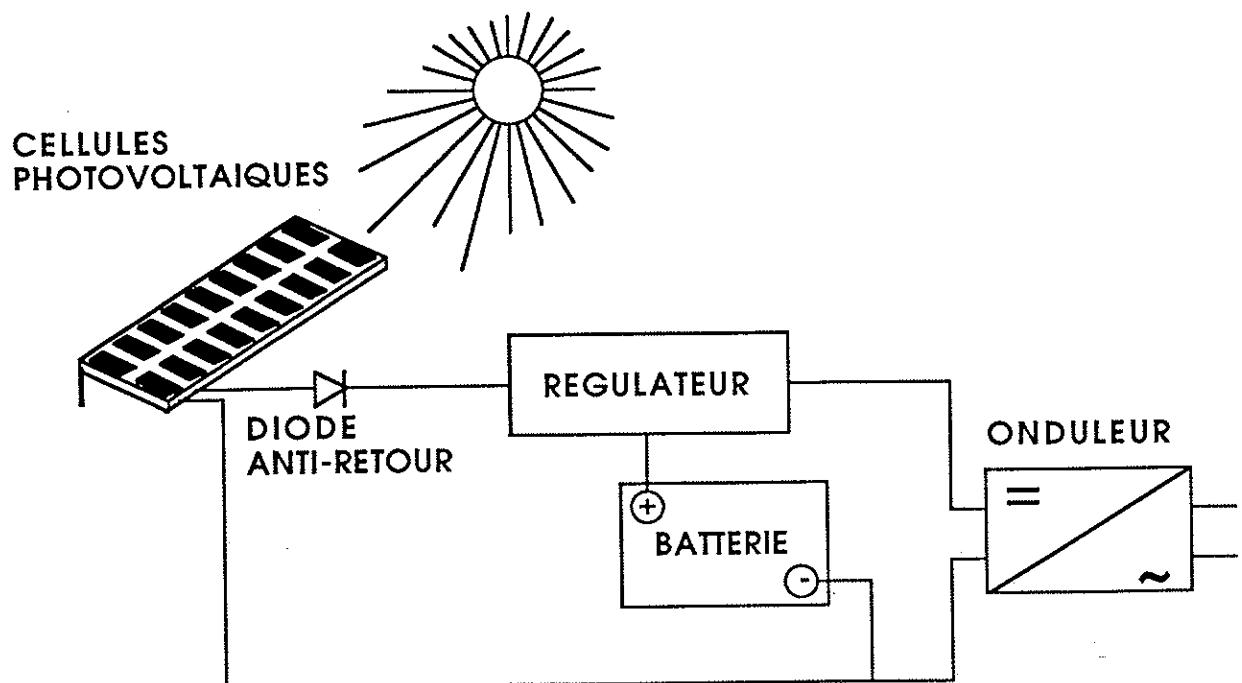


Fig. 2.3.25 Installation photovoltaïque

3. DEFINITION DES CRITERES/INDICATEURS

3.1 HIERARCHISATION DES CRITERES

Les critères sont classés hiérarchiquement selon une structure à trois niveaux:

1er niveau : **CLASSE** (regroupement de critères de même nature);

2ème niveau : **CRITERE** (niveau de référence);

3ème niveau : **INDICATEUR** (niveau de saisie de l'information de base).

Si un critère est caractérisé par un seul indicateur, le niveau 3 est alors omis (CRITERE = INDICATEUR).

3.2 QUALIFICATION DES CRITERES/INDICATEURS

Les critères/indicateurs peuvent être de deux types:

qualitatif : la valeur attribuée au critère/indicateur est alors une appréciation choisie parmi un ensemble fini de qualificatifs ordonnés (ex. "fort", "moyen", "faible");

quantitatif : la valeur du critère/indicateur est dans ce cas donnée par un nombre, éventuellement deux nombres définissant les bornes d'un intervalle, accompagné de l'indication de l'unité utilisée (ex. Exajoule/an, Fr/kWh, etc).

Les informations de type quantitatif proviennent de diverses sources bibliographiques autorisées, dûment répertoriées (voir chapitre "Base de données").

Les appréciations de type qualitatif résultent d'une procédure de consultation effectuée au sein d'un groupe d'experts ("groupe d'évaluation") sur la base de propositions faites par les auteurs de l'étude.

3.3 DEFINITION DES CRITERES/INDICATEURS SELECTIONNES

Classe : "Sécurité d'approvisionnement et indépendance énergétique"

Critère : "Diversification géopolitique des réserves"

- **Définition :**

Evaluation de l'accessibilité des sources d'énergie primaire, au sens de la sécurité d'approvisionnement, sur la base de la répartition géopolitique des réserves.

- **Echelle :**

Appréciation : forte, moyenne, faible.

- **Hypothèse :**

La diversification géopolitique est considérée comme forte si le nombre de pays fournisseurs est important et si ces pays appartiennent en majorité à des pays considérés comme "sûrs" sur le plan politico-économique .

Indicateurs :

- Nombre de pays exportateurs de l'agent énergétique primaire considéré.
- Pourcentage des réserves de cet agent énergétique primaire situées dans des pays considérés comme "sûrs" (appartenant à l'OCDE).

Critère : "Réserves assurées au niveau mondial"

- Définition :

Somme des réserves prouvées (gisements dont l'existence et l'étendue sont connues avec une bonne certitude et qui peuvent être exploités avec les techniques actuelles à un coût économiquement acceptable) augmentées des réserves additionnelles (estimées et non encore exploitables économiquement dans les conditions actuelles). Une caractérisation des réserves prouvées en années de consommation au rythme présent de la production mondiale de l'agent énergétique considéré est également donnée.

- Echelle :

Equivalent énergétique (Exajoule) (réserves prouvées + additionnelles) ou années de réserve (réserves prouvées uniquement).

- Hypothèses :

Pour les combustibles fossiles, le calcul de l'équivalent énergétique des réserves assurées est basé sur le pouvoir calorifique inférieur. Deux valeurs d'équivalent énergétique sont données pour les réserves d'uranium (classe de prix < 130 \$/kg U₃O₈), la première correspondant à une utilisation dans des réacteurs thermiques et la seconde à une utilisation dans des réacteurs surgénérateurs. Etant donné que d'une manière générale aucune réserve n'est exactement connue, toutes ces réserves sont indiquées sous forme d'une fourchette de valeurs tenant compte de diverses évaluations. Les réserves attribuées aux énergies renouvelables sont, par définition, infinies.

Indicateurs :

- Réserves prouvées (Exajoule).
- Réserves additionnelles (Exajoule).
- Production annuelle mondiale de l'agent énergétique primaire considéré (Exajoule/an).

Critère : "Potentiel suisse exploitable"

- Définition :

Evaluation de l'énergie maximale qui pourrait être produite annuellement en Suisse à l'aide de la filière considérée.

- Echelle :

Energie annuelle (Exajoule/an).

- Hypothèses :

On suppose une utilisation optimale des capacités de production et de l'infrastructure existante ou pouvant être mise en place dans un intervalle de temps d'une quinzaine d'années. Le potentiel exploitable en Suisse dépend:

- du nombre et de la "capacité d'accueil" (déterminée par exemple par la capacité de refroidissement) des sites disponibles, ou de la surface maximale utilisable (capteurs solaires); la définition des sites ou des surfaces utilisables doit tenir compte des impératifs de la protection de l'environnement (en particulier, atteinte au paysage);
- des limites de capacité des réseaux de transport (routier, ferroviaire, gazoduc) pour l'approvisionnement en combustible ou éventuellement l'élimination des déchets produits.

Pour le calcul des quantités annuelles de combustible à transporter, on se base pour les centrales thermiques sur un facteur de charge de 80% (7000 h/an), et une efficacité thermodynamique de 40% (pour les centrales nucléaires, le transport de combustible ne constitue pas un facteur limitatif).

Indicateurs :

- Limite (Exajoule/an) imposée par la capacité des réseaux utilisés pour le transport du combustible ou des déchets à évacuer.
- Puissance maximale (MWe) pouvant être installée sur les sites disponibles.

Critère : "Facilité de stockage au niveau national"**- Définition :**

Evaluation des possibilités de stockage au niveau national de l'agent énergétique primaire utilisé par la filière considérée.

- Echelle :

Appréciation : grande, moyenne, faible, nulle.

- Hypothèses :

La facilité de stockage est évaluée sur la base du volume et du coût des installations nécessaires (par unité d'énergie brut stockée), ainsi que de la capacité de stockage déjà installée dans le pays.

On attribue une capacité de stockage nulle aux énergies renouvelables qui ne sont pas disponibles "à la demande" (solaire, éolienne, hydraulique au fil de l'eau); la possibilité de stocker l'énergie captée sous une forme intermédiaire provisoire (énergie potentielle par exemple) n'est donc pas prise en considération ici.

Indicateurs :

- Volume unitaire de stockage (m³/TJ).
- Coût unitaire du stockage (Fr/TJ).
- Capacité de stockage actuelle (Térajoule).

Classe : "Technologie"**Critère : "Maturité technique (actuelle)"****- Définition :**

Caractérisation du stade de développement technologique actuellement atteint par la filière considérée.

- Echelle :

Appréciation : grande, moyenne, faible.

- Hypothèses :

Une "grande" maturité technique signifie que la filière considérée est déjà commercialisée à grande échelle.

Lorsque les installations existantes ne constituent encore que des prototypes industriels, la maturité technique de la filière est qualifiée de "moyenne".

La maturité est qualifiée de "faible" si les développements réalisés à ce jour n'ont pas dépassé le stade de prototypes expérimentaux.

Rappelons que les systèmes de production d'énergie qui sont encore actuellement au stade d'études de laboratoire et qui n'ont fait l'objet d'aucune réalisation pratique ne sont pas pris en considération dans cette étude.

Indicateurs : —

Critère : "Facilité de mise en oeuvre"

- **Définition :**

Caractérisation des moyens (infrastructure, temps) nécessaires pour mettre en service, et plus tard assurer le démantèlement, d'une installation du type (filière) considéré.

- **Echelle :**

Appréciation : grande, moyenne, faible.

- **Hypothèses :**

La facilité de mise en oeuvre est qualifiée de "grande" si la construction, respectivement le démantèlement, d'une installation du type considéré ne requiert pas une infrastructure particulière (exigences en équipement ou personnel sortant des normes usuelles en nombre et/ou en qualité) et si les temps nécessaires pour ces opérations ne dépassent pas 6 mois. Si ces temps sont de l'ordre de 6 à 36 mois, toujours sans exigence d'infrastructure particulière, la facilité de mise en oeuvre est "moyenne". Dans tous les autres cas, la facilité de mise en oeuvre est considérée comme "faible".

Indicateurs :

- Temps de construction (mois).
- Temps requis pour le démantèlement (y compris temps d'attente éventuel).
- Infrastructure nécessaire pour la construction, appréciation: lourde, mi-lourde, légère.
- Infrastructure nécessaire pour le démantèlement, appréciation: lourde, mi-lourde, légère.

Critère : "Efficacité énergétique (rendement)"**- Définition :**

Rapport entre l'énergie électrique produite par une installation du type considéré et l'énergie primaire transformée.

- Echelle :

Fraction (%).

- Hypothèses :

Pour des raisons pratiques, on ne considère ici que l'installation productrice d'énergie électrique elle-même, et non la totalité du cycle du combustible. L'énergie primaire transformée est par conséquent l'énergie brute à l'entrée du système de transformation (énergie contenue dans un combustible ou énergie captée dans l'environnement), sans tenir compte de l'énergie dépensée pour permettre l'utilisation de cette énergie primaire ou, en fin de cycle, pour se débarrasser des déchets produits. L'énergie nécessaire au fonctionnement de systèmes auxiliaires faisant partie intégrante de l'installation doit par contre entrer dans le calcul de cette énergie brute.

Indicateurs : —

Critère : "Coefficient de retour énergétique global"**- Définition :**

Rapport entre l'énergie électrique produite pendant la vie d'une centrale du type considéré et l'énergie qu'il faut investir pour permettre sa mise en service et son fonctionnement (fabrication des éléments de la centrale, travaux de construction et d'entretien, exploitation, etc), puis son démantèlement.

- Echelle :

Coefficient (en principe > 1).

- Hypothèses :

On ne considérera a priori que les énergies qui sont directement et clairement liées à la mise en service, au fonctionnement et au démantèlement du type d'installation considéré, un inventaire énergétique détaillé et complet des énergies "grises" étant pratiquement impossible à réaliser dans la plupart des cas.

Indicateurs : —

Critère : "Souplesse de production"

- Définition :

Caractérisation de l'aptitude des installations de la filière considérée à s'adapter aux fluctuations à court terme de la demande (charge).

- Echelle :

Appréciation : grande, moyenne, faible.

- Hypothèses :

L'évaluation de la souplesse de production est basée d'une part sur l'amplitude et le taux des variations de puissance admissibles et d'autre part sur la disponibilité et la "prévisibilité" de l'énergie produite (est-elle disponible quand on en a besoin et en quantité voulue?). Ces caractéristiques déterminent en grande partie le régime de fonctionnement ("base", "pointe", "appoint") qui correspond le mieux à la filière considérée. On ne prend pas en compte ici la possibilité d'introduire d'éventuels "systèmes-tampons" pour augmenter la flexibilité de production de l'installation.

Indicateurs :

- Possibilités de suivi de charge (plage des variations de puissance admissibles, caractérisée par la puissance minimale exprimée en pourcent de la puissance nominale) (%).
- Taux de variation de la puissance (variation relative de puissance par unité de temps) (%/min.).
- Coefficient de disponibilité (quotient de l'énergie nette qu'aurait pu produire la puissance disponible pendant une période donnée par l'énergie qu'aurait pu produire pendant la même période la puissance continue maximale nette) (%).
- Caractère de la production, appréciation: prévisible (stable), peu prévisible, imprévisible (aléatoire).

Classe : "Economie"

Critère : "Prix de revient de l'énergie électrique produite"

- Définition :

Coût du kWh électrique produit par une installation du type considéré; ce coût résulte des frais d'investissements, des frais d'exploitation et des frais de combustible.

- Echelle :

Coût (Fr/kWh).

- Hypothèses :

Le coût du kWh électrique produit est déterminé à partir de la somme des coûts actualisés des investissements (y compris les frais de démantèlement), de l'exploitation et du combustible et du nombre de kWh produits par la centrale pendant toute la durée de son fonctionnement.

On rappelle (cf Annexe A) que le *coût actualisé du kWh* est donné par le quotient du *coût actualisé du KW installé* par le *nombre actualisé d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance*.

Indicateurs :

- Coût actualisé des investissements (Fr/kW installé).
- Coût actualisé d'exploitation (Fr/kWh produit).
- Coût actualisé du cycle du combustible (Fr/kWh produit).
- Total actualisé des heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance.

Critère : "Stabilité des coûts de production"

- **Définition :**

- Evaluation de la stabilité à court et moyen terme du coût de l'énergie produite par des installations de la filière considérée.

- **Echelle :**

Appréciation : grande, moyenne, faible.

- **Hypothèses :**

L'évaluation de la stabilité des coûts de production est basée sur diverses considérations: structure des coûts (voir critère précédent) et évolution prévisible des prix des matières premières, influence de l'introduction de nouvelles mesures étatiques (taxes), conséquences financières de possibles avancées technologiques, etc. Ce critère tient compte également de la plus ou moins grande incertitude affectant chacun de ces divers facteurs (une grande incertitude étant considérée comme un indice d'instabilité des coûts).

Indicateurs : —

Critère : "Coûts externes"

- **Définition :**

Coûts environnementaux et sociaux directement liés à la production d'énergie électrique par des installations de la filière considérée et qui ne sont pas répercutés sur les coûts de production (les coûts externes sont par conséquent supportés par la société dans son ensemble et non par les consommateurs en proportion directe de leur utilisation de l'énergie ainsi produite).

- **Echelle :**

Coûts (Fr/KWh).

- **Hypothèses :**

L'évaluation des coûts externes suppose que l'on puisse estimer précisément la nature et l'importance des atteintes à l'Homme ou à l'environnement imputables à une filière de production d'énergie donnée et chiffrer ensuite ces atteintes en unité monétaire. Dans l'optique d'une étude comparative, cela suppose également que l'on définisse l'"externalité" de manière homogène pour l'ensemble des différentes filières considérées .

Indicateurs : —

Classe : "Impacts sur l'environnement et la santé" ¹

Critère : "Importance des rejets polluants"

- Définition :

Mesure de l'importance des rejets de substances polluantes dans l'atmosphère provoqués par des installations du type considéré.

- Echelle :

Volume de dilution (air) par unité d'énergie produite (m^3/kWh).

- Hypothèses :

On admet que la pollution atmosphérique constitue le point critique des atteintes à l'environnement résultant de la production d'énergie (les installations conformes aux prescriptions légales ne devraient pas en principe représenter une charge préoccupante pour les eaux ou le sol). Pour les besoins de la comparaison, les émissions polluantes spécifiques (kg/kWh) sont divisées par les concentrations admissibles selon l'ordonnance sur la protection de l'air (fraction de kg/m^3 d'air). On obtient ainsi un volume de dilution spécifique (m^3/kWh) pour chaque polluant, qui tient compte à la fois de la toxicité de celui-ci et des quantités rejetées; la somme de ces volumes de dilution caractérise l'importance de la pollution atmosphérique provoquée par les installations de la filière considérée.

Indicateurs :

- Volumes de dilution requis (m^3/kWh) pour les principaux types de polluants: SO_2 , NO_x , hydrocarbures (HC), radioactivité (Xe, Kr).

¹ On ne prend en considération dans cette classe de critères que les impacts sur l'environnement et la santé résultant du fonctionnement normal des installations. Les conséquences d'éventuels accidents sont traitées dans la classe "Risques".

Critère : "Importance des émissions de gaz à effet de serre"**- Définition :**

Mesure de l'importance des relâchements de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, CFC, N₂O) dans l'atmosphère imputables à des installations de la filière considérée.

- Echelle :

Quantités de gaz rejetées, exprimées en "équivalent CO₂" (kg CO₂/kWh).

- Hypothèses :

La contribution d'un gaz à l'augmentation de l'effet de serre dépend de sa concentration, de son "efficacité radiative", et de sa durée de vie. Pour permettre des comparaisons entre des émissions différant en quantité et composition pour les diverses filières considérées, on exprime toutes les quantités rejetées en "quantité équivalente de CO₂", en faisant intervenir le *potentiel de réchauffement global* (Global Warming Potential, ou GWP) de chacun des gaz. Le GWP est défini comme l'effet de réchauffement provoqué par l'émission de 1 kg du gaz considéré rapporté à celui d'une quantité équivalente de CO₂. A noter que ce coefficient dépend de l'horizon de temps considéré; dans cette étude on utilise les valeurs fournies dans la littérature pour un horizon de 20 ans.

Indicateurs :

- Emissions spécifiques des différents gaz à effet de serre (kg/kWh).
- GWP des différents gaz à effet de serre (-).

Critère : "Importance des nuisances liées aux déchets solides"

- Définition :

Evaluation de l'importance des nuisances provoquées par les déchets solides produits par des installations du type considéré.

- Echelle :

Appréciation : grande, moyenne, faible.

- Hypothèses :

Ce critère considère à la fois le volume de déchets solides produits et leur plus ou moins grande toxicité. On tient compte également des éventuelles possibilités de recyclage de ces déchets.

L'importance des nuisances est grande si les volumes non-recyclables de déchets produits sont grands, si la toxicité de ceux-ci est élevée et s'il n'existe pas de solution sûre pour les isoler efficacement de la biosphère; elle est considérée comme moyenne, si deux seulement des conditions ci-dessus sont réunies et comme faible si les déchets sont produits en petite quantité, s'ils sont peu ou pas toxiques et/ou faciles à isoler de la biosphère.

Indicateurs :

- Volumes de déchets solides non-recyclables produits, classés par catégories de déchets (m^3/kWh).
- Niveau de toxicité (ou d'activité pour les déchets nucléaires) des différentes catégories de déchets en cause, appréciation: élévé, moyen, faible, nul.
- Possibilités d'isoler efficacement et sûrement les déchets concernés de la biosphère, appréciation: grandes, moyennes, faibles, nulles.

Critère : "Emprise au sol"**- Définition :**

Surface au sol requise par MW électrique installé pour une installation du type considéré.

- Echelle :

Surface occupée (m^2/MW installé).

- Hypothèses :

L'emprise au sol pour une technologie donnée doit en principe inclure également les surfaces occupées par les installations destinées à l'extraction et au pré-traitement des combustibles et celles nécessaires à l'élimination ou au stockage des déchets produits. Celles-ci sont cependant en règle générale très difficiles à évaluer précisément. Pour cette raison, on considérera ici comme données de base les valeurs d'emprise au sol fournies dans la littérature pour l'installation de production d'énergie électrique proprement dite. On pourrait ensuite tenter d'évaluer l'emprise au sol des installations liées au reste du cycle du combustible en pourcent de la surface occupée par l'installation de production.

Indicateurs :

- Surface occupée par l'installation de production d'énergie électrique (m^2/MW installé).
- Surface occupée par les installations situées en amont et en aval de l'unité de production (évaluation) (% de la valeur précédente).

Critère : "Impacts microclimatiques"

- **Définition :**

Evaluation de l'importance des effets de l'implantation d'une installation du type considéré sur la climatologie locale ou régionale (p. ex.: ombre portée par des héliostats, panache de vapeur produit par une tour de refroidissement, etc).

- **Echelle :**

Appréciation : grands, moyens, faibles, nuls.

- **Hypothèses :**

Dans l'évaluation de ce critère on suppose que les prescriptions légales concernant par exemple les températures de rejet (refroidissement direct ou indirect d'installations thermiques), ou autres normes techniques imposées en Suisse, sont respectées.

En toute rigueur, une comparaison de l'importance des impacts microclimatiques ne peut être faite que pour des installations d'une puissance donnée, implantées sur un site donné. Pour conserver un cadre "générique" à cette étude, l'évaluation de ce critère est basée ici sur une puissance-type pour chacune des filières considérées et sur un site fictif "représentatif" des sites envisageables en Suisse pour de telles installations.

Indicateurs : —

Critère : "Impact visuel"

- Définition :

Mesure de l'importance de la gêne visuelle provoquée par les installations de production du type considéré ou par leurs systèmes auxiliaires (barrages, tours de refroidissement, etc.) les plus importants.

- Echelle :

Angle solide occulté (stéradians).

- Hypothèses :

Pour chaque technologie, on évalue l'angle solide occulté par l'ensemble des édifices ou ouvrages destinés à la production d'énergie électrique, au captage de l'énergie primaire nécessaire ou à l'élimination des déchets produits (en tenant compte des plus importants en dimensions).

Pour calculer cet angle solide, on situe arbitrairement l'observateur à une distance de 500 mètres de l'enceinte de l'installation considérée (ou des installations auxiliaires). Etant donné que la gêne visuelle a pour l'observateur en question un caractère absolu et n'est pas "fractionnable", la valeur calculée ne sera pas rapportée à une puissance installée unitaire.

Indicateurs : —

Critère : "Importance d'éventuelles nuisances d'autres types"

- Définition :

Evaluation de l'importance de nuisances autres que celles déjà évoquées (p. ex.: odeurs, bruit, etc.) résultant de l'exploitation d'installations appartenant à la filière considérée.

- Echelle :

Appréciation : grande, moyenne, faible, nulle.

- Hypothèses :

Il s'agit d'évaluer dans quelle mesure les installations de production d'énergie électrique de la filière considérée, ou leurs éventuelles installations auxiliaires, peuvent être responsables de nuisances particulières (c'est-à-dire de nuisances qui n'entrent pas dans la catégorie des "effluents"). Les exemples les plus typiques de telles nuisances sont le bruit ou les odeurs.

L'évaluation de ce critère est effectuée en considérant une installation de puissance type pour chacune des filières.

Indicateurs : —

Critère : "Impacts directs sur les écosystèmes"**- Définition :**

Evaluation de l'importance des perturbations engendrées par la présence d'une installation du type considéré ou de ses éventuels systèmes auxiliaires sur les écosystèmes (p. ex.: obstacle à la migration de certains poissons constitué par une installation de retenue). Comme pour tous les critères similaires, on suppose que les prescriptions légales, ou autres normes techniques imposées en Suisse, sont respectées.

- Echelle :

Appréciation : grands, moyens, faibles, nuls.

- Hypothèses :

Pour chaque type de filière, on considère les écosystèmes les plus susceptibles d'être perturbés par la présence de l'installation de production d'électricité elle-même ou de ses installations auxiliaires et on évalue l'importance de la perturbation qui leur est infligée.

Les remarques faites précédemment sur le problème de la spécification de la puissance et du site s'appliquent également ici.

Indicateurs : —

Critère : "Impacts sur la santé des professionnels"

- **Définition :**

Evaluation statistique des risques sanitaires courus du fait de leur activité professionnelle par l'ensemble de la main d'oeuvre employée dans la chaîne de production d'énergie électrique correspondant à la filière considérée.

- **Echelle :**

Journées de travail perdues ("Man-Days Lost" ou MDL) par unité d'énergie produite (MDL/MWe.an).

- **Hypothèses :**

Il s'agit d'évaluer les risques que font courir aux personnes professionnellement exposées les opérations liées à la construction, à l'exploitation et à l'ensemble du cycle du combustible des installations du type considéré. Les risques en question concernent les décès, les accidents ou les maladies.

Afin de permettre une comparaison entre les diverses technologies, ces risques sont tous ramenés à des "journées de travail perdues" en se basant sur les équivalences suivantes: 1 décès = 6000 journées de travail perdues, 1 blessé = 50 journées de travail perdues.

Indicateurs : —

Critère : "Impacts sur la santé du public"

- Définition :

Evaluation statistique des risques sanitaires auxquels sont soumises les populations concernées du fait de la présence dans leur voisinage plus ou moins immédiat d'installations de la filière considérée.

- Echelle :

Journées de travail perdues ("Man-Days Lost" ou MDL) par unité d'énergie produite (MDL/MWe.an).

- Hypothèses :

Il s'agit d'évaluer les risques que font courir aux populations concernées les opérations liées à la construction, à l'exploitation et à l'ensemble du cycle du combustible des installations du type considéré. Les risques en question concernent les décès, les accidents ou les maladies.

Comme dans le cas des professionnels, ces risques sont tous ramenés à des "journées de travail perdues" en se basant sur les mêmes équivalences: 1 décès = 6000 journées de travail perdues, 1 blessé = 50 journées de travail perdues.

Indicateurs : —

Classe : "Risques immédiats"**Critère : "Taux normalisé de décès immédiats par suite d'accidents graves"****- Définition :**

Nombre de décès immédiats enregistrés durant une période de référence donnée à la suite d'accidents graves touchant des installations de la filière considérée, rapporté à l'énergie produite pendant la même période (plan mondial).

- Echelle :

Taux normalisé de décès (décès/GWe.an).

- Hypothèses :

Les accidents considérés peuvent résulter de causes techniques, humaines ou externes (tremblement de terre par exemple). Pour éviter de comparer des données statistiques avec des résultats d'analyses ou d'évaluations probabilistes, on se basera uniquement sur les décès enregistrés à la suite d'événements réels survenus pendant la période de référence choisie (1969-1986).

Indicateurs : —

Critère : "Fréquence cumulée d'accidents graves par unité d'énergie produite"

- **Définition :**

Fréquence des accidents graves susceptibles de provoquer un nombre de victimes supérieur à une valeur donnée, rapportée à l'unité d'électricité produite (probabilité par GWe.an d'accidents causant $\geq X$ victimes par accident).

- **Echelle :**

Fréquence normalisée (accidents/GWe.an).

- **Hypothèses :**

Ce critère est généralement donné sous la forme d'une distribution de fréquence cumulée: fréquence annuelle d'accidents causant $\geq X$ victimes en fonction du nombre X de victimes par accident. Pour les besoins de l'étude, on ne retiendra que deux valeurs particulières de cette fonction de distribution, à savoir celles correspondant à $X_1 = 100$ décès et $X_2 = 1000$ décès (voir "indicateurs"). Dans la plupart des cas il s'agira de données basées sur des statistiques d'accidents réels; lorsque celles-ci font défaut, on aura recours à des évaluations fondées sur des analyses probabilistes de sécurité. On suppose bien entendu que les installations considérées sont conformes à "l'état de la technique" et mettent en oeuvre les parades connues permettant de limiter la fréquence et les conséquences de tels accidents graves.

Indicateurs :

- Probabilité par GWe.an d'accidents provoquant ≥ 100 décès par accident.
- Probabilité par GWe.an d'accidents provoquant ≥ 1000 décès par accident.

Critère : "Ampleur des dommages matériels occasionnés par un accident grave"

- **Définition :**

Evaluation de l'ampleur des dommages aux biens et à l'environnement provoqués directement par un accident grave survenant sur une installation du type considéré.

- **Echelle :**

Appréciation : grande, moyenne, faible, nulle.

- **Hypothèses :**

On évaluera ce critère sur la base des deux indicateurs que sont l'ampleur des dégâts matériels causés par l'accident de référence - donnée par les coûts de réparation ou remise en état - d'une part, et l'étendue de territoire concernée d'autre part (voir "indicateurs").

Indicateurs :

- Ampleur des dégâts matériels potentiels (MFr/accident).
- Etendue concernée (km²/accident).

Classe : "Risques différés"

Critère : "Importance des risques sanitaires encourus par les futures générations"

- Définition :

Evaluation de l'importance des risques sanitaires que fait courir aux générations futures l'exploitation actuelle d'installations appartenant à la filière considérée.

- Echelle :

Appréciation : grande, moyenne, faible, nulle.

- Hypothèses :

L'importance des risques sanitaires encourus par les générations futures se mesure à la probabilité de relâchement à long terme de substances nocives dans la biosphère (en supposant mises en oeuvre toutes les parades actuellement applicables), à l'ampleur des conséquences d'un tel relâchement et à la durée de la menace potentielle (voir "indicateurs"). On ne considérera ici que les risques sanitaires futurs liés directement à l'exploitation actuelle de la filière considérée.

Indicateurs :

- Probabilité de relâchements différés de substances nocives dans la biosphère, appréciation: grande, moyenne, faible, nulle.
- Ampleur des conséquences d'un tel relâchement, appréciation: grande, moyenne, faible, nulle.
- Durée de la menace potentielle: très long terme (> 1000 ans), long terme (100 ans à 1000 ans), moyen terme (< 100 ans).

Critère : "Importance des risques autres que sanitaires légués aux futures générations"

- **Définition :**

Evaluation de l'importance des risques autres que sanitaires que fait courir aux générations futures l'exploitation actuelle d'installations appartenant à la filière considérée.

- **Echelle :**

Appréciation : grande, moyenne, faible, nulle.

- **Hypothèses :**

Mis à part d'éventuels problèmes sanitaires, l'exploitation intensive d'une filière de production d'électricité peut être la cause de perturbations importantes et de longue durée du milieu ambiant, avec des conséquences éventuellement sérieuses sur les conditions de vie des générations futures. Il s'agit essentiellement (voir "indicateurs") de modifications plus ou moins irréversibles des conditions physico-chimiques régnant sur Terre (modification de la composition de l'atmosphère, altération des sols, acidification des lacs, pollution maritime), de disparition d'espèces animales ou végétales, ou de destruction de matières premières de grande valeur formées dans les temps géologiques (ces divers effets n'étant bien entendu pas complètement indépendants).

Indicateurs :

- Risque à long terme de modifications des conditions physico-chimiques régnant sur Terre: grand, moyen, faible, nul.
- Risque à long terme de destruction massive d'espèces animales ou végétales: grand, moyen, faible, nul.
- Risque d'épuisement de ressources naturelles de grande valeur: grand, moyen, faible, nul.

Classe : "Socio-économie et socio-politique"

Critère : "Impacts macro-économiques"

- Définition :

Qualification des impacts de type macro-économique découlant de l'utilisation de la filière considérée.

- Echelle :

Appréciation : très positifs, globalement positifs, inexistants, globalement négatifs, très négatifs.

- Hypothèses :

Ce critère est essentiellement basé sur deux types de considérations (voir "indicateurs"): impact sur le marché suisse de l'emploi et apport à la "culture technico-scientifique" du pays (avec retombées éventuelles sur d'autres activités non énergétiques).

Indicateurs :

- Impact sur le marché suisse de l'emploi (nombre et qualité des emplois créés): très positif, positif, nul, négatif, très négatif.
- Apport à la "culture technico-scientifique": très grand, grand, moyen, faible, très faible.

Critère : "Acceptation sociale"

- Définition :

Evaluation du degré d'acceptation de la technologie considérée par le public.

- Echelle :

Appréciation : très bonne, bonne, moyenne, faible, très faible.

- Hypothèses :

Le degré d'acceptation d'une technologie par le public dépend à l'évidence de nombreux facteurs qui ne sont pas toujours faciles à cerner. La manière dont la population perçoit les risques liés à la technologie considérée (cette perception pouvant être très différente de l'évaluation "objective" prise en compte dans la classe "risques") joue certainement dans ce domaine un rôle essentiel. Parmi les facteurs "socio-culturels" qui influencent cette perception, on peut retenir (voir "indicateurs") : la compréhension des phénomènes mis en jeu, la familiarité avec le type de danger concerné (un danger familier apparaît moins "effrayant" qu'un danger mal connu), l'ampleur supposée (dans le temps et l'espace) des conséquences d'un accident grave, la "dimension humaine" attribuée à la technologie, la confiance accordée aux responsables de la technologie en question et à la maîtrise qu'ils ont de leurs installations.

Indicateurs :

- Compréhension des phénomènes mis en jeu: grande, moyenne, faible.
- Familiarité avec le type de danger concerné: grande, moyenne, faible.
- Ampleur supposée des conséquences d'un accident grave: faible, moyenne, grande, catastrophique.
- "Dimension humaine" attribuée à la technologie: forte, moyenne, faible.
- Confiance accordée aux responsables: grande, moyenne, faible.

Critère : "Compatibilité avec le cadre politique, législatif et administratif suisse"

- **Définition :**

Evaluation du degré de compatibilité de la filière considérée avec les décisions politiques et les dispositions législatives et administratives prises en Suisse dans le domaine énergétique.

- **Echelle :**

Appréciation : très grande, grande, moyenne, faible, nulle.

- **Hypothèses :**

Ce critère prend en compte divers indicateurs (voir ci-dessous) qui doivent permettre d'apprécier dans quelle mesure la mise en oeuvre et l'exploitation d'installations de la filière considérée s'inscrivent favorablement dans le cadre défini par les dispositions existantes, ou annoncées pour les prochaines années, sur les plans politique, législatif ou administratif.

Indicateurs :

- Soutien étatique: très positif (=> subventions ou autres mesures d'encouragement), plutôt positif (=> appui "moral", sans intervention directe), plutôt négatif (dissuasion "verbale"), très négatif (=> taxes de dissuasion ou autres mesures contraignantes).
- Influence de groupes de pression ("lobbies"): fortement positive, peu importante, fortement négative.
- Marge de manoeuvre des promoteurs dans le cadre législatif: importante, limitée, faible, nulle.
- Politique officielle d'information du public: bonne (=> l'information existe et est crédible), moyenne, mauvaise (=> l'information est insuffisante et/ou peu crédible).

4. BASE DE DONNEES INFORMATISEE

4.1 Principes généraux

Une base de données est un ensemble intégré de données modélisant un univers donné. A une base de données est associé un schéma, appelé schéma conceptuel, qui décrit la structure et le type des données qu'elle contient et éventuellement quelques règles qui doivent toujours être vérifiées. Ce schéma est indépendant des aspects physiques du stockage des données et offre une vision globale de la base de données. La base de données est gérée par un système de gestion dont les principaux objectifs sont les suivants:

- description de la base de données,
- manipulation de la base de données,
- maintien de l'intégrité des données,
- gestion de l'intégrité des transactions,
- concurrence d'accès,
- sécurité et contrôle d'accès.

La base de données utilisée dans le cadre de cette étude, "Paradox", appartient à la catégorie des bases de données relationnelles; celles-ci permettent une représentation tabulaire aussi bien des objets que des associations entre les objets (réaliser un modèle relationnel consiste à établir des liens entre différents fichiers comportant au moins une information commune). Ce schéma est principalement caractérisé par la simplicité de la représentation des données et la puissance des opérateurs de manipulation des données. Le choix du logiciel "Paradox" parmi les produits sortis récemment sur le marché de l'informatique a été effectué essentiellement en raison de sa disponibilité sur PC et de sa convivialité; la version de "Paradox" qui a été utilisée offre un système performant de gestion de base de données (SGBD) - rapidité d'exécution, gestion des liens entre tables, etc. Dans un premier temps et compte tenu de l'utilisation envisagée, nous en sommes restés à une programmation simple des tables de données (structure matricielle de type "Variantes x Critères"). Celles-ci pourront aisément être modifiées par la suite si nécessaire.

4.2 Les tables

Définition

Les **tables** sont des tableaux (ou "relations") au sens courant du terme, c.à.d. un ensemble de lignes et de colonnes. Toutes les informations dans "Paradox" sont archivées sous forme de tables dans lesquelles les **catégories d'informations** sont arrangeées en colonnes et les **enregistrements individuels** correspondant à une entité donnée sont placés en ligne. Toute ligne individuelle d'une table peut être présentée sous forme d'une **fiche** contenant la même information mais arrangée différemment.

La différence entre une table de ce type et un tableau au sens "informatique" du terme est que l'accès à une ligne ou une colonne ne se fait pas à l'aide d'un numéro d'ordre; elle s'obtient en donnant le nom de la ligne et en spécifiant l'information cherchée correspondant à la colonne souhaitée. Ce système est donc très facile à utiliser par un néophyte.

Création des tables

Une table "type" a été créée: sa duplication permet de rendre plus rapide la création d'autres tables ainsi que l'entrée des données, leur modification, etc. Différentes "relations" (ou tables) ont été établies :

- La première table ("Ref") donne les références qui ont été utilisées pour recueillir les données. Le nom et l'adresse professionnelle des personnes à l'origine des documents de référence y sont indiqués.
- La deuxième table ("Indic") établit la liste des critères/indicateurs.
- La troisième table ("Matrice") fournit la matrice d'évaluation "finale", récapitulant l'ensemble des données enregistrées.
- Enfin, différentes tables de travail (étapes de calcul, conversion dans les unités voulues, etc.) sont également disponibles.

Une liste des tables disponibles peut être obtenue en tapant la touche "retour" après avoir sélectionné la fonction "Vue" du menu principal (voir section ci-dessous).

4.3 Accès à la base de données

Matériel nécessaire

Le logiciel est exploitable sur matériel informatique compatible PC XT, AT ou PS/2. La société BORLAND qui commercialise ce produit préconise un lecteur 360 Ko et 1,7 Mo sur disque dur (avec coprocesseur), la mémoire vive nécessaire étant de 640 Ko. Les tables créées peuvent cependant être exportées sous des systèmes différents, notamment sur matériel de type "Macintosh".

Le langage SQL

L'utilisateur peut agir sur les données au moyen d'un langage approprié (langage SQL dans le cas du logiciel "Paradox") offrant les possibilités suivantes :

- description des données: le langage permet de décrire les données et leurs relations ainsi que les contraintes qu'elles doivent respecter;
- manipulation des données: le langage permet l'accès aux données pour la consultation, le stockage et la mise à jour à partir des programmes d'application;
- interrogation aisée des données.

Accès aux données

Une caractéristique des bases de données relationnelles est que les deux aspects "programmation" et "utilisation" sont peu dissociés.

Aspect "programmation"

Les différentes opérations possibles de l'algèbre relationnelle sont:

- la sélection : elle permet d'extraire du contenu du tableau, les lignes répondant à une condition;
- la projection: il s'agit de retenir dans un tableau certaines colonnes désignées;
- la composition: elle autorise la production d'un nouveau tableau, composé de colonnes appartenant à plusieurs tableaux d'origine.

Aspect "utilisation" (menu)

Le système de gestion de la base de données est relativement facile à utiliser grâce à un menu convivial. Pour obtenir le menu, il faut tout d'abord se placer dans le directoire "paradox2" avec la commande "DOS":

```
C:\> cd paradox2
```

Cette première opération permet de stocker toutes les tables créées avec "Paradox" dans un même directoire et de faciliter ainsi la recherche des fichiers.

On lance ensuite le logiciel en tapant:

```
C:\PARADOX2> paradox2
```

"Paradox" affiche alors le menu suivant, dans lequel l'utilisateur n'a plus qu'à faire son choix!

Vue -> visualiser une table

Requête -> obtenir une feuille d'interrogation pour questionner une table

Etat -> imprimer, concevoir ou modifier une spécification d'état
sous-menus: *Impression / Conception / Modification / Sélection / Paramètres*

Créer -> créer une nouvelle structure de table

Modifier -> éditer/trier ou restructurer une table, saisir des enregistrements
sous-menus: *Tri / Edition / CoEdition / Saisie / MultiEntrée / Restructuration*

Image -> modifier une image, déplacer le curseur ou choisir une fiche
sous-menus: *Hauteur / Largeur / Format / Saut / Déplacer / ChoixFiche / Garder*

Fiches -> concevoir ou modifier une fiche
sous-menus: *Conception / Modification*

Outils -> différents "outils" de manipulation de fichiers
sous-menus: *Renommer / Accélérer / ExplImp / Copier / Supprimer / Info / GstRéseau / +*

? -> aide à l'utilisation de "Paradox"

Scripts -> lancer ou enregistrer un script
sous-menus: *Lancer / CommencerEnregistrement / SauverRequête / Pas-à-pas / Editeur*

Quitter -> quitter "Paradox"
sous-menus: *Non / Oui*

Différentes touches de fonction ont en outre dans "Paradox" une signification bien déterminée:

- F1** -> fournit des informations sur le programme que l'on est en train d'utiliser
- F2** -> exécute l'action que l'on vient de terminer
- F9** -> autorise l'édition
- F10** -> affiche le menu en tout temps
- esc** -> retourne au menu précédent lorsqu'on se trouve dans un sous-menu

5. ANALYSE DES MERITES DES FILIERES PAR CRITERES

Dans ce chapitre, les mérites des différentes filières de production d'électricité retenues dans cette étude sont analysés par rapport à chacun des critères considérés. Une telle analyse "monocritère" ne vise évidemment pas à établir un classement "définitif" ou "absolu" des filières en question mais bien plutôt à mettre en évidence les points forts, ou au contraire les points faibles, de chaque filière lorsqu'on s'intéresse à un critère en particulier.

Ce chapitre est aussi l'occasion de commenter plus en détail les hypothèses qui ont servi de base à l'évaluation des différents critères et de préciser les limites des résultats obtenus compte tenu du caractère "pilote" de la présente étude. Les tableaux d'évaluation correspondants sont regroupés à la fin du présent chapitre (§ 5.31).

5.1 "Diversification géopolitique des réserves" (Tableau 5.1 a)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Pour établir le nombre des principaux pays exportateurs, on a comparé sur une base annuelle la production nationale actuelle de chaque pays à leur consommation propre. Les capacités d'exportation et les besoins propres de certains pays étant mal connus (Pays de l'Est), deux évaluations sont proposées: la première correspondant au nombre de pays exportateurs connus avec certitude et la deuxième (nombre entre parenthèse) représentant le nombre maximal de pays potentiellement exportateurs.

La fraction des réserves situées dans des pays appartenant à l'OCDE a été choisie, de manière quelque peu arbitraire, comme indicateur de la sécurité d'accès aux réserves en question. Les risques de rupture d'approvisionnement peuvent néanmoins être limités par la conclusion de contrats à long terme avec des fournisseurs diversifiés ou par l'établissement d'accords d'assistance mutuelle entre compagnies par exemple.

Dans certains cas, le choix d'un pays fournisseur par la Suisse peut être lié à des qualités physico-chimiques particulières de l'agent énergétique exporté par ce

pays; ainsi, la préférence accordée au pétrole saoudien provient en partie de sa faible teneur en soufre et de la réduction des résidus de transformation essentiellement utilisés comme huile de chauffage dans l'industrie.

Le critère de diversification géopolitique des réserves n'est pas significatif pour les énergies "nationales" que sont l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et celle tirée de l'incinération des déchets; on a donc renoncé à donner une évaluation pour ces énergies dans le Tableau 5.1 (dans l'optique d'une future analyse multicritère, on pourrait néanmoins qualifier d'"absolue" la diversification géopolitique des réserves dans un tel cas, appréciation qui serait alors considérée évidemment comme supérieure à "forte").

b) Analyse des évaluations

Les filières nucléaires et à gaz présentent globalement une plus grande diversification géopolitique des réserves (au sens de la sécurité d'approvisionnement) que les filières utilisant le charbon ou le pétrole. L'avantage du nucléaire provient essentiellement de l'importance des réserves situées dans des pays appartenant à l'OCDE, alors que celui du gaz découle plutôt du nombre de pays exportateurs (à remarquer cependant que seuls ceux qui sont reliés au réseau de gazoducs européens présentent un intérêt pour la Suisse). En ce qui concerne le combustible nucléaire, il convient de remarquer que le nombre de pays disposant de capacité d'enrichissement (nécessaire pour les réacteurs à eau légère du type exploité en Suisse) est très limité mais que ceux-ci, mis à part la CEI (ex URSS) et la Chine, peuvent être considérés comme "sûrs".

Les réserves de pétrole ont l'inconvénient d'être situées très majoritairement hors de la "zone OCDE"; le nombre de pays exportateurs est par contre relativement élevé et cet agent énergétique présente l'avantage de pouvoir être transporté sans problème sur de grandes distances.

Les réserves de charbon sont relativement bien distribuées sur la planète, mais le coût d'extraction élevé de cet agent énergétique et la difficulté de le transporter sur de grandes distances limitent fortement le nombre de pays actuellement exportateurs. Le charbon est donc plutôt réservé à la satisfaction des besoins nationaux dans les pays qui possèdent d'importantes réserves et dans lesquels les coûts d'extraction ne sont pas trop élevés (pays du tiers monde essentiellement).

5.2 "Réserves assurées au niveau mondial" (Tableau 5.2)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Dans le cas des énergies non renouvelables, les quantités de combustibles réellement récupérables dépendent des niveaux de prix, du développement des techniques d'extraction, des conditions géopolitiques et d'autres facteurs encore. Pour cette raison, il est nécessaire de distinguer entre les **réserves prouvées** - c'est-à-dire les quantités de combustibles connues, économiquement et techniquement exploitables dans les conditions actuelles - et les **réserves additionnelles** qui ne répondent pas à ce dernier critère et sont basées uniquement sur des estimations (selon classification du DOE, USA).

Pour qu'il soit possible de les comparer, les valeurs des différentes réserves ont toutes été exprimées en Exajoule (10^{18} Joule), en se basant sur la table de conversion ci-dessous:

1 unité vaut ->	Joule	KWh	W.an	Tep	Tec
Joule	1.000E+00	2.778E-07	3.169E-08	2.342E-11	3.413E-11
KWh	3.600E+06	1.000E+00	1.141E-01	8.431E-05	1.229E-04
W.an	3.156E+07	8.767E+00	1.000E+00	7.391E-04	1.077E-03
Tep	4.270E+10	1.186E+04	1.353E+03	1.000E+00	1.457E+00
Tec	2.930E+10	8.139E+03	9.284E+02	6.862E-01	1.000E+00

et les équivalences suivantes: 1000 m^3 de gaz naturel $\rightarrow 3.63 \cdot 10^{10}$ Joule,
 $1 \text{ tonne d'}\text{U}_3\text{O}_8 \rightarrow 4.70 \cdot 10^{14}$ Joule.

Les valeurs énergétiques des réserves de combustibles fossiles ont été calculées en supposant que les pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) du charbon, du pétrole et du gaz valaient en moyenne mondiale respectivement 29.3 MJ/kg, 43.5 MJ/Kg et ~ 48 MJ/kg. Il est important de relever ici que l'on ne tient pas compte ce faisant de la nécessité de réserver une part de ces réserves fossiles pour des applications non-énergétiques - pétrochimie en particulier - (contrairement au cas de l'uranium par exemple qui n'a guère d'autre utilisation possible que la production d'électricité).

Les données fournies pour les combustibles fossiles datent de l'année 1990 (statistiques BP et OCDE).

Pour l'uranium, seules les réserves correspondant à un coût ne dépassant pas 130 \$/kg U₃O₈ ont été considérées. Or le coût de l'uranium n'intervient que pour une faible part (1 à 3 % seulement) dans le prix de l'énergie produite par voie nucléaire. La hausse du prix de l'énergie produite à partir d'autres sources abaisse ainsi rapidement le seuil d'exploitation économique d'un gisement et conduit à une importante augmentation du volume des réserves (celles-ci croissent en fait sensiblement plus vite que le prix que l'on accepte de payer pour l'uranium). L'évaluation des réserves dépend par conséquent beaucoup plus fortement des hypothèses faites sur le plan économique dans le cas de l'uranium que dans celui des combustibles fossiles.

b) Analyse des évaluations

Les réserves assurées des combustibles fossiles et nucléaires sont suffisantes pour couvrir les besoins mondiaux en énergie pendant encore plusieurs décennies au rythme de consommation actuelle. Il convient cependant de remarquer que cette manière de représenter et de comparer les réserves ne tient pas compte de la croissance attendue de la consommation globale d'énergie, liée à l'évolution démographique et à l'élévation du niveau de vie des populations les moins favorisées, ni de possibles modifications de répartition entre les différents agents énergétiques. Un déplacement de consommation des énergies fossiles vers d'autres agents énergétiques sera pourtant très certainement imposé dans un avenir proche par la nécessité de préserver l'environnement (voir les critères correspondants) d'une part, et par le souci d'éviter un épuisement trop rapide des ressources en ce qui concerne le pétrole et le gaz d'autre part.

En effet, si aucune pénurie n'est à craindre à court et moyen terme pour le charbon (réserves pour plusieurs siècles), la situation est plus critique pour le pétrole et le gaz (quelques décennies de réserves seulement). Il faut à ce propos mentionner les recommandations de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement ("World Commission on Environment and Development", plus connue souvent sous le nom de "Commission Brundtland"). Le concept central sur lequel a planché cette commission est celui d'un "développement soutenable", c'est-à-dire un développement qui tienne compte des nécessités présentes sans compromettre les possibilités des futures générations. Dans ce contexte, la "Commission Brundtland" souligne l'importance d'adapter les taux de consommation et les possibilités de recyclage et d'économie des combustibles fossiles de

manière à ce que ces ressources ne soient pas épuisées avant que des énergies de substitution ne deviennent disponibles.

Il est intéressant de noter à ce propos que les estimations concernant les "années de réserves" de gaz et de pétrole ont eu tendance à croître légèrement durant les vingt dernières années, en dépit de l'importance de la consommation. Il n'en reste pas moins que les stocks géologiques de combustibles fossiles sont par nature limités et que ces ressources finiront par s'épuiser dans un avenir plus ou moins proche quels que soient les efforts de prospection consentis.

La situation des combustibles nucléaires est plus ambiguë. Avec les types de réacteurs commercialisés actuellement, les réserves prouvées d'uranium ne dépassent guère celles du gaz ou du pétrole (tenir compte cependant de la remarque faite plus haut sur le problème du seuil économique d'exploitation des gisements). L'utilisation de réacteurs surgénérateurs, dont un prototype commercial - Superphénix - a déjà été testé en France, permettrait de multiplier ces réserves par un facteur de l'ordre de 50 à 60; l'énergie nucléaire passerait alors nettement en tête des énergies non-renouvelables en ce qui concerne les réserves disponibles. Il convient néanmoins de tenir compte du fait que le taux de croissance d'un parc de surgénérateurs est limité par le "temps de doublement" de ces derniers, c'est-à-dire le temps nécessaire pour générer dans un premier surgénérateur une charge de combustible permettant le démarrage d'un deuxième réacteur du même type. Ce temps de doublement est supérieur à dix ans pour un surgénérateur du type de Superphénix. Il n'est donc possible d'envisager une utilisation optimale des réserves de combustibles nucléaires qu'à la condition d'assurer suffisamment tôt le démarrage d'un programme intégré de surgénérateurs et de "convertisseurs" (réacteurs ayant un meilleur facteur de conversion de matière nucléaire fertile en matière fissile que les réacteurs actuels); les retards dans ce domaine ne pourront que difficilement être rattrapés. A noter que dans un tel système, l'appoint de combustible se fait uniquement en uranium naturel ou appauvri, ou en thorium, et qu'il n'est plus nécessaire d'avoir recours à l'enrichissement de l'uranium; il en résulte une économie appréciable en investissement et en énergie.

La notion de "réserves" n'a, évidemment, pas de sens pour les énergies renouvelables. Afin de permettre un traitement ultérieur par une approche multicritère, on pourrait attribuer une valeur infinie aux réserves correspondant aux énergies de ce type dans le tableau 5.2.

5.3 "Potentiel suisse exploitable" (Tableau 5.1 b)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'évaluation de cet indicateur est délicate car la notion de "potentiel exploitable" peut évidemment prêter à des interprétations très divergentes. Le point de vue adopté dans cette étude a été celui du "réalisme", essentiellement basé sur l'inventaire des sites raisonnablement envisageables pour de nouvelles installations et le cas échéant sur la prise en compte des limites imposées par la capacité des réseaux de transport, plutôt que celui d'une approche "maximaliste" qui aurait cherché à déterminer une borne supérieure des puissances théoriquement installables en Suisse pour chacune des filières considérées. Il convient de préciser que les évaluations données dans le tableau 5.1 ne tiennent pas compte de la modernisation possible des centrales thermiques déjà en fonctionnement, alors que les chiffres fournis pour les centrales hydrauliques prennent en compte les améliorations pouvant être apportées aux anciennes installations.

b) Analyse des évaluations

Pour le charbon, trois sites ont été retenus sur la base d'une étude de l'EOS: Plaine de Magadino (TI), Plaine de l'Orbe (VD), canton de Bâle ou d'Argovie; chacun de ces sites pouvant accueillir une installation d'une puissance de l'ordre de 300 MWe. Dans une optique de substitution du pétrole, on peut ajouter aux 900 MWe considérés ci-dessus la puissance des centrales thermiques existantes qui pourraient éventuellement être converties au charbon; ce potentiel "charbon" supplémentaire a été estimé dans cette étude à 400 MWe environ (soit grossièrement la moitié de la puissance thermique totale déjà installée en Suisse). En supposant un facteur de charge de 0.80, la production de l'ensemble de ces installations se monterait donc à:

$$1300 \cdot 10^6 \text{ W} \times 3.1536 \cdot 10^7 \text{ s/an} \times 10^{-12} \text{ TJ/W.s} \times 0.8 = 3.3 \cdot 10^4 \text{ TJ/an}$$

Avec un tonnage maximal de 1500 t de charbon par train en Suisse, le transport du combustible nécessaire représenterait une moyenne de quelque 5 trains de marchandise supplémentaires par jour, ce qui ne devrait pas poser de problèmes insolubles aux CFF (efficacité des centrales: 40%; PCI du charbon: 29.3 MJ/kg):

$$1300 \cdot 10^6 \text{ W} \times 0.8 \times 8.64 \cdot 10^4 \text{ s/jour} / (0.40 \times 29.3 \cdot 10^6 \text{ J/kg} \times 1500 \cdot 10^3 \text{ kg/train}) = 5 \text{ trains/jour}$$

Etant donné qu'il est toujours techniquement possible d'envisager l'installation d'une centrale au fioul sur un site convenant à une centrale au charbon, on admettra que les limites de puissances "installables" données dans le cas précédent s'appliquent aussi au cas du pétrole. Il paraît par contre peu raisonnable d'envisager que le combustible nécessaire puisse être transporté dans ce cas autrement que par oléoduc. Sachant qu'en 1990 4.764 millions de tonnes de produits pétroliers ont été acheminés par les oléoducs menant en Suisse et que cette quantité représente 42.2% de la capacité autorisée de ce système de transport, on peut évaluer la capacité résiduelle maximale qui pourrait être utilisée pour alimenter de nouvelles centrales au fioul (efficacité des centrales : 40%; PCI du mazout: 43.5 MJ/kg):

$$4.764 \cdot 10^9 \text{ kg/an} \times 43.5 \cdot 10^{-6} \text{ TJ/kg} \times 0.40 \times (100.0 - 42.2) / 42.2 = 1.14 \cdot 10^5 \text{ TJ/an}$$

La réserve de capacité de transport par oléoduc paraît donc être suffisante pour acheminer le combustible nécessaire aux trois nouvelles centrales au fioul de 300 MWe chacune envisagées ci-dessus.

D'après une estimation de la revue "CH+" la puissance cumulée des centrales électriques fonctionnant au gaz qui pourraient être mises en service en Suisse se monte à 2000 MWe (capacité de transport maximale du réseau haute pression: 3000 MWe).

La puissance installée actuelle des centrales nucléaires helvétiques atteint environ 3000 MWe (Beznau I + II: 2 x 350 MWe, Mühleberg: 320 MWe, Gösgen: 940 MWe, Leibstadt: 990 MWe). D'après diverses évaluations (estimations de l'EOS, études "Réacteurs-2000" de l'EPFL et du PSI, etc.), on pourrait envisager l'installation en Suisse de 4000 MWe supplémentaires au maximum, soit un total exploitable de 7000 MWe. Pour rester dans le cadre d'hypothèses "réalistes", nous admettrons cependant que seule la moitié de cette capacité supplémentaire - soit 2000 MWe (2 centrales LWR de 1000 MWe par exemple) - aurait des chances réelles d'être mise en service dans l'intervalle de temps retenu pour cette étude. Le transport du combustible ne présente aucun problème dans le cas de l'énergie nucléaire en raison de la forte densité énergétique de l'uranium et du plutonium (les masses à transporter restent en toute hypothèse faibles).

La capacité d'incinération des déchets et ordures en Suisse est estimée à 3 millions de tonnes par an. En supposant un PCI moyen de 13 MJ/kg et une efficacité de

transformation de l'ordre de 20%, la quantité maximale d'énergie électrique qui pourrait être produite annuellement de cette manière serait de:

$$310^9 \text{ kg} \times 13 10^6 \text{ J/kg} \times 0.2 \times 10^{-12} \text{ TJ/J} = 7800 \text{ TJ/an}$$

Cette valeur semble néanmoins un peu élevée; des évaluations plus réalistes situent plutôt cette production autour de 4000 à 4500 TJ/an.

Les statistiques des années passées indiquent que l'énergie électrique produite par les installations hydrauliques helvétiques (toutes filières confondues) oscille entre 120000 et 135000 TJ/an environ. La fraction de cette énergie produite par les usines au fil de l'eau est légèrement supérieure à 40% (43% durant l'année hydrologique 1989-1990), le solde étant fourni par les installations utilisant des bassins d'accumulation ou celles faisant appel au pompage-turbinage. Les possibilités de réaliser en Suisse de nouveaux aménagements hydrauliques d'une certaine importance sont pratiquement limitées aux centrales actuellement en construction comme Martina (Basse Engadine, 80 MWe), Ilanz I (34 MWe), Ilanz II (48.5 MWe), etc. La production moyenne de ces nouvelles installations devrait atteindre près de 3000 TJ/an. En ce qui concerne les petits aménagements (mini- et micro-centrales), on évalue entre 1120 à 1500 MWe la puissance supplémentaire qui pourrait être installée, ce qui correspond à une production électrique d'environ 13000 à 16000 TJ/an. Le potentiel hydraulique supplémentaire serait donc de 16000 à 19000 TJ/an; la production hydraulique totale atteignant dans ces conditions 135000 à 145000 TJ/an environ.

Avec les rendements actuels des panneaux photovoltaïques et selon le site considéré, on peut évaluer la production annuelle d'électricité entre 50 et 100 KWh par m² de terrain disponible. Sur la base de généreux recensements de sites, les promoteurs de l'énergie solaire estiment que la somme des surfaces disponibles et intéressantes en Suisse serait de l'ordre de 50 km². Il ne paraît cependant pas réaliste d'imaginer que plus de 10 à 15 km² puissent être équipés à l'horizon de temps considéré. La production correspondante d'électricité d'origine photovoltaïque pourrait ainsi atteindre au maximum:

$$15 10^6 \text{ m}^2 \times 75 10^3 \text{ Wh/m}^2.\text{an} \times 3600 \text{ s/h} \times 10^{-12} \text{ TJ/Ws} = 4000 \text{ TJ/an}$$

Pour ce qui concerne les centrales héliothermiques, les évaluations de la puissance maximale installable se situent autour de 3000 à 4000 MWe. Avec une durée

d'utilisation comprise entre 1000 et 3000 h/an, l'énergie électrique produite serait au plus de:

$$4000 \cdot 10^6 \text{ J/s} \times 3000 \text{ h/an} \times 3600 \text{ s/h} \times 10^{-12} \text{ TJ/J} \approx 4500 \text{ TJ/an}$$

L'énergie solaire pourrait donc fournir en Suisse un total d'environ 8500 TJ par an d'énergie électrique (valeur maximale).

L'absence de données statistiques complètes et détaillées sur les conditions anémométriques locales rend difficile l'évaluation précise du potentiel éolien pour l'ensemble de la Suisse. On estime néanmoins que celui-ci pourrait être de l'ordre de 150 GWh/an, soit 540 TJ/an. A noter que les vents dans notre pays sont rarement constants en direction et surtout en vitesse, ce qui joue un rôle très important dans l'énergie que peut produire une éolienne puisque la puissance utile d'une telle installation varie comme le cube de la vitesse du vent (formule de Betz).

Pour évaluer en termes absolus ce que représente le potentiel de production d'énergie électrique des différentes filières examinées, il faut se rappeler que la demande suisse en énergie électrique avoisine actuellement 180000 TJ/an (50000 GWh/an). Il est évident que cette demande continuera, dans l'avenir comme aujourd'hui, à être couverte en priorité par l'exploitation de notre potentiel hydro-électrique. Ce potentiel est cependant insuffisant et ne peut être augmenté de manière significative comme le montrent les évaluations faites plus haut. Il est donc indispensable de compléter cette production en recourant à d'autres sources d'énergie primaire. Du point de vue du potentiel suisse exploitable, l'énergie nucléaire paraît la mieux placée pour jouer ce rôle, même si une combinaison des énergies non renouvelables dites "classiques" (charbon, pétrole et gaz) pourrait aussi être en principe envisagée sur la base de ce critère. A l'horizon de temps considéré, l'apport des énergies renouvelables autres que l'énergie hydraulique ne semble par contre pas être en mesure de pouvoir couvrir plus de quelques pourcents (< 10%) des besoins.

Il est important de noter dans ce contexte que la consommation suisse d'électricité n'a cessé d'augmenter ces dernières années (plus de 2% par an), alors même que l'on constatait dans le même temps une stabilisation de la consommation globale d'énergie.

5.4 "Facilité de stockage au niveau national" (Tableau 5.3)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'évaluation de ce critère est en principe basée sur trois indicateurs: volume spécifique à stocker (m^3/TJ), capacité de stockage annuel en Suisse (TJ) et coût du stockage (Fr/TJ). Les volumes spécifiques à stocker ont été calculés sur la base des masses volumiques et des pouvoirs énergétiques des différents combustibles. Pour l'énergie hydraulique, le volume unitaire à stocker dépend évidemment de la hauteur de chute de l'eau accumulée; dans le tableau 5.3 on a pris pour les calculs une hauteur arbitraire de 100 m. L'énergie solaire et l'énergie éolienne n'étant pas stockables en tant que telles (les systèmes de stockage que l'on est pratiquement obligé d'associer aux installations de ce type font appel à d'autres énergies, énergie potentielle hydraulique ou chaleur emmagasinée par exemple), on ne donnera pas pour ces deux cas d'évaluations des indicateurs correspondant. Dans le cadre de cette étude pilote, il n'a malheureusement pas été possible d'obtenir des données fiables sur les coûts de stockage.

b) Analyse des évaluations

Les données utilisées pour calculer les volumes spécifiques à stocker (voir tableau 5.3) sont les suivantes:

Agent énergétique	Masse volumique (kg/m^3)	Pouvoir énergétique (MJ/kg)
Charbon	900	23.0 à 34.0
Mazout	850 à 950	33.0 à 47.0
Gaz naturel (pression norm.)	0.7 à 0.8	45.0 à 53.0
Nucléaire (U enrichi)	18000	2.00E+06 à 4.00E+06
Hydraulique (chute = 100 m)	1000	9.81E-04

Pour stocker localement le gaz naturel on peut utiliser des réservoirs sous pression de forme sphérique où l'on comprime le gaz jusqu'à 35 bars; le volume à stocker passe alors de $30000\ m^3/TJ$ à $1000\ m^3/TJ$ environ. Il est également possible de stocker le gaz sous forme liquide (GNL), à pression atmosphérique, dans des réservoirs isolés; le volume à stocker est alors environ 600 fois moindre ($45\ m^3/TJ$).

On évalue les possibilités de stockage de charbon en Suisse à l'équivalent de 8 à 12 mois de production des centrales thermiques existantes (production annuelle de l'ensemble des centrales thermiques suisses en 1989: ~1000 GWh), ce qui donne une fourchette de 670 à 1000 GWh, ou 2400 à 3600 TJ.

Pour le pétrole, les possibilités de stockage sont un peu inférieure - de 6 à 8 mois de production - ce qui correspond à une fourchette de 1800 à 2400 TJ.

Il n'existe pas pour l'instant de possibilité de stocker le gaz naturel à grande échelle en Suisse même. Nous avons cependant admis que la part de la capacité de stockage du gisement d'Etrez (Jura français) attribuée par contrat à la société GAZNAT pouvait être considérée comme un stockage "national". La quantité de gaz naturel mise ainsi à disposition de la Suisse représente l'équivalent de 100 millions de m³ de gaz aux conditions normales. Pour des raisons techniques (nécessité de maintenir un certain "coussin de gaz"), seule la moitié de cette capacité est en fait utilisable; avec une efficacité thermodynamique de 40% et un PCI du gaz naturel aux conditions normales égal à 40 MJ/m³, l'équivalent d'énergie électrique ainsi stocké se monterait à:

$$50 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \times 48 \text{ MJ/m}^3 \times 10^{-6} \text{ TJ/MJ} \times 0.40 = 960 \text{ TJ}$$

Cela suppose bien entendu que l'ensemble de cette capacité de stockage soit réservée exclusivement à la production d'électricité (ce qui n'est évidemment pas son objectif premier).

Les centrales nucléaires en exploitation en Suisse ont généralement en stock l'équivalent d'une recharge annuelle de combustible; elles pourraient donc continuer à fonctionner pendant environ deux ans en cas de difficultés d'approvisionnement, ce qui permettrait de fournir environ 43000 GWh ou 155000 TJ d'énergie électrique. Il faut remarquer à ce propos qu'il serait très facile de prévoir la création de stocks de combustible nucléaire correspondant à plus d'une recharge annuelle si l'on sait qu'une centrale nucléaire de 1000 MWe par exemple n'utilise annuellement que 30 t de combustible (uranium légèrement enrichi).

Selon des statistiques de l'OFEN, la capacité des bassins d'accumulation représente un équivalent de 8390 GWh/an, soit environ 30000 TJ d'énergie électrique.

En ce qui concerne les déchets, le volume à stocker représente 1/600 à 1/400 de m³ par kWh produit. En 1980, les 19 installations d'incinération de déchets avec valorisation de la chaleur produite existant en Suisse disposaient d'une capacité de stockage totale de 1836000 m³. En l'an 2000 la loi prévoit que l'ensemble des installations d'incinération (une cinquantaine actuellement) devra valoriser la chaleur produite; on peut ainsi compter sur une capacité de stockage potentiellement utilisable pour la production d'électricité de l'ordre de 3 millions de m³ au début du siècle prochain, soit l'équivalent de 1200 à 1800 GWh ou 4300 à 6500 TJ (électrique).

En résumé, il est clair que l'énergie nucléaire présente du point de vue des facilités de stockage un avantage écrasant comparé aux autres agents énergétiques. Parmi les énergies fossiles, le gaz est pénalisé par l'importance des volumes à stocker (ou la nécessité de prévoir des stockages sous haute pression). Le stockage de l'eau dans des bassins d'accumulation permet de "mettre de l'énergie en réserve" de manière relativement facile, même si les volumes à stocker sont là encore très importants. Nous avons déjà signalé que les autres énergies renouvelables ne pouvaient être stockées en tant que telles, si l'on excepte les possibilités, relativement limitées, offertes par la combustion des déchets.

5.5 "Maturité technique" (Tableau 5.4 a)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'évaluation de ce paramètre est basée sur le niveau de développement atteint par les installations actuellement en service. Nous avons renoncé dans cette étude à faire des pronostics sur le niveau de développement que pourraient atteindre les filières retenues à l'horizon de temps considéré en raison de la difficulté de prévoir une telle évolution; celle-ci dépend en effet bien souvent de critères non seulement techniques mais aussi économiques ou politiques de nature très incertaine.

b) Analyse des évaluations

Mis à part les piles à combustible, les réacteurs à haute température et surgénérateurs et les installations solaires, la majorité des filières retenues ont atteint le stade commercial et peuvent donc être considérées comme présentant une grande maturité technique.

5.6 "Facilité de mise en oeuvre" (Tableau 5.5)

a) Conditions et limites de l'évaluation

S'il est relativement facile de caractériser qualitativement le type d'infrastructure nécessaire pour la construction ou le démantèlement d'installations appartenant à une filière donnée, il est par contre plus délicat de donner des chiffres précis sur les temps requis pour ces opérations (en ce qui concerne les grandes installations tout au moins). Ces temps peuvent varier considérablement en fonction de conditions locales et/ou temporaires. On sait d'autre part qu'ils sont généralement nettement plus longs en Suisse que dans bien des pays qui nous entourent en raison des particularités de notre système politico-légal. Les marges d'évolution sont donc importantes; il est d'autre part difficile dans ce contexte d'évaluer la durée de telles opérations pour des filières qui n'ont encore jamais fait l'objet de réalisations (ou de démantèlements) dans notre pays.

b) Analyse des évaluations

Pour évaluer les temps de construction en Suisse de centrales thermiques traditionnelles, on peut prendre comme référence les 38 mois de travaux de la centrale de Chavillon (300 MWe). Il paraît donc raisonnable d'envisager des durées de construction s'étendant entre 24 et 60 mois pour des centrales de puissances comprises entre 80 et 600 MWe; 6 à 12 mois devraient être suffisants pour les opérations de démantèlement. Des durées de construction de 9 à 18 mois et de démantèlement de 4 à 9 mois semblent être raisonnables pour des centrales industrielles. Les durées correspondantes sont encore inférieures pour les installations utilisant des moteurs ou des turbines.

Les durées de construction des centrales nucléaires suisses ont passé de moins de 4 ans pour Beznau II (1968-1971, 350 MWe) à près de 12 ans pour Leibstadt (1974-1985, 990 MWe). Pour des centrales de la taille de cette dernière, la moyenne européenne se situe néanmoins plutôt entre 6 et 8 ans. Nous avons donc admis une fourchette variant de 6 à 10 ans pour la durée de construction probable de futurs réacteurs nucléaires en Suisse (quel que soit le type de réacteur considéré, en supposant la puissance comprise entre 600 et 1200 MWe). Une étude de "l'Association suisse des chefs de centrales nucléaires" évalue entre 6 et 9 ans la durée de démantèlement proprement dite des centrales nucléaires helvétiques. Selon l'hypothèse la plus

probable, le démantèlement sera précédé d'une période d'attente de l'ordre d'une trentaine d'années pour simplifier les opérations et réduire la dose collective résultante; c'est celle que nous retiendrons dans cette étude (à noter que les coûts engendrés par la surveillance nécessaire de l'installation pendant cette période d'attente sont compensés par les économies faites lors du démontage si l'on compare avec la variante de démantèlement immédiat). Les chiffres donnés ci-dessus supposent un démantèlement total des installations - en d'autres termes la remise du site en son état naturel -, ce qui ne sera pas forcément nécessaire dans la réalité si l'affectation du site à la production d'énergie électrique est maintenue.

Les durées de construction peuvent être très longues pour des aménagements hydrauliques d'une certaine importance. La Grande Dixence par exemple a nécessité plus de quinze années de travaux; des durées de construction encore plus longues ont été enregistrées dans certains cas (Oberhasli, Mauvoisin). La puissance de l'aménagement et les particularités du site choisi jouent évidemment ici un rôle capital. Les évaluations sont encore plus difficiles à réaliser pour les durées de démantèlement car elles dépendent bien entendu fortement du degré de "remise en état" exigé pour le site - que l'on songe par exemple à la difficulté d'effacer toutes traces d'un aménagement du type de la Grande Dixence. Ces remarques peuvent s'appliquer également aux installations solaires ou éoliennes, mais pour des durées de construction et de démantèlement en principe plus réduites (en tenant compte cependant qu'aucune réalisation réellement importante de ce type n'a encore vu le jour en Suisse).

En conclusion, il est clair que les installations nucléaires et les aménagements hydrauliques d'une certaine importance sont ceux qui réclament l'infrastructure la plus importante et les durées de construction ou de démantèlement les plus longues. Il convient néanmoins de remarquer que les infrastructures et le savoir-faire nécessaires existent dans notre pays (de même que les disponibilités en capitaux, ce qui serait un autre point à considérer pour juger de la "faisabilité" d'un projet); le problème ne se pose donc pas dans les mêmes termes pour la Suisse que pour des pays moins développés qui devraient mettre en place la logistique nécessaire avant de pouvoir construire de telles installations. Ces constatations étant a fortiori applicables aux aménagements énergétiques de moindre importance, on en déduit que la facilité de mise en oeuvre ne constitue pas un critère vraiment critique pour le choix d'une filière ou d'une autre au niveau national (il peut en être autrement au niveau d'entreprises ou de collectivités locales).

5.7 "Efficacité énergétique (rendement)" (Tableau 5.6)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'expression "efficacité énergétique" (pour la transformation de l'énergie primaire en énergie électrique) a été préférée ici au terme "rendement", plus couramment utilisé dans ce contexte mais qui devrait en toute rigueur être réservé à l'approche exergétique¹ (un véritable "rendement" ne peut évidemment dépasser la valeur 1, ce qui n'est pas le cas du "rendement énergétique" lorsqu'on applique la définition usuelle à un système mettant en jeu une pompe à chaleur par exemple).

Si la définition de l'efficacité ne pose guère de problème pour les installations thermiques (une fois clarifié le problème de terminologie soulevé ci-dessus), il n'en est pas de même pour les énergies renouvelables. En effet, il n'est pas du tout évident pour celles-ci de définir de manière cohérente ce qu'est "l'énergie primaire"². Le tableau 5.6 donne des efficacités usuelles déterminées à partir des définitions traditionnelles des énergies brute et nette d'un système. Il faut cependant bien être conscient que ces valeurs donnent dans certains cas une idée très inexacte de l'importance réelle des imperfections des installations en question (ce point devrait être revu dans le cadre d'une étude plus approfondie).

b) Analyse des évaluations

Pour les techniques fondées sur l'utilisation des combustibles fossiles, l'efficacité est donnée par l'énergie électrique produite par unité d'énergie fournie sous forme de combustible (sur la base du PCI). Les techniques actuelles de production utilisant des chaudières à combustible fossile ont une efficacité de conversion moyenne de 37%. Ces efficacités n'ont guère été améliorées au cours des dernières années; cela est dû en partie au fait que les limites pratiques fondamentales ont été atteintes.

Les possibilités d'amélioration des techniques classiques fondées sur le charbon sont considérées comme très limitées; des innovations techniques permettraient

¹ Voir à ce propos l'ouvrage "Thermodynamique et énergétique" du Prof. Lucien Borel, Presses Polytechniques Romandes, 1984

² Voir à ce propos l'ouvrage "Energie, économie et prospective" du Prof. André Gardel, Pergamon Press, 1979

éventuellement de faire passer ces efficacité à environ 42% d'ici à 2010. Il faut remarquer cependant que l'efficacité des centrales au charbon a plutôt eu tendance à baisser ces dernières années en raison de l'adjonction de systèmes d'épuration des fumées. Ces systèmes consomment environ 2 à 4% de la production brute d'énergie; en outre, ils accroissent les coûts de fonctionnement et multiplient par près de deux la quantité de déchets solides produits. L'efficacité est également dépendante de la teneur en soufre du charbon; l'emploi d'un charbon à 1% de soufre au lieu de 3% améliore les efficacités de près de 2%. Des constats du même genre peuvent être faits pour les centrales au fioul.

Les techniques fondées sur les turbines à gaz (combustion en lit fluidisé sous pression, cycles combinés, système gazéification/cycles combinés) offrent des perspectives d'évolution relativement importantes sur la période couverte par la présente étude (celles-ci sont prises en compte dans les fourchettes données dans le tableau 5.6). Il semble que les améliorations pour les autres techniques ne devraient par contre être que marginales.

Les piles à combustible sont les systèmes de conversion d'énergies fossiles en énergie électrique qui présentent les efficacités les plus élevées (en raison de la conversion directe de l'énergie chimique en énergie électrique, sans passer par un cycle thermodynamique). L'efficacité pratique des piles à combustible actuelles avoisine les 70%; on s'attend à ce que l'efficacité des piles à hydrogène de conception avancée actuellement étudiées atteigne jusqu'à 80-90%.

L'énergie thermique d'origine nucléaire (fission) conduit en principe à des efficacités comparables à celles des centrales à combustibles fossiles. Les efficacités des réacteurs à eau pressurisée ou bouillante sont cependant limitées à environ 30-33% par le fait que la température de sortie du caloporteur ne peut guère dépasser 300 °C dans ce type de réacteurs en raison de contraintes technologiques. Des températures de sortie du caloporteur nettement plus élevées (de l'ordre de 700 °C) peuvent être obtenues dans les réacteurs à haute température de même que dans les surgénérateurs; ces réacteurs atteignent ainsi des efficacités avoisinant voire dépassant 40%, ce qui les place de ce point de vue au même niveau que les meilleures centrales thermiques "conventionnelles".

La qualité relativement médiocre du combustible utilisé limite les efficacités des centrales brûlant des déchets à des valeurs situées entre 20 et 25%.

L'efficacité globale de la conversion d'énergie hydraulique potentielle ou cinétique en énergie électrique se situe aujourd'hui autour de 80%. Ces valeurs peuvent néanmoins varier de manière importante en fonction de la taille, du type et de l'âge de l'aménagement considéré. Comme pour les autres énergies renouvelables, il s'agit-là du rapport entre l'énergie nette (électricité) fournie par l'installation et l'énergie brute (hydraulique dans le cas présent) disponible en amont de celle-ci; cette dernière ne peut être sans autre assimilée à une énergie primaire ainsi que nous l'avons déjà signalé (en toute rigueur, les efficacités fournies pour les installations thermiques et celles données ici pour les énergies renouvelables ne devraient donc pas être comparées directement).

L'efficacité des cellules photovoltaïques varie de 5 à 25% selon le type de capteur. Cette efficacité diminue légèrement avec la température (de l'ordre de 0.06% par °C); les températures usuelles de fonctionnement correspondent à des échauffements de 20 à 40 °C, c'est-à-dire à une perte d'efficacité de 1 à 2%. Les centrales héliothermiques présentent des efficacités généralement comprises entre 15 et 20%. Des améliorations de l'efficacité sont possibles, par exemple en abaissant la température de condensation, en adoptant une surchauffe intermédiaire ou en prévoyant un préchauffage plus poussé de l'eau d'alimentation.

Les calculs théoriques (formule de Betz) montrent que l'efficacité d'une éolienne - définie comme la puissance maximale théorique pouvant être extraite du vent rapportée à la puissance totale de celui-ci - ne peut dépasser 16/27 ou 59.3%. Les meilleures éoliennes atteignent des efficacités de l'ordre de 40%, c'est-à-dire environ 2/3 de la valeur idéale. Ces efficacités dépendent énormément du type d'éolienne: les éoliennes multi-pales américaines, dont les extrémités des pales tournent pratiquement à la vitesse du vent, ont une efficacité faible (au maximum 30%); les éoliennes à deux pales ou de type Darrieus (axe vertical), qui tournent beaucoup plus vite, atteignent les efficacités maximales signalées plus haut (~ 40%). Les efficacités pratiques sont bien entendu encore réduites par les pertes du système de conversion et de modulation électrique.

Pour terminer cette section, il convient de remarquer qu'une plus haute efficacité signifie qu'il faut moins de combustible par unité d'électricité produite, ce qui réduit par conséquent les émissions polluantes (chimiques et thermiques) spécifiques. Dans ce sens, le critère d'efficacité aurait aussi bien pu être rattaché à la classe des impacts sur l'environnement et la santé.

5.8 "Coefficient de retour énergétique global" (Tableau 5.4 b)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'évaluation de "l'énergie qui doit être investie pour pouvoir produire de l'énergie", c'est-à-dire de celle qui est nécessaire pour fabriquer les équipements de captage et de transformation, est évidemment un critère important pour juger de l'intérêt "énergétique" d'une filière. Une telle évaluation peut en principe être effectuée sur la base du recensement des quantités de matériaux nécessaires pour réaliser ces équipements et d'une estimation de l'énergie investie pour produire une masse unité des matériaux en question. Les données correspondantes ne sont cependant pas faciles à déterminer dans la pratique; de nombreuses hypothèses, souvent discutables, doivent être faites, sur la définition des frontières des systèmes en cause ou sur les conditions de fabrication des matériaux et éléments considérés par exemple. L'énergie qui doit être investie pour le démantèlement des installations n'est en outre en règle générale pas prise en considération. En conséquence, il n'a pas été possible dans le cadre de cette étude pilote de trouver des chiffres réellement cohérents et fiables recouvrant l'ensemble des filières considérées.

Les coefficients de retour énergétique proposés dans le tableau 5.4 sont basés pour les installations hydrauliques, nucléaires et solaires sur des évaluations faites à l'EPFL et à l'Institut Paul Scherrer. A défaut de données plus précises, on a estimé que les filières fossiles devaient avoir des coefficients de retour énergétique proches de ceux attribués aux centrales nucléaires (ce n'est probablement pas déraisonnable en ce qui concerne les unités de production elles-mêmes, mais peut-être plus discutable pour les parts d'énergie liées aux cycles du combustible étant donné les grandes différences qui existent dans ce domaine entre les énergies fossiles et nucléaires).

b) Analyse des évaluations

Les énergies permettant une production "intensive" - fossiles, nucléaires - ont évidemment un coefficient de retour énergétique nettement supérieur aux installations basées sur des énergies très diffuses qui nécessitent un investissement plus grand en matériaux pour être captées. L'excellent coefficient attribué à l'énergie hydraulique résulte essentiellement de la longévité des installations utilisant cette ressource énergétique.

5.9 "Souplesse de production" (Tableau 5.7)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Ce critère fait intervenir différentes considérations ayant toutes trait à l'aptitude des installations des différentes filières à s'adapter aux fluctuations de la charge. Un premier indicateur est donné par le degré de suivi de charge que peut assurer le type d'installation considéré, c'est-à-dire par la possibilité de travailler à des puissances éventuellement très inférieures à la puissance nominale. A noter que la possibilité de suivi de charge ne fait pas intervenir que des questions techniques, mais aussi des critères économiques. Il ne s'agit pas là de donner une valeur précise pour chacune des filières, mais plutôt une valeur caractéristique permettant de situer si cette possibilité est grande, moyenne ou limitée. C'est également le cas pour le taux de variation de la puissance qui donne une évaluation de la rapidité avec laquelle la puissance peut être adaptée à la charge à l'intérieur de la gamme de puissances définie plus haut. Un autre indicateur important pour ce critère est le coefficient de disponibilité de l'installation considérée. Ce coefficient, qui ne fait intervenir que des causes internes de non-disponibilité (incidents techniques), a été préféré au "facteur de charge" qui dépend en plus de circonstances externes et n'est donc pas vraiment spécifique de la filière en cause. Il faut enfin considérer également dans ce contexte le caractère plus ou moins prévisible de la production, lié à la disponibilité en quantité et temps voulus de la source d'énergie primaire. Les possibilités de varier dans une large mesure l'énergie fournie par une filière donnée ne sont donc pas suffisantes pour qualifier une filière de "souple" pour ce qui est de l'adaptation à la demande.

b) Analyse des évaluations

En ce qui concerne les énergies fossiles, il est clair que la souplesse de production dépend de la taille de l'installation considérée; les petites installations offrent en général une plus grande souplesse vis-à-vis de ce critère que les centrales thermiques de fortes puissances (plus pour des raisons économiques que pour des raisons purement techniques d'ailleurs). Les installations de plus faibles puissances (moteurs par exemple) sont souvent utilisées "à la demande", c'est-à-dire qu'elles sont mises en route ou arrêtées selon les besoins; le "suivi de charge" étant alors réalisé en jouant sur le nombre d'installations en service simultanément.

Afin de rentabiliser les importants investissements consentis pour leur construction, les centrales nucléaires sont normalement utilisées en permanence à puissance nominale¹; elles ne sont arrêtées, sauf incidents inattendus, que pour les périodes de révision annuelle (4-5 semaines/an). De ce point de vue, leur souplesse de production est donc très limitée (mais ce n'est pas non plus ce que l'on attend généralement d'installations de ce type). Le coefficient de disponibilité des centrales nucléaires exploitées en Suisse est particulièrement élevé (80-90%); les arrêts non planifiés sont extrêmement rares et le plus souvent de courte durée. Il est intéressant de constater que les réacteurs similaires en service dans d'autres pays n'atteignent en général pas de telles performances.

La souplesse de production des aménagements hydro-électriques avec bassin d'accumulation est évidemment très grande. Cette souplesse est d'ailleurs amplement mise à profit par notre pays pour produire du courant électrique destiné à couvrir les pointes de demande au plan national comme au plan transnational (ce qui constitue dans ce dernier cas une bonne opération économique, l'électricité ainsi produite pouvant être vendue plus chère, quitte à importer du courant à plus bas prix en période de basse consommation pour ménager les réserves d'eau accumulées derrière nos barrages).

Les centrales fonctionnant au fil de l'eau sont plus tributaires des aléas de l'hydraulique des cours d'eau utilisés. Elles se rapprochent en cela des autres installations utilisant des énergies renouvelables, avec cependant des variations de la disponibilité de l'énergie primaire plus étalée dans le temps (le débit d'un cours d'eau varie généralement moins que les conditions d'ensoleillement ou la force du vent).

Les installations solaires ou éoliennes sont, par nécessité, prévues pour fonctionner à des régimes très différents. Elles doivent en effet pouvoir s'adapter au caractère très fluctuant de la source d'énergie utilisée. Cela ne permet pas néanmoins de considérer que ces filières autorisent une grande souplesse de production, bien au contraire; la nature aléatoire de la source d'énergie primaire oblige en fait dans la pratique à associer un dispositif de stockage (qui met obligatoirement en jeu des transformations passant par d'autres types d'énergies) à de telles installations, afin de permettre une production suffisamment continue.

1 En Suisse tout au moins; ce n'est plus forcément le cas en France.

5.10 "Prix de revient de l'énergie produite" (Tableau 5.8)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Le calcul du prix de revient de l'électricité produite par les principales filières utilisées de part le monde fait évidemment l'objet d'une abondante littérature. L'utilisation de ces données dans le cadre de la présente étude présente cependant un certain nombre de difficultés. La première provient du fait que pour pouvoir comparer entre elles des données de sources différentes il est nécessaire de s'assurer que les hypothèses économiques de base - par exemple les taux d'intérêt ou d'actualisation retenus, ou les durées annuelles d'utilisation envisagées - soient bien les mêmes (ce n'est souvent pas le cas). La deuxième difficulté est liée au contexte helvétique de notre étude. Il est en effet délicat d'appliquer sans autre à la Suisse des prix de revient calculés pour des installations situées dans d'autres pays; or nombre des filières considérées n'ont encore fait l'objet d'aucune réalisation "pratique" dans notre pays. On ne dispose pas par conséquent pour les filières en question de données économiques basées sur une expérience nationale. L'horizon de temps retenu pour la présente étude pose également un problème; étant donné la difficulté de prévoir l'évolution des prix pour des matières premières "sensibles" comme le sont souvent les agents énergétiques, on se contentera en règle générale dans cette section de comparaisons basées sur des coûts actuels.

b) Analyse des évaluations

Le tableau ci-dessous permet de comparer la structure type des coûts de production des trois principales familles de centrales thermiques.

Structure des coûts	Agent énergétique		
	Charbon	Pétrole	Nucléaire
Investissement	25-55%	10-25%	55-80%
Exploitation	5-10%	5 %	5-15%
Combustible	40-65%	70-85%	15-30%

On constate immédiatement, comme on peut le vérifier dans le tableau 5.8, que le prix de revient de l'énergie électrique produite par des centrales utilisant des combustibles fossiles est très influencé par le coût du combustible, alors que c'est les coûts d'investissement (et donc les taux d'intérêts) qui jouent le rôle le plus important dans le cas de l'énergie nucléaire. Une étude réalisée en Suisse en vue de l'éventuelle construction d'une centrale de 1000 MWe au charbon évalue à 305 Fr/KW le montant des coûts fixes annuels pour une centrale au charbon et à 7.82 ct/kWh le montant des coûts variables. Les coûts correspondants sont respectivement de 525 Fr/KW et 1.94 ct/kWh pour une centrale nucléaire de même puissance. Ces données permettent de comparer l'évolution du prix de revient de l'énergie électrique produite par chacune des filières en fonction de la durée annuelle d'utilisation (Fig. 5.1). On remarque que la courbe du charbon est plus plate du fait de la part moins élevée des frais d'investissement. Pour des durées d'utilisation standards (4000 h pour le charbon et 6500 h pour le nucléaire), le coût de production du KWh nucléaire en Suisse serait dans ces conditions environ 35% meilleur marché que celui du charbon.

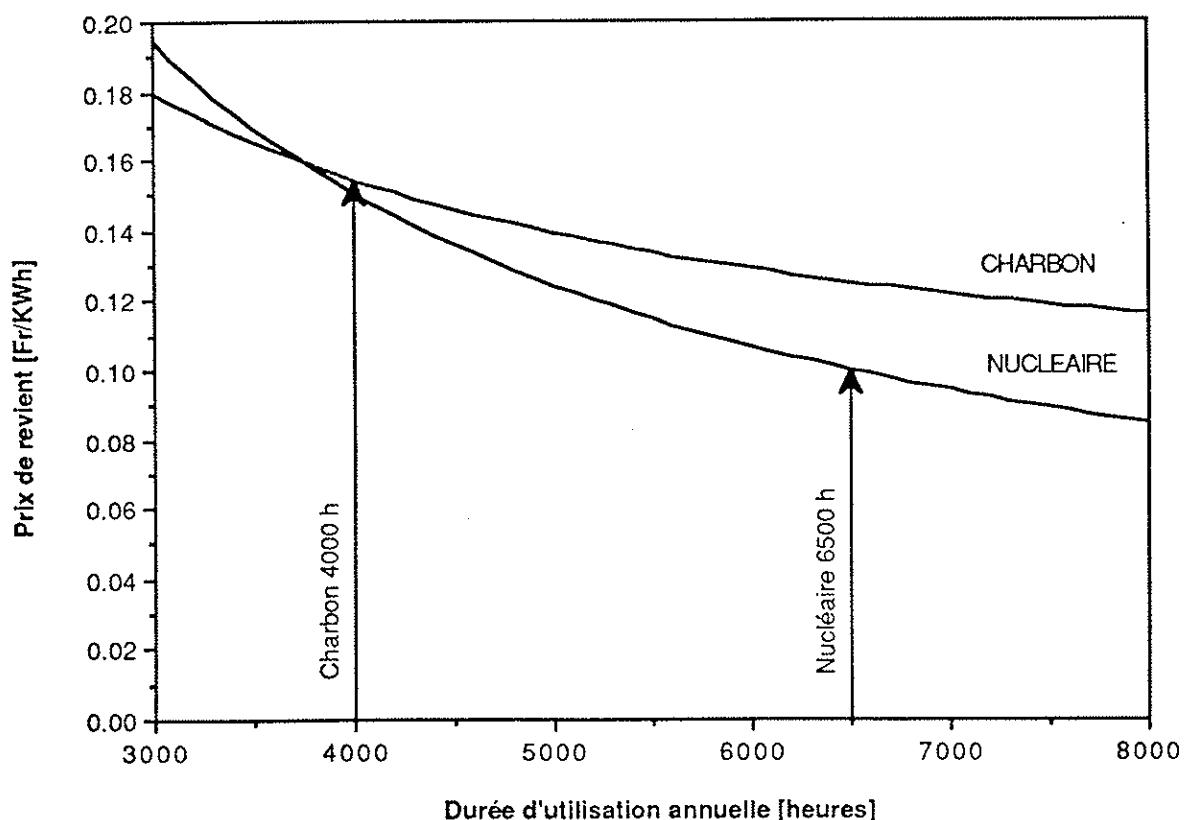


Fig. 5.1 Prix de revient comparés du charbon et du nucléaire en fonction de la durée de fonctionnement annuelle

Il est intéressant de noter que le prix du KWh nucléaire pris pour base dans ce calcul (0.10 Fr/kWh pour une durée annuelle de fonctionnement de 6500 h) est supérieur aux prix moyens de l'électricité produite en 1990 dans les différentes centrales nucléaires helvétiques:

Beznau I et II	:	0.06	Fr/kWh
Mühleberg	:	0.07	Fr/kWh
Gösgen	:	0.06	Fr/kWh
Leibstadt	:	0.091	Fr/kWh

Un doublement du prix de l'uranium n'entraînerait qu'une élévation modeste du coût de production de l'électricité d'origine nucléaire (0.24 ct/kWh dans le cas considéré). Une augmentation de 1% du taux d'intérêt (qui passerait ainsi de 6% à 7%) aurait une influence nettement plus marquée aboutissant à un renchérissement de 1 ct environ du prix de l'énergie produite. Dans le cas du charbon par contre les variations des taux d'intérêt jouent un rôle mineur; c'est le coût du combustible qui est le facteur important comme on l'a vu plus haut.

On ne peut guère envisager la construction en Suisse de centrales au charbon qui ne soient pas équipées de dispositifs de désulfuration des fumées. La solution technique la plus efficace est le lavage de fumées au calcaire; cette solution entraîne un surcoût d'investissement que l'on évalue à 20%. L'injection de chaux dans la chaudière est moins onéreux, mais son rendement est nettement inférieur (60%).

Une étude mandatée par EPRI (Electric Power Research Institute) attribue aux installations de gazéification à cycle combiné un coût de l'électricité produite légèrement inférieur (~ 10-15%) à celui des centrales thermiques au charbon conventionnelles de 1000 MWe.

Les constatations ci-dessus rejoignent celles plus générales d'une étude réalisée en 1990 par un groupe d'experts de l'UNIPED (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique):

- Les équipements nucléaires sont indéniablement les plus compétitifs pour une production en base, quel que soit le scénario de prix des combustibles considéré, pourvu que les ouvrages soient réalisés dans des conditions industrielles

adéquates (pas vraiment remplies en Suisse pour le moment): équipements standardisés, programmation en séries industrielles, plusieurs unités par site.

- Les équipements nucléaires non standardisés, qui présentent des coûts de production plus élevés, gardent cependant une marge de compétitivité vis-à-vis des équipements au charbon; celle-ci devenant toutefois minime si le prix du charbon reste faible à long terme. Par rapport aux cycles combinés au gaz naturel, l'avantage économique n'est plus assuré si les prix du gaz restent faibles ou modérés, ou si le taux d'actualisation est élevé.
- La compétitivité relative des équipements au charbon et des cycles combinés au gaz naturel est fortement dépendante du taux d'actualisation retenu et du scénario de prix considéré. Dans les scénarios haut et moyen de prix des combustibles fossiles, le charbon est plus économique que le gaz naturel, que le taux d'actualisation soit fixé à 5% ou 8%. Dans le scénario bas, les avantages économiques du charbon et du gaz s'équilibrent pour le taux de 5% alors que l'avantage revient au gaz pour un taux de 8%. Si le charbon garde une certaine préférence vis-à-vis du gaz naturel dans le cas d'un fonctionnement en base, l'avantage passe du côté du gaz naturel dès que l'utilisation annuelle se réduit de manière significative (fonctionnement en semi-base).
- Le scénario de bas prix du gaz ne paraît réaliste que si le développement des cycles combinés reste modéré; tout développement important aboutirait à passer aux scénarios de type médian ou haut. On peut résumer cela en disant que les cycles combinés au gaz naturel apparaissent d'autant plus attractifs qu'ils restent limités dans leur développement. Néanmoins, un développement peut être envisagé dans les pays comme la Suisse où le gaz est disponible à prix modéré et où les coûts de production des centrales nucléaires ou au charbon s'avèrent relativement élevés.
- L'imposition éventuelle d'une "taxe sur l'effet de serre", qui frapperait essentiellement le charbon, réduirait sévèrement la compétitivité économique des filières de ce type et pourrait éventuellement conduire à leur abandon généralisé.
- Il faut constater enfin qu'aucun des pays de l'UNIPEDE n'envisage dans le contexte actuel de construire de centrales classiques nouvelles alimentées au fioul; il est donc difficile dans un tel contexte de situer leur compétitivité économique.

L'énergie hydraulique se caractérise par des coûts de production qui varient fortement d'un aménagement à l'autre. L'élément déterminant, abstraction faite des caractéristiques locales et techniques et du mode d'exploitation (charge de base, charge moyenne ou de pointe), est surtout le moment de la construction de l'aménagement. Le taux d'intérêt joue un rôle important et a une influence essentielle sur les coûts de production. L'ampleur des investissements est aussi un paramètre important. Une analyse de la structure des coûts de production montre que pour les aménagements hydro-électriques la majeure partie des coûts est constituée de frais fixes (amortissements, service des intérêts) qui existent indépendamment de la quantité d'énergie produite. Au contraire des centrales au charbon, et même des centrales nucléaires, la part des coûts liés à la production (exploitation, combustible) ne représente qu'un faible pourcentage.

Il n'est pas possible de donner des coûts généralement applicables pour les nouveaux aménagements ou les transformations d'aménagements hydro-électriques (les fourchettes de coûts données dans le tableau doivent être considérées comme des valeurs indicatives). Les formules et les diagrammes en la matière ne peuvent que fournir des points de repère. Les particularités locales, les conditions limites, mais aussi les types d'aménagements, peuvent varier dans une telle mesure que seul un avant-projet permet d'évaluer approximativement les coûts occasionnés par ce genre d'opération. Les coûts de production souvent élevés dans le cas des constructions nouvelles - ils peuvent parfois dépasser les tarifs - ne sont supportables que grâce aux prix mixtes (moyennes entre les aménagements nouveaux et anciens) et parce que l'on construit des aménagements dont l'espérance est de plusieurs décennies pendant lesquelles les coûts de production ne reflèteront que faiblement les effets du renchérissement.

Les techniques fondées sur l'utilisation des autres sources d'énergie renouvelables - centrales héliothermiques, installations photovoltaïques, éoliennes - ont des coûts de production trop élevés pour être réellement compétitives avec les filières "classiques" dans l'état actuel de la technique et du marché. Pour ramener leurs coûts à un niveau plus abordable, d'importants problèmes techniques devront être résolus. Dans les conditions présentes, l'énergie éolienne semble néanmoins être plus avantageuse sur le plan économique que l'énergie solaire; le prix de revient de l'énergie produite dépend cependant étroitement de la fréquence des vents de vitesses suffisamment élevées (3-8 m/s). Le fait que les éoliennes produisent généralement plus d'électricité en hiver qu'en été constitue un atout supplémentaire.

Les installations photovoltaïques sont actuellement trop chères pour envisager sérieusement des réalisations à grande échelle.

Les coûts de production dans les usines d'incinération des ordures doivent être calculés en tenant compte de l'économie réalisée sur le stockage des déchets; c'est une considération à ne pas négliger dans la comparaison avec les coûts de production des autres options.

5.11 "Stabilité des coûts de production" (Tableau 5.9 a)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'évaluation de ce critère est basée sur une appréciation générale tenant compte des différents facteurs mentionnés dans sa définition. Une évaluation plus précise nécessiterait des investigations dont l'ampleur sort du cadre de la présente étude et dont les résultats resteraient en tout état de cause très aléatoires. On peut cependant au moins relever une constante: si les prix de l'énergie ont régulièrement augmenté en valeur absolue au cours de ce siècle, c'est l'inverse qui s'est produit en termes réels (hausse inférieure à celle de l'indice des prix).

b) Analyse des évaluations

L'expérience montre que la "prévision" des prix des combustibles fossiles sur une longue période n'a guère de portée pratique, car des circonstances particulières et imprévisibles peuvent à tout instant invalider les hypothèses faites. En outre, les règlements institutionnels ont une influence sur les prix en question, parfois dans une mesure notable. En bref, il n'y a pas de prix représentatifs uniques pour les divers combustibles fossiles et leurs fluctuations sont difficiles à prévoir sur des bases scientifiques.

En ce qui concerne les charbons, on peut s'attendre à une hausse modérée des prix dans les prochaines années, variable selon leur teneur en soufre (hausse de l'ordre de 1 et 0.5 % par an pour 1 et 3% de soufre respectivement). Etant donné l'importance des réserves et leur large distribution dans le monde, il n'y a a priori aucune raison de penser que le marché de cet agent énergétique puisse subir des tensions particulières dans l'intervalle de temps considéré.

L'évolution du marché pétrolier international est beaucoup plus difficile à prévoir. Les facteurs d'instabilité potentiels, même s'ils ont diminué en importance ces dernières années, restent nombreux. L'influence des nouvelles relations pétro-politiques (mouvement de réintégration croisée, abandon de l'idéologie de la confrontation, domination de l'alliance américano-saoudienne) est encore incertaine et il n'est pas aisés de repérer les conditions dans lesquelles l'approvisionnement pétrolier mondial pourrait connaître ou, à l'inverse, éviter de nouvelles tensions au cours de la prochaine décennie.

Les formules de fixation des prix du gaz sont basées sur l'évolution des prix de l'huile légère et de l'huile lourde. Comme les statistiques correspondantes sont publiées avec un certain retard, et afin d'éviter de trop fortes fluctuations, on prend en fait comme référence les prix moyens sur une période de plusieurs mois (de 3 à 6) précédent de 3 mois par exemple la période d'application. Il en résulte, qu'en règle générale, les prix du gaz suivent avec un certain retard et avec des fluctuations amorties l'évolution des prix des produits pétroliers.

L'électricité d'origine nucléaire ou hydraulique ne devrait pas connaître de grands bouleversements de prix dans les années à venir étant donné que l'on peut en pratique considérer qu'il s'agit dans les deux cas d'énergies "indigènes" (même si ce n'est pas totalement vrai pour l'énergie nucléaire, la part peu importante du combustible dans la fixation des prix de l'énergie produite justifie une telle assertion). Le coût de l'énergie nucléaire reste néanmoins tributaire des fluctuations des taux d'intérêts et de changements de réglementation qui pourraient se répercuter sur les investissements à consentir pour la construction de nouvelles installations ou la mise en conformité d'installations existantes. Pour ce qui est de la production d'électricité à partir des forces hydrauliques, des renchérissements sont déjà intervenus, ou vont intervenir, en raison de l'augmentation des taux maximaux de redevance d'eau (entrée en vigueur le 1er janvier 1986) et de l'abandon des degrés de qualité. Des questions telles que l'augmentation des débits résiduels et l'élévation des primes d'assurance pour les propriétaires de barrage vont dans le même sens.

En ce qui concerne les énergies éolienne et solaire, des améliorations techniques pourraient permettre d'abaisser les coûts d'investissement dans une mesure importante. L'éventualité d'un progrès technique décisif - avec pour conséquence une importante variation des coûts - est en effet nettement plus probable pour des techniques naissantes que pour des techniques éprouvées.

5.12 "Coûts externes" (Tableau 5.9 b)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Une planification réaliste du secteur de l'énergie en général et de l'électricité en particulier ne peut faire abstraction des atteintes à la santé et à l'environnement, qui représentent une composante importante du coût social total de l'offre d'énergie. Ce problème obligera dans l'avenir les décideurs à élargir l'évaluation économique des systèmes et installations énergétiques pour prendre en compte plus systématiquement les coûts encourus au début et à la fin du cycle du combustible. Il faudra faire de nouvelles analyses économiques détaillées des impacts sur la santé et l'environnement dus à la production d'électricité (voir les critères correspondants); l'objectif étant de pouvoir incorporer pleinement ces **coûts externes** dans l'évaluation du coût global de la production d'électricité (c'est-à-dire, en d'autres termes, de les "internaliser"). Cette façon de faire est la seule qui permette d'assurer une affectation économiquement efficace des ressources, de fournir aux consommateurs des signaux appropriés et d'obtenir des recettes pour financer d'une manière "naturelle" les coûts d'amélioration des systèmes. A noter que pour assurer l'utilisation efficace des mécanismes du marché, le principe consistant à inclure les coûts externes dans le calcul des prix devrait s'appliquer non seulement au secteur de l'électricité mais aussi aux autres secteurs énergétiques.

L'internalisation des coûts sociaux devrait être réalisée sur la base des meilleures données scientifiques disponibles, d'hypothèses cohérentes et de méthodes fiables. Dans la pratique, il peut être difficile d'inclure certains coûts ou bénéfices pour l'environnement en raison de problèmes de valorisation. Une évaluation complète des coûts sociaux est en outre pratiquement impossible; ces coûts peuvent être comparés à un iceberg (voir Fig. 5.2) dont seule la pointe est visible et dont une partie est, et probablement restera, de toute manière inaccessible (partie inférieure de l'iceberg sur le dessin).

Il n'existe pas par conséquent de méthodes permettant d'évaluer de manière indiscutable les coûts externes. Ce ne devrait néanmoins pas être une raison pour supposer que ces coûts sont négligeables, comme cela a souvent été fait implicitement dans le passé. Les valeurs fournies dans le tableau 5.9 proviennent essentiellement d'une étude allemande (KNS: Kommission für die Nutzung der Sonnenenergie); ils ne sont donc pas forcément applicables sans autre à la Suisse.

D'autre part, les informations fournies sur la méthodologie utilisée sont insuffisantes pour juger de la cohérence des résultats obtenus et pour apprécier dans quelle mesure ceux-ci sont vraiment comparables à des évaluations plus spécifiques faites par d'autres auteurs.

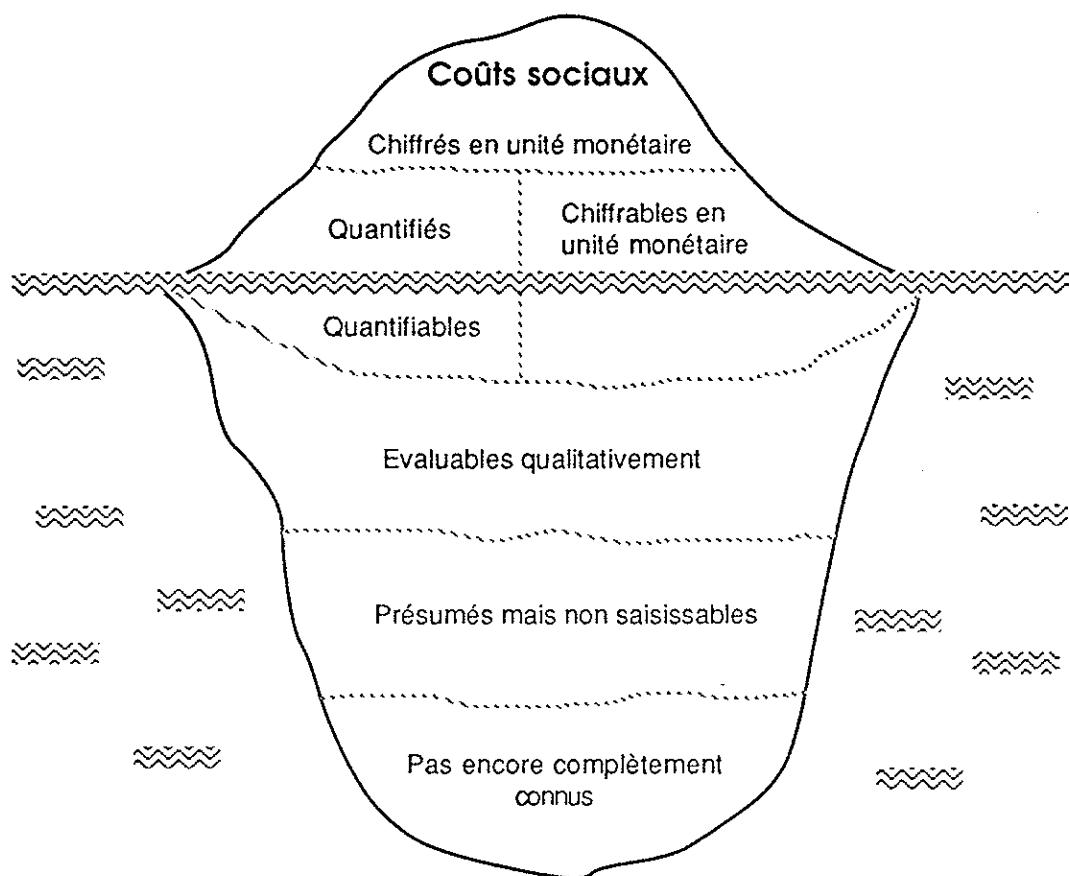


Fig. 5.2 Représentation imagée des coûts sociaux

b) Analyse des évaluations

Compte tenu des limites, déjà signalées, de ce type d'évaluation, les valeurs présentées dans le tableau 5.9 doivent être considérées avec une certaine prudence. Elles tendraient néanmoins à prouver que les coûts externes (ou sociaux) imputables aux différents agents énergétiques considérés ne présentent pas de disparités vraiment importantes. On peut remarquer aussi que l'internalisation de ces coûts reviendrait dans certain cas à doubler pratiquement le prix de revient de l'énergie produite.

5.13 "Importance des rejets polluants" (Tableau 5.10)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Les atteintes à l'environnement provoquées par les systèmes de production/transformation/distribution d'énergie sont nombreuses et diverses. En ce qui concerne les polluants proprement dits, trois grandes catégories peuvent être distinguées:

- *Les polluants principaux* tels que SO₂, NO_x, NMHC (non-méthane-hydrocarbures), ainsi que les polluants secondaires tels l'ozone (O₃);
- *Les polluants spéciaux*, par exemple les métaux lourds, les polluants organiques (polyaromates, dioxine), les émissions radioactives;
- *Les gaz à effet de serre*: CO₂, CH₄, O₃, N₂O et les CFC (composés à base de chlore et de fluor).

Le dioxyde de soufre (SO₂) résulte de la combustion de produits contenant du soufre comme le mazout, l'huile diesel, le charbon. Les NO_x comprennent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂); ils sont synthétisés lors de processus de combustion à hautes températures ainsi que lors des orages, mais aussi par des micro-organismes. Le monoxyde d'azote est oxydé relativement rapidement en NO₂, c'est donc ce dernier qui est utilisé pour qualifier la qualité de l'air en matière d'oxydes d'azote. Les hydrocarbures (HC) sont une appellation générique pour désigner différentes substances organiques très volatiles; celles-ci résultent de la combustion incomplète des carburants et combustibles. L'ozone (O₃) est une substance extrêmement réactive composée de trois atomes d'oxygène; ce polluant secondaire est synthétisé à partir des oxydes d'azote et des hydrocarbures sous l'action de l'énergie lumineuse (des concentrations excessives d'ozone dans l'air produisent ce qu'il est convenu d'appeler le "smog estival"). Parmi les polluants spéciaux, nous nous intéresserons essentiellement à la radioactivité provenant des centrales nucléaires, mais aussi des centrales au charbon. L'impact des gaz à effet de serre sera traité à part (section suivante).

Les pollutions liées à la production/transformation/distribution d'énergie ne se limitent bien entendu pas aux seuls rejets atmosphériques. Le sol et les eaux sont aussi concernés, soit par des rejets directs de matières solides ou liquides, soit indirectement par le transport vers ces milieux de polluants initialement émis dans l'atmosphère (problème des "pluies acides" par exemple).

Pour qualifier l'importance des rejets polluants, on s'intéressera cependant dans la présente étude essentiellement au problème l'atmosphère. Les impacts atmosphériques sont en effet généralement plus critiques que la pollution des eaux ou des sols, comme le montre la figure ci-dessous (adaptée d'un document présenté au colloque d'experts sur l'électricité et l'environnement, Helsinki 13-17 mai 1991).

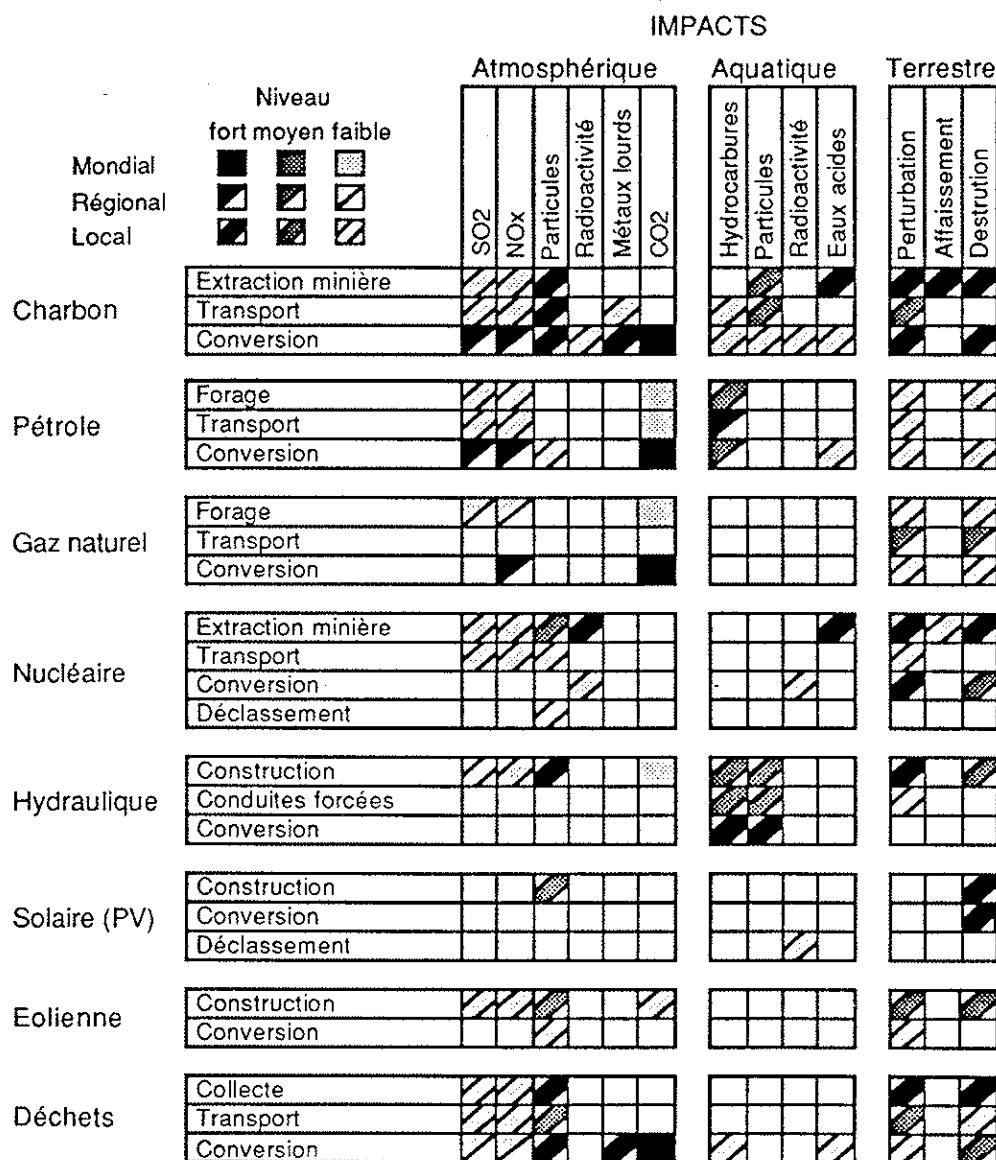


Fig. 5.3 Evaluation hiérarchisée des impacts énergétiques

L'intérêt de la figure 5.3 est de mettre clairement en évidence l'importance relative des contributions polluantes des différentes composantes du cycle du combustible, aux niveaux mondial, régional et local.

Les polluants affectent l'homme et le milieu ambiant de différentes manières. Le tableau ci-dessous montre les relations de cause à effet des polluants les plus importants.

Polluants Effets	SO ₂	NO _x	Part.	NMHC	HAP	Mét.	CFC	CH ₄	CO ₂	Rad.
Système respiratoire	●	●	●	●						
Cancer					●	●	●	●		●
Pertes pour l'agriculture	●	●		●						
Pertes piscicoles	●	●				●				
Dommages forestiers	●	●		●						
Dommages matériels	●	●								
Effet de serre, climat							●	●	●	

● Effet primaire

● Effet secondaire

Fig. 5.4 Relations de cause à effet

(adaptée d'un document de la World Energy Conference, 1989)

Part.	->	Particules (poussières)
HAP	->	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
Mét.	->	Métaux
Rad.	->	Radioactivité

Le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote déclenchent des maladies des voies respiratoires qui favorisent les bronchites chroniques. L'effet cancérogène des CFC et du méthane (CH₄) est dû au fait que ces substances contribuent à la formation de ce qu'il est convenu d'appeler le "trou d'ozone" en haute altitude (stratosphère); or une concentration suffisante en ozone est nécessaire pour atténuer le rayonnement ultraviolet du soleil et prévenir des cancers de la peau (en basse altitude l'ozone est au contraire nocif et provoque une irritation des voies respiratoires ainsi que des maux de tête). Les HAP quant à eux sont responsables d'une augmentation de l'apparition de cancers des poumons.

Il est important de relever dans ce contexte que l'évaluation et la comparaison des effets sur l'environnement des différentes filières se heurtent à un certain nombre de difficultés: les relations d'interdépendance entre le temps et l'espace ne sont pas

entièrement connues et difficiles à ramener à une échelle commune à des fins de comparaison; les liens entre l'exposition et les dommages sont dans bien des cas difficiles à déceler; en outre, des activités, des émissions et des effluents divers ayant des incidences variables sur des cibles différentes, il est difficile de trouver un critère commun en fonction duquel évaluer et comparer les effets.

Pour qualifier l'importance des rejets polluants, il faut tenir compte à la fois des quantités de substances polluantes émises et de l'intensité des effets nocifs qu'elles peuvent produire. Pour les besoins de la comparaison, on utilisera ici comme critère le "volume de dilution par unité d'énergie produite", donné par le quotient de l'émissions spécifique (en kg par kWh) de la substance polluante considérée par la valeur limite d'immission fixée pour celle-ci dans l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPAIR, voir tableau ci-après). Les valeurs limites d'immissions indiquent les quantités de polluants tolérées dans l'air (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$); ces concentrations sont considérées comme sans danger pour l'homme, les animaux et les plantes. Le volume de dilution défini plus haut donne par conséquent une mesure de la quantité d'air qui serait nécessaire pour diluer la quantité de polluant émise par unité d'énergie produite jusqu'à une concentration jugée non dangereuse. Cette grandeur n'a de sens que dans une optique de comparaison entre filières; les valeurs d'immissions effectivement provoquées par une installation donnée en un endroit précis ne peuvent être correctement évaluées qu'en recourant à des calculs complexes de transport des substances polluantes tenant compte des conditions géographiques et physiques locales ou régionales.

Valeurs limites d'immissions de l'ordonnance sur la protection de l'air (OPAIR)		
Substance polluante	Valeur limite d'immissions	Définition statistique
Anhydride sulfureux (SO ₂)	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne (arithmétique) annuelle 95% des moy. semi-horaires d'une année Moyenne par 24 h à ne pas dépasser plus d'une fois par année
Dioxyde d'azote (NO ₂)	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne (arithmétique) annuelle 95% des moy. semi-horaires d'une année Moyenne par 24 h à ne pas dépasser plus d'une fois par année

Substance polluante	Valeur limite d'immissions	Définition statistique
Monoxide de carbone (CO)	8 mg/m ³	Moyenne par 24 h à ne pas dépasser plus d'une fois par année
Ozone (O ₃)	100 µg/m ³ 120 µg/m ³	98% des moy. semi-horaires d'un mois Moyenne horaire à ne pas dépasser plus d'une fois par année
Poussières en suspens.	70 µg/m ³ 150 µg/m ³	Moyenne (arithmétique) annuelle 95% des moy. par 24 h d'une année
Pb dans pouss. en susp. Cd dans pouss. en susp.	1 µg/m ³ 10 ng/m ³	Moyenne (arithmétique) annuelle Moyenne (arithmétique) annuelle
Retombées de pouss.	200 mg/m ³ .jour	Moyenne (arithmétique) annuelle
Pb dans retomb. pouss. Cd dans retomb. pouss.	100 µg/m ³ .jour 2 µg/m ³ .jour	Moyenne (arithmétique) annuelle Moyenne (arithmétique) annuelle
Zn dans retomb. pouss. Tl dans retomb. pouss.	400 µg/m ³ .jour 2 µg/m ³ .jour	Moyenne (arithmétique) annuelle Moyenne (arithmétique) annuelle

b) Analyse des évaluations

Les valeurs fournies dans le tableau 5.10 montrent que les filières fossiles conduisent à des volumes de dilution importants pour ce qui concerne les polluants principaux (dizaines, voire centaines, de milliers de m³ d'air par kWh). Le tableau ci-dessous donne un exemple de calculs pour une centrale thermique au charbon, de type classique, répondant aux normes d'émissions les plus rigoureuses (du type de celles fixées dans l'OPAIR).

Poluant	Emission spécifique (mg/kWhe)	Valeur limite d'immission (OPAIR) (mg/m ³)	Volume de dilution (m ³ /kWhe)
SO ₂	1200	3.00E-02	4.00E+04
NOx	600	3.00E-02	2.00E+04

Le gaz naturel arrive en Suisse désulfurisé (pour des raisons de sécurité, il est toutefois odorisé au moyen d'un composé soufré, le tetrahydrotiophen, mais en quantités infimes). La combustion du gaz naturel ne dégage par conséquent pratiquement pas de dioxyde de soufre. Les installations fonctionnant au gaz émettent également moins d'oxydes d'azote que les centrales brûlant du charbon ou du pétrole (env. 2 à 3 fois moins pour la même quantité d'énergie produite). Selon une étude du "Programme des Nations Unies pour l'environnement" (ERS-14-85), les émissions atmosphériques totales en masse par unité d'énergie sont cependant presque identiques, quel que soit le combustible fossile (charbon, pétrole ou gaz) utilisé, lorsqu'on prend en considération la totalité du cycle du combustible (en considérant pour chacune des sources d'énergie "la technologie la plus utilisée"). Les émissions de SO₂ par exemple sont relativement élevées dans le cas du cycle du gaz naturel, où elles se produisent principalement lors de l'extraction, par rapport à celles des autres agents énergétiques fossiles où elles se produisent principalement lors de la conversion.

Les coupes les plus lourdes du baril de pétrole brut utilisées pour la production d'électricité sont proches du charbon, tandis que les coupes plus légères sont assimilables au gaz naturel dans les techniques telles que les turbines à gaz, les installations à cycles combinés et les piles à combustibles. En ayant recours à ces techniques avancées, on peut réduire très sensiblement les émissions de NO_x et de SO₂, voire même les supprimer (piles à combustibles).

En comparaison des installations utilisant des combustibles fossiles, les émissions polluantes de l'énergie nucléaire sont extrêmement faibles. Du fait de la très grande densité d'énergie du combustible utilisé, les quantités de combustible et, corrélativement, de déchets à traiter sont des plus réduites. Au niveau de la centrale, l'énergie d'origine nucléaire est intrinsèquement exempte d'émissions de SO₂, NO_x, CO₂ et autres gaz à effet de serre; si l'on considère le cycle de combustible dans son entier, il faut néanmoins associer de petites émissions de ces gaz à la construction des centrales et à la préparation du combustible en raison des agents fossiles consommés lors de ces opérations. Le principal impact des centrales nucléaires sur l'environnement est dû aux émissions de gaz (et accessoirement de liquides) de très basse activité. Ces émissions sont strictement réglementées et surveillées de manière à assurer que même la personne la plus exposée vivant au voisinage de la centrale ne soit soumise qu'à de très faibles risques pour sa santé. Les faibles masses mises en jeu et le fait que le processus de fission se déroule dans des barreaux

métalliques scellés, sans contact avec l'atmosphère, permet d'appliquer le principe de la concentration et du confinement (C+C) pour la gestion des déchets radioactifs, par opposition au principe de la dispersion et de la dilution (D+D) appliqué dans le cas de la combustion. De faibles quantités de gaz nobles radioactifs tels que le Xénon et le Krypton sont néanmoins émises; les volumes d'air nécessaires pour assurer leur dilution jusqu'aux concentrations admissibles restent cependant inférieurs au 1/10 de m³/kWh, soit cinq à six ordres de grandeur plus petits que ceux calculés pour les installations à combustibles fossiles.

Le problème du rejet de substances radioactives dans l'atmosphère n'est pas propre à la production d'électricité par voie nucléaire. Les charbons contiennent des composés radioactifs naturels, appartenant aux familles de l'uranium, du thorium et du potassium, qui sont relâchés en même temps que les gaz de combustion. Pour une même production d'énergie électrique, une centrale au charbon conduit à une irradiation "extérieure" généralement supérieure à celle d'une centrale nucléaire; à cela il faut ajouter le rejet d'autres substances cancérogènes de nature chimique. Selon certaines études, le nombre de cancers supplémentaires induits par une centrale au charbon pourrait, en ne tenant compte que des radionucléides, être globalement trente fois plus élevé que pour une centrale nucléaire de puissance identique (tout en restant très faible par rapport au nombre de cancers d'autres origines que l'on doit s'attendre à enregistrer de toute manière dans le groupe de population concerné).

Il faut remarquer à ce propos que les limites légales relatives à la population dans le cas de la radioactivité sont fixées particulièrement bas, plus bas même parfois que le niveau de la radioactivité naturelle. L'irradiation liée à la production d'énergie électrique est en outre maintenue très en-dessous de ces niveaux naturel et légal; les limites écologiquement supportables sont donc loin d'être atteintes dans ce cas. En ce qui concerne les gaz de combustion par contre, les niveaux légaux sont fixés relativement haut par rapport aux niveaux naturels et ils sont en outre très souvent dépassés du fait des émissions liées aux activités humaines (énergétiques ou autres).

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne) sont elles pratiquement exemptes d'émissions nocives si l'on excepte celles, négligeables d'ailleurs, qui sont associées à l'élaboration des matériaux nécessaires à la construction et au fonctionnement des installations.

5.14 "Importance des émissions de gaz à effet de serre" (Tableau 5.11)

a) Conditions et limites de l'évaluation

La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), l'ammoniac, les halocarbones (et en particulier les chlorofluorocarbones, CFCs) et l'ozone (O₃) ont un effet direct sur la balance entre l'énergie reçue et l'énergie émise par la Terre. L'énergie reçue provient du rayonnement solaire dont une notable partie traverse l'atmosphère (lumière visible, de longueurs d'onde situées autour de 0.5 μm), tandis que l'énergie émise est principalement constituée de rayonnement infrarouge de plus grandes longueurs d'onde (de 3 à 100 μm environ). Or l'atmosphère est opaque pour ces longueurs d'onde à cause de l'absorption par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone naturellement présents dans l'atmosphère, exception faite d'une étroite "fenêtre" entre 8 μm et 12 μm qui offre une certaine transparence. La transparence de cette "fenêtre" peut néanmoins être sérieusement diminuée par les autres gaz cités plus haut - CH₄, N₂O, CFC, O₃ - bien qu'ils ne soient pour l'instant présents dans l'atmosphère qu'à de faibles concentrations. Le fait que ces différents gaz retiennent ainsi le rayonnement thermique de la Terre à proximité de la surface constitue ce que l'on appelle "**l'effet de serre**". Cet effet joue un rôle fondamental dans le maintien de conditions propres à la vie sur notre planète, puisqu'en son absence la température moyenne de la surface de la Terre ne dépasserait pas -18 °C (au lieu des + 15 °C enregistrés en réalité).

Les activités humaines (et en particulier celles liées à la fourniture d'énergie) ont néanmoins provoqué une augmentation constante des concentrations atmosphériques de CO₂ et des autres gaz "à effet de serre" depuis le début de l'ère industrielle (la concentration de CO₂ par exemple a passé de 250 ppm avant 1750 à 345 ppm en 1988). Cet accroissement anthropogène de la présence des gaz en question dans l'atmosphère conduit à un renforcement de l'effet de serre qui pourrait à terme induire des bouleversements climatiques éventuellement catastrophiques (l'ampleur et les conséquences possibles de ces modifications de climat n'ont pas encore fait l'objet d'évaluations qui fassent l'unanimité dans la communauté scientifique). Etant donné qu'une évolution de ce genre serait quasi-irréversible, la prudence impose de se préoccuper dès aujourd'hui de réduire dans toute la mesure du possible les émissions des gaz à effet de serre.

Tous les gaz précités n'ont pas le même "potentiel de réchauffement"; celui-ci dépend du temps de résidence et de l'impact radiatif par molécule dans l'atmosphère. Pour avoir une base de comparaison, on définit un "indice du potentiel de réchauffement global" qui tient compte de ces deux facteurs (voir tableau ci-dessous).

Gaz	Potentiel de réchauffement global			Concentration actuelle moyenne (ppm)	Taux actuel de variation (%/an)
	à 20 ans	à 100 ans	à 500 ans		
CO ₂	1	1	1	350	0.4
CH ₄	63	21	9	1.7	1.0
N ₂ O	270	290	190	0.3	0.3
CFC	4500-7100	3500-7300	1500-4500	0.00035	4.5

On constate que l'effet à court terme du méthane par exemple est nettement plus important que celui du dioxyde de carbone; sa concentration actuelle dans l'atmosphère est par contre beaucoup plus faible, de même que son temps de résidence (10 ans contre 100 ans environ pour le CO₂) ce qui explique la baisse de l'indice de réchauffement global que l'on peut observer dans le tableau précédent lorsque l'horizon de temps augmente. Les deux figures ci-dessous permettent d'apprécier les contributions relatives du CO₂ et des autres gaz à effet de serre pour des horizons de temps de 10 ans et 100 ans respectivement (Conférence d'Helsinki).

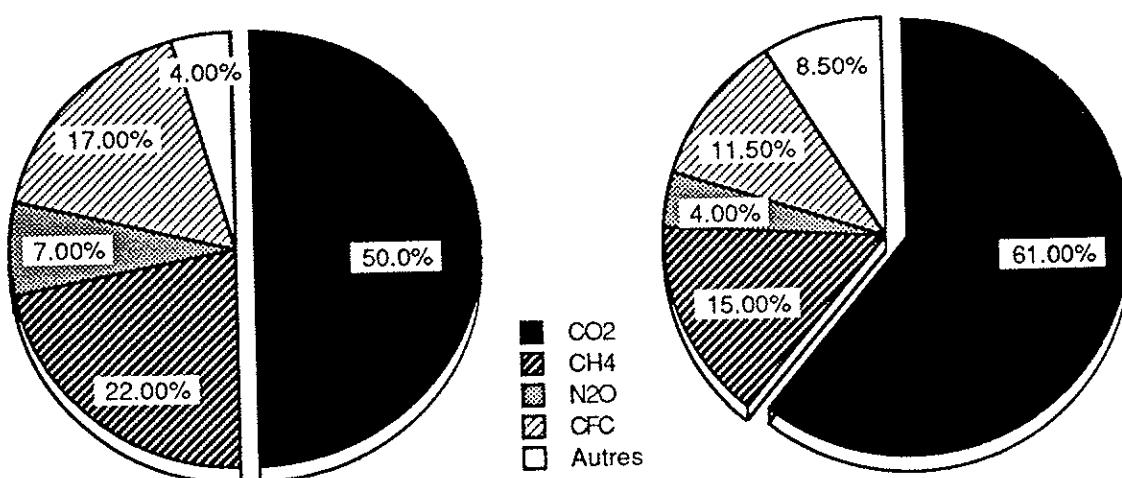


Fig. 5.5 Contributions relatives au réchauffement mondial
à 10 ans (à gauche) et à 100 ans (à droite)

Comme on peut le voir, la contribution actuelle du CO₂ à l'effet de serre est de 50%. La contribution du secteur énergétique est évaluée à 57%, sous forme principalement de CO₂ mais aussi de CH₄, de N₂O et d'ozone. Etant donné qu'il est très difficile de trouver les facteurs d'émission de chacun de ces différents gaz pour l'ensemble des filières considérées, nous nous contenterons dans cette étude pilote de comparer uniquement les émissions respectives de CO₂.

b) Analyse des évaluations

La Fig. 5.6 permet de comparer les émissions de dioxyde de carbone occasionnées par les différentes techniques de production d'électricité.

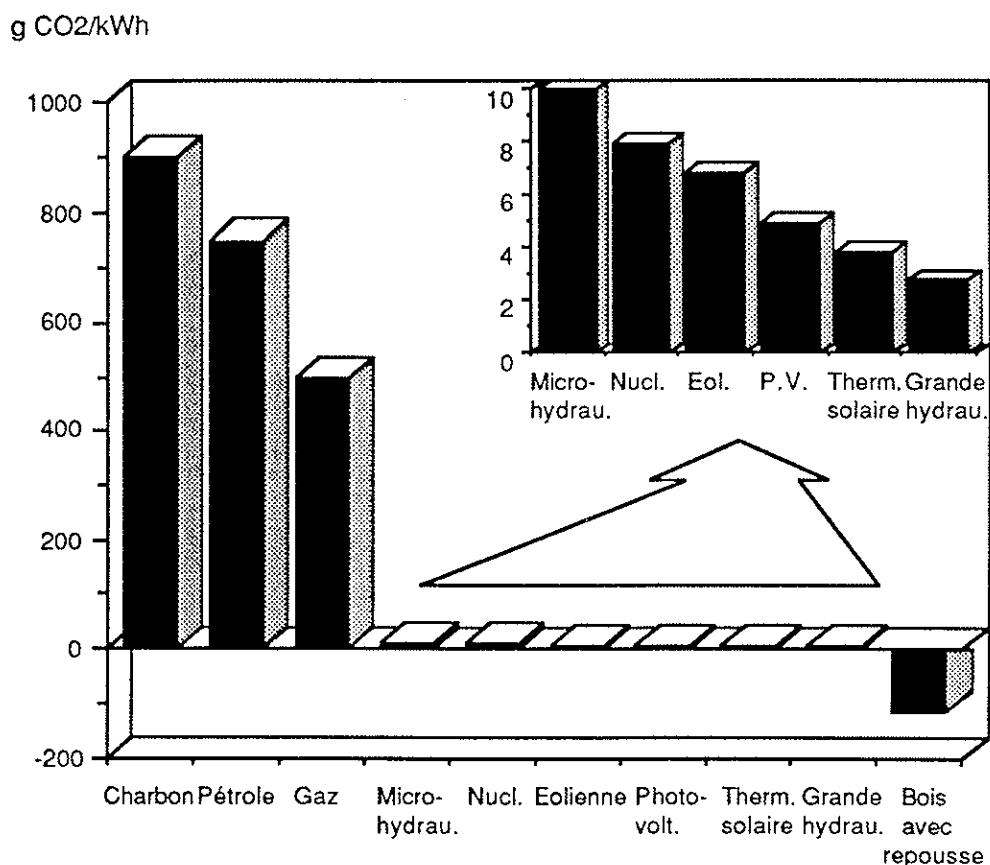


Fig.5.6 Emissions de dioxyde de carbone pour différentes filières

L'ampleur de la différence entre les émissions de CO₂ des centrales électriques utilisant des combustibles fossiles et celles des autres types d'installations est évidente. Dans ce premier groupe, le gaz naturel présente néanmoins à cet égard des caractéristiques plus favorables; à quantité d'énergie égale, il produit environ

50% de dioxyde de carbone de moins que le charbon et 30% de moins que le pétrole. Ceci est dû au fait que le gaz naturel est essentiellement constitué de méthane dont la combustion (oxydation) conduit non seulement à la formation de CO₂ mais aussi d'eau (H₂O). Le remplacement du charbon par le gaz naturel n'est cependant avantageux dans ce contexte que si le taux de fuite du système gazier dans son ensemble - extraction, transport, distribution, utilisation - ne dépasse pas 1% (ce qui semble être aujourd'hui le cas pour les réseaux européens).

Il faut noter que le recours aux divers système d'épuration des gaz de combustion évoqué dans la section précédente pourrait avoir pour effet secondaire d'accroître l'émission de dioxyde de carbone. Par exemple, les techniques fondées sur l'utilisation du charbon qui emploient un système d'extraction de SO₂ par sorbants calcaires émettront un peu plus de CO₂ par calcination de la chaux. Il faut ajouter à cela une légère baisse de l'efficacité énergétique qui va elle aussi dans le sens d'une augmentation de l'émission de CO₂ par unité d'énergie électrique produite. C'est au contraire par une amélioration des efficacités de conversion que l'on peut espérer diminuer les émissions spécifiques de dioxyde de carbone des installations fonctionnant à l'aide de combustibles fossiles (c'est actuellement la seule mesure qui soit techniquement et économiquement à notre portée dans ce domaine).

En comparaison des installations utilisant des combustibles fossiles, les centrales nucléaires et les installations basées sur l'utilisation des énergies renouvelables - hydraulique, éolienne et solaire - ne sont responsables que d'émissions très limitées de gaz à effet de serre. Celles-ci ne sont cependant pas strictement nulles si l'on prend en compte la totalité du cycle du combustible, comme on le voit sur la Fig. 5.6.

On a fait figurer à titre indicatif sur la Fig. 5.6 la possible utilisation de bois "avec repousse" pour la production d'électricité parce que ce type de technique est le seul qui permettrait d'aboutir à un absorption globale de CO₂ (facteur d'émission négatif). Le bois et autres biocombustibles constituent ainsi des substituts attrayants des combustibles fossiles: si leur combustion dégage du dioxyde de carbone, celui-ci est absorbé et fixé dans la photosynthèse pendant la production de la biomasse. Ainsi, pour inverser la tendance au déclin des forêts à l'échelle mondiale, l'établissement de "plantations énergétiques" et la création de zones de culture dérobées là où la terre resterait autrement en friche permettrait de capturer le CO₂. Le reboisement à grande échelle ne pourrait cependant qu'être un processus lent et il faudrait planter de vastes superficies pour obtenir un résultat tant soit peu significatif.

5.15 "Importance des nuisances liées aux déchets solides" (Tableau 5.12)

a) Conditions et limites de l'évaluation

On ne considérera ici comme "déchets" que les résidus solides des opérations liées à la production d'énergie électrique qui ne sont normalement pas recyclés. Les déchets solides présentent deux types de problèmes: le volume des matériaux à évacuer d'une part et leur plus ou moins grande toxicité d'autre part. Pour les déchets volumineux mais relativement peu toxiques, tels que les cendres par exemple, le problème est essentiellement une question d'occupation de terrain (à condition de considérer l'ensemble du cycle du combustible, cette "nuisance" pourrait alors être prise en compte dans le critère "emprise au sol"); dans d'autres cas, le problème des déchets solides est plutôt lié à la nécessité de les isoler de manière sûre et "définitive" de la biosphère en raison de leur toxicité, même si les quantités sont relativement réduites (c'est typiquement le cas des déchets radioactifs de haute activité). Comme pour la plupart des critères, l'importance des nuisances liées aux déchets solides peut être très différente si l'on considère l'ensemble du cycle du combustible (ce qui est en principe le cas du tableau 5.12) ou seulement la part résultant de la production d'énergie électrique proprement dite.

b) Analyse des évaluations

Par unité d'énergie produite, les centrales à combustibles fossiles, tout particulièrement celles fonctionnant au charbon, sont de très loin celles qui produisent les volumes de déchets solides les plus importants. Les déchets normaux du cycle du charbon comprennent: 1) les déchets solides produits au stade de l'extraction, 2) les déchets produits à l'amont pendant la préparation et le transport, 3) les déchets produits à l'aval, notamment les cendres volantes et lourdes, les boues des épurateurs (pour les centrales classiques comportant un système de désulfuration des fumées) et les substances sorbantes épuisées (combustion en lit fluidisé). Les quantités dépendent beaucoup de la qualité du charbon et des dispositions prises pour limiter les rejets de polluants dans l'atmosphère. La toxicité des résidus solides de combustion est en règle générale relativement faible; il n'en reste pas moins que les lieux de dépôt doivent être choisis et préparés avec soin afin d'éviter la lixiviation et le transfert possible d'éléments nocifs à l'état de traces aux chaînes alimentaires.

L'énergie d'origine nucléaire et son cycle du combustible produisent toute une série de radio-isotopes qui sont des sources de contamination radioactive. Il est nécessaire de distinguer ces déchets selon leur origine et leur niveau de radioactivité:

- les déchets de *faible activité* provenant de matériel d'usage courant dans les centrales nucléaires (blouses, gants, etc.) qui sont concentrés par incinération;
- les déchets de *moyenne activité* qui proviennent essentiellement des installations de filtrage et des résidus des opérations de décontamination;
- les déchets de *haute activité* qui proviennent du retraitement du combustible irradié, ou dans certains pays (USA), de la décision de stocker le combustible irradié lui-même; ces déchets contiennent des actinides (atomes dont les numéros atomiques sont égaux ou supérieurs à 89), qui pour certains ont une très longue période; ils contiennent aussi des produits de fission de période plus courte en concentrations telles qu'une grande quantité de chaleur sera produite par décroissance radioactive durant des décennies.

Les déchets de basse et moyenne activité ne causent pas de difficultés. Le problème de la gestion et du stockage des déchets de la dernière catégorie est plus délicat à résoudre. Compte tenu de la haute densité énergétique du combustible nucléaire, les volumes à stocker sont cependant extrêmement faibles (de l'ordre de 3 m³/an pour une centrale de 1000 MWe). Des techniques ont été mises au point pour isoler ces déchets de l'environnement pendant une période suffisante pour éviter tout risque d'impacts sur la santé des êtres vivants. Ces techniques reposent sur le principe des *barrières multiples*, la dernière barrière étant une formation géologique assez stable pour qu'elle empêche la migration des radionucléides vers la biosphère pendant toute la durée voulue en cas de défaillance des autres barrières. Toutefois les dépôts de stockage définitif des déchets de haute activité n'ont pas encore été mis en place dans la plupart des pays, car il n'y a pour l'instant ni besoin physique ni intérêt économique à le faire; on estime en outre nécessaire de prévoir un stockage provisoire de plusieurs décennies pour le refroidissement de ces déchets avant leur évacuation définitive.

La quantité de déchets solides produite par les sources d'énergie renouvelables au niveau des installations de production d'électricité elles-mêmes est dans l'ensemble très limitée. Néanmoins, si l'on considère le cycle énergétique dans son ensemble, on doit constater que même la technologie la plus "propre" peut avoir un impact sur l'environnement qui pourrait, à moins d'être anticipé, faire obstacle à son adoption.

5.16 "Emprise au sol" (Tableau 5.13 a)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'emprise au sol est un élément d'appréciation important dans une étude comparative de différentes options d'offre d'électricité dans un pays à forte densité de population comme la Suisse. Ce critère est lié à des considérations économiques (coûts des terrains), écologiques (atteintes à la flore et à la faune), esthétiques (atteintes au paysage) et pratiques (empiétement sur des terrains constructibles ou des terres cultivables). Il présente en outre des aspects institutionnels et législatifs.

Pour comparer correctement l'emprise au sol des différentes filières considérées, il faudrait en principe tenir compte: 1) des terrains qui sont affectés à l'installation de production d'énergie électrique proprement dite, 2) de l'ensemble des surfaces occupées par les installations liées au cycle du combustible situées en aval ou en amont des unités de production. Il est cependant très difficile d'évaluer de manière homogène ces dernières surfaces pour l'ensemble des filières considérées et de les rapporter à une unité d'énergie électrique produite en Suisse (comment prendre en compte par exemple les surfaces occupées dans un autre pays par les installations d'extraction, de prétraitement ou de transport de l'agent énergétique primaire utilisé? quelle clé de répartition prendre lorsque l'agent énergétique en question est employé à d'autres fins que la seule production d'électricité? etc). Pour cette raison, on se limitera dans cette étude aux surfaces qui sont directement nécessaires au bon fonctionnement de l'installation de production d'électricité.

b) Analyse des évaluations

Le tableau 5.13 montre que les centrales thermiques, fossiles ou nucléaires, présentent un net avantage sur les autres filières en ce qui concerne l'occupation au sol; on peut qualifier ces formes d'énergie de "compactes". Les surfaces données dans ce tableau sont ramenées à la puissance installée. Si l'on tient compte de la production annuelle d'électricité, l'énergie nucléaire, en raison d'un facteur de charge plus favorable, est alors la mieux classée (avec un avantage plus marqué vis-à-vis du charbon que vis-à-vis du gaz ou du pétrole). Etant donné la faible densité énergétique des énergies renouvelables, celles-ci réclament des surfaces considérables, de 2 à 3 ordres de grandeur supérieurs à celles nécessaires pour les centrales thermiques à puissances installées égales.

5.17 "Importance des impacts microclimatiques" (tableau 5.13 b)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Les impacts microclimatiques que peut provoquer une installation de production d'électricité d'un type particulier dépendent à l'évidence fortement des caractéristiques géographiques et météorologiques propres au site d'implantation choisi. Il n'est donc pas possible de donner à ce critère une valeur "générique" bien définie pour une filière particulière. On peut néanmoins évaluer de manière générale l'importance des impacts microclimatiques potentiels d'une installation d'un type donné placée dans un environnement-type, représentatif des sites envisageables en Suisse pour l'implantation de telles installations.

b) Analyse des évaluations

Les centrales thermiques (qu'elles soient à combustibles fossiles ou nucléaires) n'ont en principe un effet sensible sur les conditions climatiques locales que dans le cas où leur refroidissement est assuré par des tours de réfrigération (Flg. 5.7). Le refroidissement du condenseur par la technique du réfrigérant atmosphérique humide s'effectue en partie par convection, mais essentiellement (80%) par évaporation. La quantité moyenne d'eau émise sous forme de vapeur par une tranche nucléaire à eau légère de 900 MWe est d'environ 0.5 m³/s (une centrale fossile de même puissance provoquera des rejets thermiques plus faibles - 1000 kcal/kWh au lieu de 1500 à 1800 kcal/kWh - en raison de son meilleur "rendement" thermodynamique). Cette vapeur saturée se condense partiellement au contact de l'air ambiant dès la sortie de la tour de réfrigération et donne lieu à la formation d'un panache dont l'importance dépend des conditions climatiques et météorologiques (il sera d'autant plus réduit que l'air est plus chaud et sec). Avec les réfrigérants modernes, l'entraînement de gouttelettes d'eau par le courant d'air généré dans la tour est trop faible pour provoquer des précipitations locales; dans des conditions atmosphériques caractérisées par des valeurs déterminées de la température, de l'humidité, de la stabilité de l'air (en relation avec le gradient thermique vertical) et de la vitesse du vent, il peut néanmoins se former un panache de plusieurs kilomètres qui réduit un peu l'ensoleillement. L'utilisation de tours de refroidissement est réservée aux installations de relativement fortes puissances lorsque les possibilités de refroidissement de la source froide (rivière, lac, mer) à disposition sont insuffisantes pour une utilisation en circuit ouvert.

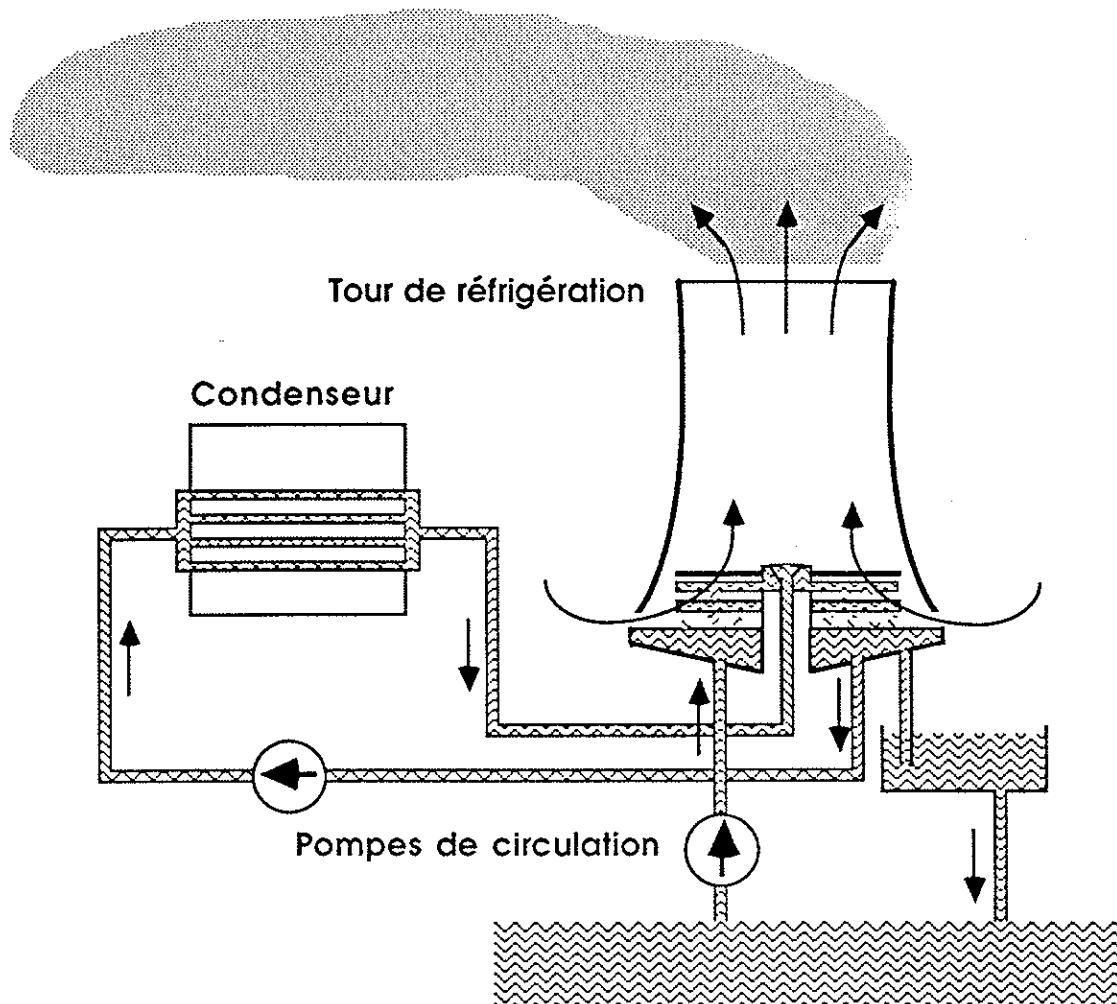


Fig. 5.7 Refroidissement par réfrigérant atmosphérique humide

Les installations utilisant des ordures ou autres déchets comme combustible ont un impact microclimatique très limité étant donné qu'il s'agit de centrales thermiques ne faisant pas appel à des tours de réfrigération (installations de faibles puissances).

L'impact microclimatique des aménagements hydrauliques est en général faible. La réalisation d'accumulations d'une très grande étendue peut cependant entraîner des effets sur le micro-climat, surtout en zone chaude ou tropicale où l'évaporation peut atteindre jusqu'à 1000 à 3000 mm/an (200 mm/an en montagne).

L'utilisation des énergies solaire ou éolienne à l'échelle envisageable en Suisse n'est pas en mesure de provoquer des modifications sensibles du micro-climat.

5.18 "Impact visuel"

a) Conditions et limites de l'évaluation

Toute installation d'une certaine taille peut être la cause d'un préjudice esthétique dont l'importance dépend évidemment beaucoup du lieu d'implantation de ladite installation. Il est donc difficile de chiffrer ou même d'évaluer qualitativement un tel préjudice dans une étude comparative générale des différentes filières de production d'électricité. Il est encore plus délicat dans ce contexte de chercher à ramener la mesure de la gêne visuelle à une puissance ou quantité d'énergie produite unitaire, étant donné qu'un impact de ce type a par essence un caractère absolu (il n'y a guère de sens à distribuer ou au contraire à agréger des préjudices de ce type, ils existent ou n'existent pas "en bloc"; que peut signifier, par exemple, pour une personne le fait qu'une installation occupe un petit angle solide par unité de puissance installée si elle a devant elle une installation de forte puissance qui lui bouche totalement le paysage?). En raison de ces difficultés, et du fait qu'il n'a pas été possible de dégager un consensus au sein du "groupe d'experts" sur la manière de prendre en compte ce type d'impact, aucune évaluation du critère en question n'a été effectuée dans le cadre de cette étude comparative "générique".

5.19 "Importance d'éventuelles nuisances d'autres types" (Tableau 5.13 d)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Mis à part les nuisances déjà évoquées, certaines installations de production d'énergie peuvent être la source d'autres types de désagréments pour leur voisinage, bruit ou odeurs en particulier. Il s'agit avec ce critère d'identifier ces nuisances particulières et d'en évaluer l'importance.

b) Analyse des évaluations

Il convient en ce qui concerne les centrales thermiques d'examiner essentiellement le problème du bruit. Dans ce domaine, les centrales nucléaires et les centrales à combustibles fossiles ne présentent pas de différence notable. Si l'on met à part les sources de bruit temporaire dont certaines, les soupapes de sécurité par exemple,

peuvent être très puissantes, l'impact sonore sur le voisinage est limité par des mesures de construction appropriées (il en va différemment pour le personnel qui peut être soumis à des niveaux sonores relativement élevé à l'intérieur des bâtiments; si le niveau atteint des intensités de l'ordre de 100 dB, des moyens de protection individuels doivent être utilisés). Les réfrigérants atmosphériques humides (voir § 5.17), lorsqu'ils existent, constituent les sources de bruit les plus importantes pour l'environnement. Ils sont en effet difficiles à insonoriser et souvent placés près des limites du site.

Les installations brûlant des ordures ou déchets d'autres types peuvent émettre des odeurs désagréables pour leur voisinage et être à l'origine de mouvements de camions assez importants, avec les nuisances que cela implique.

Les installations hydrauliques peuvent occasionnellement être une source de bruit importante lors des opérations de vidange de bassins d'accumulation. Le prélèvement d'énergie hydraulique peut en outre entraîner une atteinte à l'environnement s'il s'accompagne d'une modification sensible du régime des eaux (atteinte qui reste localisée à la zone du cours d'eau située entre le point de prise d'eau et le point de restitution plus à l'aval; voir également § 5.20).

Les aérogénérateurs sont relativement bruyants. Ils constituent en cela une gêne pour les populations vivant dans leur voisinage, gêne dont l'importance dépend du nombre et de la puissance des éoliennes installées.

Une nuisance particulière aux centrales héliothermiques est le risque d'éblouissement que sont susceptibles de provoquer les miroirs utilisés pour capter le rayonnement solaire.

5.20 "Impacts directs sur les écosystèmes" (Tableau 5.14 a)

a) Conditions et limites de l'évaluation

La présence même d'une centrale de production d'énergie électrique ou de ses installations annexes peut être une source de perturbation pour certains écosystèmes. On ne retiendra ici que ces effets directs et non ceux découlant de l'émission de polluants, qui ont été traités séparément (§ 5.13).

b) Analyse des évaluations

L'implantation de toute installation (énergétique ou autre) d'une certaine dimension entraîne inévitablement une destruction localisée du biotope préexistant. Cette destruction ne devient cependant réellement préoccupante que lorsqu'elle atteint une certaine ampleur et/ou provoque la disparition d'espèces animales ou végétales particulièrement rares. L'étendue relativement limitée de la plupart des installations de production d'énergie électrique et leur implantation sur des sites choisis en connaissance de cause permettent en général d'éviter de telles conséquences.

Au niveau du captage, de l'extraction ou du transport des différents agents énergétiques par contre les impacts sur les écosystèmes peuvent être beaucoup plus importants. C'est tout particulièrement le cas des mines de charbon à ciel ouvert dont l'exploitation se traduit par le complet bouleversement de grandes étendues de sol (c'est évidemment aussi vrai des mines d'uranium à ciel ouvert, mais la densité énergétique de ce combustible étant beaucoup plus élevée les impacts par unité d'énergie produite sont nettement plus réduits). L'extraction en sous-sol n'est pas exempt de telles nuisances, même si elles sont évidemment moins importantes (atteintes à l'environnement dues à la présence d'amoncellements de stériles extraits des mines, les *terriels*). Les champs pétroliers d'une certaine étendue, lorsqu'ils ne se trouvent pas en zone désertique, ont aussi une influence destructrice sur les biotopes locaux. Enfin, l'aménagement des réseaux de transport d'agents énergétiques (voies terrestres, oléoducs ou gazoducs) n'est pas non plus sans conséquences pour la faune et la flore.

La construction de grands aménagements hydrauliques a des conséquences similaires; plus généralement, les installations de captage et les barrages installés sur des cours d'eau perturbent la vie aquatique (en particulier par l'obstacle qu'ils présentent à la migration de certaines espèces de poissons ou par l'eutrophisation des eaux rendues stagnantes).

En ce qui concerne les installations solaires ou éoliennes, leur impact direct sur les écosystèmes (en privant d'ensoleillement des surfaces importantes ou, dans le cas d'un parc d'éoliennes de grande dimension, en constituant un possible obstacle pour le vol des oiseaux par exemple) ne pourrait devenir sensible que dans le cas d'une exploitation d'une ampleur a priori exclue en Suisse.

5.21 "Impacts sur la santé des professionnels" (Tableau 5.14 b)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Chaque technologie de production d'énergie électrique engendre des risques. Ceux-ci se traduisent par des accidents ou des atteintes à la santé qui entraînent des blessures, des maladies ou des décès. Ces risques constituent une partie des coûts sociaux de la production d'énergie (voir le critère correspondant). Il est important dans ce contexte de faire la distinction entre les risques qui touchent les travailleurs (risques professionnels) et ceux qui affectent le public. On s'intéresse dans cette section à la première de ces catégories; rappelons également que seul le cas du fonctionnement normal des installations est pris ici en considération.

Afin de comparer les risques inhérents aux différentes filières considérées, on évalue les impacts sur la santé des professionnels résultant de la production totale d'énergie pendant la durée de vie de chaque installation. Pour avoir une base de comparaison commune, ces risques sont ensuite rapportés à une production unitaire (1 MWe.an). Il importe dans une telle comparaison de considérer l'ensemble des risques liés aux opérations de construction et d'exploitation de l'installation ainsi que ceux liés à la totalité du cycle du combustible. Pour les risques liés à la construction, on peut se baser sur les quantités de matériaux utilisés et les risques correspondant à leur production. Ainsi un capteur solaire comporte sensiblement plus de matériaux par unité d'énergie produite qu'un système à haute densité d'énergie tel qu'une centrale nucléaire par exemple. Le tableau ci-dessous donne un aperçu des quantités de matériaux principaux nécessaires pour la construction des différentes installations ainsi que les temps de construction correspondant (respectivement en tonnes et heures de travail par MWe.an produits pendant toute la durée de vie de l'installation).

Filière	Acier	Béton	Alu.	Verre	Cuivre	Total	Temps
Charbon	4.3	6.8				11.1	505
Pétrole	3.2	3.1				6.3	415
Gaz naturel	1.5	2.4				3.9	302
Nucléaire	2.3	12.7				15.0	633

Filière	Acier	Béton	Alu.	Verre	Cuivre	Total	Temps
Hydraulique	0.7	92.0				630	
Solaire PV	30	10	91	4.8		140	1350
Eolienne	23	5		3.4	0.6	36	2400

(selon réf. 153)

Il faut ensuite examiner l'importance du travail à fournir pour produire ces matériaux (en hommes.heures par tonne) et les risques professionnels correspondants (décès, accidents ou maladies par hommes.heures pour les différents matériaux considérés).

Tous les risques ne sont cependant pas de même nature; ils peuvent être immédiats ou différés, entraîner une issue mortelle ou des maladies. Ils ne sont pas non plus tous connus avec la même précision; les données sur les décès immédiats sont plus fiables que celles sur les décès différés; les risques de décès (mortalité) sont d'autre part mieux documentés, ou peuvent être mieux estimés, que les risques de maladie (morbilité). Cela est en particulier vrai pour l'exposition à de faibles concentrations de produits toxiques qui nécessite généralement de faire appel à diverses hypothèses concernant les relations dose-effet (on suppose le plus souvent qu'un modèle linéaire sans seuil donne une estimation supérieure du risque, sans néanmoins que cela puisse être prouvé de manière irréfutable et en sachant en outre qu'un tel modèle est contredit par les observations que l'on peut réaliser). Pour plusieurs des expositions qu'il serait intéressant de connaître dans le cadre de cette étude comparative, les données épidémiologiques de qualité font défaut; il faut dans de tels cas recourir à des extrapolations à partir de données provenant d'essais *in vivo* ou *in vitro* et aux résultats théoriques de modèles. Même si les incertitudes sur l'estimation des effets préjudiciables à la santé peuvent parfois atteindre plusieurs ordres de grandeur, il reste possible de faire des comparaisons et d'établir des classements étant donné que les sources d'erreurs potentielles (relation dose-effet par exemple) influencent souvent de manière identique tous les systèmes étudiés.

L'agrégation des différentes catégories et dimensions de risques en un critère unique est un autre problème délicat. A défaut d'informations plus précises, on exprime en général l'ensemble des effets préjudiciables à la santé en journées de travail

perdues (Man Day Lost, ou MDL, en anglais). Cette manière de faire oblige à "convertir" décès et blessures en journées de travail perdues, ce qui introduit bien entendu un certain arbitraire et peut paraître dicutable sur un plan éthique. Les équivalences généralement retenues sont les suivantes:

$$\begin{aligned} 1 \text{ décès} &= 6000 \text{ journées de travail perdues,} \\ 1 \text{ blessé} &= 50 \text{ journées de travail perdues.} \end{aligned}$$

Les données du tableau 5.14 ont été établies sur cette base. Les marges qui affectent ces résultats découlent de la prise en compte de données provenant de différentes études récentes; l'importance de ces marges reflète les difficultés pratiques de l'évaluation du risque sanitaire global et aussi le fait que les résultats des différentes études ne sont pas toujours comparables, car basés sur des hypothèses différentes (sans que celles-ci soient toujours clairement explicitées).

b) Analyse des évaluations

Le groupe des technologies basées sur l'utilisation des combustibles fossiles se caractérise par l'utilisation de grandes quantités de combustibles dont la collecte, le traitement et le transport s'accompagnent de taux d'accidents relativement élevés pour les professionnels concernés:

- accidents mortels dans les mines de charbon imputables à l'effondrement des voûtes, aux coups de grisou, aux machines;
- blessures aux mineurs, principalement causées par des erreurs de manipulation du matériel;
- maladies des mineurs (silicose, bronchite, etc.);
- irritations et maladies respiratoires dues à la poussière de charbon, d'amiante et d'autres matériaux utilisés dans les centrales fonctionnant au charbon;
- accidents mortels pendant l'extraction du pétrole ou du gaz à terre ou en mer (chavirements, incendies);
- exposition à des gaz organiques (benzène, hydrocarbures aromatiques), qui augmentent les risques de cancer, lors des opérations de raffinage;
- décès et blessures résultant d'incendies et d'explosions dans les raffineries et les dépôts d'hydrocarbures;
- accidents liés au transport des combustibles fossiles (essentiellement lorsque ce transport s'effectue par route).

Dans ce groupe de technologies, c'est le gaz naturel qui présente le plus bas taux de risque et le charbon le plus élevé, en raison essentiellement des dangers particuliers auxquels sont exposés les mineurs de fond.

Les technologies nucléaires se caractérisent par la densité énergétique extrêmement élevée du combustible utilisé avec comme corollaire des quantités limitées de combustible et de déchets à manipuler (à noter cependant que les faibles concentrations des minerais d'uranium exploitables imposent un effort d'extraction important). Les risques sont dominés par les accidents traumatisques, essentiellement à l'étape d'extraction (accidents du même type que ceux enregistrés dans les mines de charbon), et le possible développement de maladies telles que le cancer ou la silicose chez les mineurs. Un risque d'exposition du personnel à de faibles doses de rayonnement existe également dans les autres phases du cycle du combustible (fabrication du combustible, production d'électricité, retraitement du combustible usagé).

Le groupe des technologies reposant sur les énergies renouvelables se caractérise par le caractère diffus et la faible densité énergétique des ressources utilisées - eau, soleil, vent. Le captage de ces ressources exige par conséquent des installations étendues pour les convertir en énergie électrique. Les risques professionnels sont relativement élevés et dominés par les accidents pouvant se produire durant les phases de construction, de montage ou de réparation de ces installations (en marche normale, ces installations ne nécessitent pas en général un personnel très important):

- accidents de chantier lors de la construction d'ouvrages hydrauliques, en particulier des barrages de retenue;
- exposition accidentelle à de fortes concentrations, ou exposition chronique à de faibles concentrations, de gaz toxiques (arsine ou phosphine par exemple) et de gaz dangereux (silane par exemple), ainsi qu'accidents dûs à la manipulation de matériel électrique sous haute tension, lors de la fabrication de cellules photovoltaïques;
- accidents pendant le montage et l'entretien des éoliennes ou provoqués par la chute de parties de telles installations (pales par exemple) en cas de conditions de vent extrêmes.

5.22 "Impacts sur la santé du public" (Tableau 5.14 c)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Même s'ils sont largement maîtrisés et contrôlés, les rejets normaux de substances potentiellement dangereuses dans l'environnement liés à la production d'électricité ne sont pas sans effets sur la population. Le transport et le stockage des combustibles, ainsi que les activités entraînées par la construction, l'exploitation ou le démantèlement des installations, font aussi courir un certain nombre de risques au public.

D'une manière générale, les impacts sur la santé du public provoqués par les installations de production d'énergie électrique sont moins bien documentés et plus difficiles à évaluer que ceux touchant les professionnels; les marges d'incertitude seront donc plus grandes. En particulier, aucune solution satisfaisante ne peut être donnée dans les cas où il faut comparer les risques hypothétiques très faibles que font courir à des populations nombreuses des activités de production d'énergie différentes; c'est pourtant la situation la plus courante, étant donné que toute installation de production d'énergie est en principe conçue de manière à ne faire courir aucun risque sérieux au public en fonctionnement normal (dans les pays technologiquement les plus avancés en tout cas).

b) Analyse des évaluations

La combustion produit des quantités relativement importantes de déchets solides et gazeux (voir les critères correspondants) qui dominent les risques pour le public en ce qui concerne les installations utilisant des combustibles fossiles. Le principal risque pour la santé (généralement différé) résulte de l'exposition à des émissions - SO₂, CO, NO_x, hydrocarbures, composés organiques polycycliques, cendres volantes, métaux en trace et radionucléides - se produisant pendant la phase de conversion. Les conséquences sont: maladies respiratoires, toxicité et cancer. Ces risques sont beaucoup moins élevés dans le cas du gaz que dans les cas du charbon ou du pétrole. Les fuites de pétrole à tous les stades de son cycle du combustible, ainsi que l'élimination des cendres volantes et des boues des épurateurs (centrales au charbon), entraînent un risque associé à la contamination des eaux de surface et souterraines. Enfin, incendies et explosions pendant l'extraction, le transport et le stockage du gaz et du pétrole se traduisent par des blessures et des décès.

Les centrales nucléaires rejettent en fonctionnement normal de petites quantités d'effluents liquides ou gazeux (Kr-85 et H-3 en particulier) de faible activité (le rayonnement direct traversant les blindages est totalement négligeable); ces rejets sont contrôlés de manière à ce que même la personne la plus exposée ne puisse recevoir une dose supérieure à une faible fraction (1/1000 à 1/100) de celle à laquelle elle est de toute manière soumise du fait du rayonnement naturel. Les risques pour la santé du public sont donc très limités ; ils faut cependant tenir compte que les activités situées en aval du cycle du combustible (retraitement du combustible et évacuation des déchets) peuvent conduire, au moins localement, à des doses un peu plus élevées pour les populations concernées (ces doses restant cependant, sauf cas d'accidents, bien en deçà de celles considérées comme dangereuses).

Les risques pour le public imputables aux technologies reposant sur les énergies renouvelables sont relativement faibles au niveau des installations de conversion. Il faut néanmoins tenir compte dans l'évaluation des risques associés à ces technologies de ceux, non négligeables, liés à l'acquisition des grandes quantités de matériaux nécessaires.

Pour compléter l'analyse des impacts sur la santé des professionnels et du public (§ 5.21 et § 5.22), on donne ci-dessous un tableau récapitulant les taux de mortalité - en décès/GWe.an - pour différentes filières énergétiques (source: réf. 199). Ces évaluations ne prennent pas en compte les conséquences d'accidents graves.

Catégories ->	Risques professionnels		Risques pour le public		
	Filières	Immédiats	Différés	Immédiats	Différés
Charbon	0.4-3.2 ^a , 0.16-1.7 ^b	0.13-1.1 ^a , 0.02-0.15 ^b		0.1-1.0	2.0-6.0
Pétrole	0.20-0.85 ^c , 0.22-1.35 ^d			0.001-0.1	2.0-6.0
Gaz	0.10-0.5 ^c , 0.17-1.0 ^d			0.2	0.004-0.2
Nucléaire	0.09-0.5 ^a , 0.07-0.4 ^b	0.13-0.37 ^a , 0.07-0.33 ^b		0.001-0.01	0.005-0.2

^a extraction souterraine

^b extraction à ciel ouvert

^c extraction à terre

^d extraction en mer

5.23 "Taux normalisé de décès immédiats par suite d'accidents graves" (Tableau 5.15 a)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Si l'on prend en compte l'ensemble des étapes de leur cycle du combustible, pratiquement tous les systèmes énergétiques ont un potentiel d'accidents graves (on considère ici comme grave, tout accident présentant "hors site" un risque important pour les personnes, les biens et l'environnement; ce genre d'accident devant nécessairement avoir un caractère exceptionnel). Des accidents peuvent survenir à la suite de défaillances structurelles ou mécaniques, de dysfonctionnement des procédés, d'erreurs humaines ou d'événements extérieurs tels que tremblements de terre, inondations, cyclones, guerres, attentats, etc. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples d'accidents considérés comme graves.

Filières	Nature des accidents
Charbon	Explosions ou incendies de grande ampleur dans les mines de charbon souterraines; effondrement de la voûte ou des parois de mines souterraines ou à ciel ouvert; glissements importants de terrils
Pétrole/gaz	Accidents de tours de forage en mer; éruptions de puits; incendies ou explosions de grande ampleur lors du traitement; accidents de transport ou de stockage entraînant incendies ou explosions
Nucléaire	Perte du caloporteur entraînant la fusion du cœur du réacteur; accidents pendant le transport de déchets hautement radioactifs; accidents affectant l'étanchéité de dépôts de déchets radioactifs
Hydraulique	Rupture de barrages ou débordements
Héliothermique	Dégagements importants de fluides de travail toxiques

La comparaison des risques d'accidents graves ne peut être faite sur la seule base des conséquences des accidents. La probabilité d'occurrence de ces accidents est également à considérer. Il faut par conséquent disposer de données fiables aussi bien sur la fréquence des accidents que sur leurs effets. Excepté pour l'énergie nucléaire, il n'existe malheureusement pas de collecte systématique et centralisée d'informations sur les accidents graves des systèmes énergétiques au niveau national ou international.

On ne trouve en outre pratiquement pas de données sur les effets sanitaires différenciés des accidents graves imputables aux systèmes énergétiques non nucléaires, ce qui peut entraîner une sous-estimation de l'impact total des accidents de ce type causés par ces systèmes.

Lorsqu'on traite des aspects comparatifs des risques d'accidents graves, il est important sur un plan méthodologique non seulement de distinguer clairement ceux-ci des risques résultant des opérations normales mais encore d'éviter de comparer directement des données fondées sur des événements réels (statistiques) avec des prévisions basées sur des modèles probabilistes. Pour cette raison, l'évaluation des risques d'accidents graves proposée dans la première colonne du tableau 5.15 est basée sur des données purement "déterministes". Il s'agit du taux de mortalité (exprimé en décès par GWe.an) consécutif aux accidents graves enregistrés pour chaque agent énergétique durant la période 1969-1986. Le calcul de ces taux s'appuie sur les données du tableau ci-dessous.

Filière énergétique	Nombre d'événements	Nbre décès/ événement	Nbre cumulé de décès	Energie produite (GWe.an)
Charbon	62	10-434	3400	10'000
Pétrole • chavirement • Incendie raffin. • acc. transport	6 15 42	6-123 5-145 5-500	?	21'000
Gaz naturel • Incendie/expl.	24	6-452	1440	8'600
Nucléaire	1	31	31	1'100
Hydraulique	8	11-2500	3839	2'700

(d'après réf. 199)

Rappelons que les décès signalés sont les décès immédiats; les décès différenciés, notamment ceux résultant de l'accident de Tchernobyl (nucl.), ne sont pas inclus.

b) Analyse des évaluations

Toute comparaison directe d'accidents graves dans le secteur de la production d'électricité doit être interprétée avec une grande prudence car il n'existe pas de base de données coordonnée au niveau international sur les accidents autres que nucléaires (les données du tableau précédent sont donc probablement très incomplètes).

Ramené à l'unité d'électricité produite, c'est l'énergie hydraulique qui paraît avoir provoqué le plus grand nombre de décès accidentels au cours de la période 1969-1986. En ce qui concerne les énergies fossiles, c'est le nombre de décès immédiats associés au charbon qui est le plus élevé; il atteint le double de ceux enregistrés dans les secteurs du pétrole ou du gaz naturel.

L'accident de Tchernobyl est le plus grave événement qui ait marqué l'histoire de l'énergie nucléaire civile. Il a entraîné 31 décès immédiats parmi les travailleurs ayant eu à intervenir d'urgence sur le réacteur endommagé, la contamination de vastes territoires et l'évacuation immédiate de quelque 130'000 personnes. Les conséquences sociales de cet accident sont donc considérables. Des décès différés sont en outre à attendre, même s'il ne sera sans doute jamais possible de dresser un bilan précis du total des victimes imputables à cette catastrophe. A noter que le type de réacteur concerné (réacteur RBMK, développé dans l'ex-URSS) est d'une conception particulière qui n'a d'équivalent dans aucun autre pays.

5.24 Fréquence cumulée d'accidents graves par unité d'énergie produite (Tableau 5.15 b)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Une manière d'évaluer les risques respectifs que font courir aux populations les différentes filières de production d'énergie électrique est de comparer entre elles les courbes de fréquences cumulées d'accidents pouvant entraîner un nombre de victimes supérieur à une valeur donnée. Sur la base de telles courbes, le tableau 5.15 donne les probabilités d'accidents graves susceptibles de provoquer respectivement plus de 100 et plus de 1000 décès.

Les chiffres de 100 et 1000 victimes ont été choisis en raison du fait qu'ils marquent apparemment la transition entre des événements considérés par le public comme graves, sans plus, et des accidents perçus comme des catastrophes (pour des événements uniques).

Pour les systèmes non nucléaires, les données utilisées sont fondées sur des événements qui se sont effectivement produits, alors que pour les filières nucléaires il s'agit de prévisions reposant sur des évaluations probabilistes de sécurité en raison de l'absence de références statistiques (un seul accident grave enregistré à ce jour, voir section précédente). Ces deux types de données étant qualitativement différents, toute comparaison directe entre les systèmes nucléaires et non nucléaires effectuée sur cette base doit être considérée avec une certaine prudence.

b) Analyse des évaluations

Même en tenant compte de la réserve exprimée ci-dessus sur les comparaisons entre données historiques et évaluations probabilistes, on constate qu'au niveau des probabilités et du nombre de victimes la mauvaise réputation faite à l'énergie par l'opinion publique ne paraît guère justifiée. Ceci peut s'expliquer par le fait que les analyses de risque (Rasmussen, Birkhoffer, Fritzsche ...), si elles ont en général convaincu les experts, ont souvent renforcé les craintes d'un public qui n'était pas familiarisé avec des considérations probabilistes. Le public manque en effet de base de comparaison pour mettre en perspective le risque hypothétique d'un accident nucléaire avec des risques qui lui sont plus familiers. On peut bien sûr se poser la question du crédit à accorder à des analyses de risque qui concluent à des probabilités d'accidents graves beaucoup plus faibles (plusieurs ordres de grandeur) pour le nucléaire que pour les technologies plus conventionnelles. Le fait est que les résultats de la première analyse du genre (Rasmussen, WASH-1400, 1975) ont été très contestés; plusieurs études ultérieures ont néanmoins montré que la méthode choisie par Rasmussen pour l'analyse de risque était fondamentalement correcte, même si sur certains points - en particulier la sous-estimation des incertitudes - la présentation du rapport WASH-1400 pouvait prêter le flanc à la critique. Du fait des connaissances et des expériences dont on dispose à l'heure actuelle, ainsi que des progrès réalisés dans la description quantitative et l'analyse des scénarios d'accidents, les spécialistes estiment en fait que les hypothèses qui sont aujourd'hui à la base des procédures d'autorisation, des plans d'urgence et de la réglementation dans le domaine nucléaire sont nettement trop pessimistes.

5.25 Ampleur des dommages matériels occasionés par un accident grave (Tableau 5.16)

a) Conditions et limites de l'évaluation

En dehors de leurs effets sur la santé et l'environnement, des accidents tels qu'explosions, incendies, inondations, etc., liés à la production d'énergie électrique, peuvent évidemment entraîner la destruction de biens matériels, destruction dont l'ampleur et l'étendue peuvent être plus ou moins grandes.

Le tableau 5.16 donne une évaluation qualitative de l'importance des dommages matériels qui pourraient résulter d'accidents touchant les différentes filières considérées. Les accidents considérés sont ceux recensés dans le tableau de la section 5.23. Dans le cadre de la présente étude pilote, il n'a pas été possible de rassembler des données cohérentes permettant de chiffrer le montant ou l'étendue des destructions potentielles (qui dépendent en outre fortement de l'environnement dans lequel se trouve placée l'installation "fautive").

Les appréciations données dans le tableau 5.16 ne tiennent compte que de l'ampleur des dégâts matériels qui pourraient résulter d'un accident grave survenant sur une installation de la filière considérée et non de la probabilité d'occurrence d'un tel accident (pour celle-ci, se référer à la section précédente).

b) Analyse des évaluations

Les dommages matériels les plus importants que l'on puisse craindre à la suite d'accidents survenant sur des installations de production d'énergie électrique sont associés aux énergies hydraulique et nucléaire. Dans le premier cas, il s'agit des conséquences de la rupture d'un grand barrage avec vague déferlante et inondation de grande ampleur. Dans le deuxième cas, on a pris en considération non seulement les destructions proprement dites qui peuvent résulter de la perte de contrôle d'un réacteur nucléaire suivie d'une rupture du confinement (accident hypothétique le plus grave que l'on puisse envisager), mais aussi de la "perte d'usage" des biens matériels situés dans la zone contaminée à la suite du relâchement de substances radioactives s'échappant du cœur du réacteur endommagé.

Les dégâts matériels que peuvent provoquer les installations utilisant des combustibles fossiles sont essentiellement liés aux risques d'explosion et d'incendie; ils peuvent être considérés comme d'ampleur moyenne.

Les installations utilisant les énergies solaire ou éolienne ne sont en principe pas susceptibles de provoquer d'importants dégâts matériels dans leur environnement en cas d'accident (faible densité énergétique).

5.26 Importance des risques sanitaires encourus par les futures générations (Tableau 5.17)

a) Conditions et limites de l'évaluation

L'éthique commande de ne pas se préoccuper uniquement des risques que les installations d'une filière énergétique donnée peuvent faire courir aujourd'hui aux populations mais aussi de ceux qui pourraient affecter à plus long terme les générations à venir.

On s'intéresse essentiellement dans cette section aux effets directs sur la santé de nos descendants que pourraient avoir le relâchement, progressif ou brutal, dans la biosphère de substances nocives liées aux cycles du combustible des filières énergétiques exploitées de nos jours. Certains effets indirects, résultant d'éventuelles modifications profondes de l'environnement (traitées en tant que telles dans la section suivante), seront également prises en compte.

b) Analyse des évaluations

Etant donné les précautions prises, aucune des filières considérées ne fait en principe courir de risques sanitaires directs réellement sérieux aux futures générations. Parce qu'elles contiennent des éléments chimiques particulièrement toxiques (As, Si, Cd) qui pourraient être libérés accidentellement dans la biosphère, les cellules photovoltaïques hors d'usage pourraient cependant constituer un certain danger sanitaire pour nos descendants (si, bien sûr, l'utilisation de ces cellules connaît un développement réellement important dans les années à venir et que le recyclage ou l'élimination de ces substances dangereuses n'est pas assuré).

Plus préoccupant aux yeux du public est le problème de l'isolement à long terme des déchets radioactifs de haute activité produits dans les centrales nucléaires (voir section 5.15). Les techniques mises au point devraient cependant permettre d'isoler en toute sécurité de l'environnement tous ces déchets pendant le temps (il est vrai très long) nécessaire pour réduire leur activité à un niveau ne présentant pas de danger pour la santé. Ces techniques reposent sur le principe des barrières multiples, la dernière barrière étant une formation géologique suffisamment stable pour qu'elle empêche la migration des nucléides vers la biosphère pour toute la période voulue, au cas où toutes les autres barrières seraient défaillantes. Les amas granitiques et les dômes de sel se sont révélés stables sur de longues périodes géologiques et sont par conséquent des formations adaptées. Certaines formations de tuf et d'argile présentent des caractéristiques similaires. Divers laboratoires nationaux coopèrent à l'exécution d'un programme coordonné d'évaluation de tels sites; sur la base des résultats déjà obtenus dans le cadre de ce programme, le Comité de gestion des déchets radioactifs de l'AEN s'est déclaré confiant dans la faisabilité et la sûreté du stockage définitif des déchets de haute activité dans des formations géologiques.

A côté de ces effets directs, il faut aussi tenir compte des effets indirects sur la santé des futures générations que pourraient avoir certaines modifications importantes de notre environnement. Les exemples les plus évidents de tels effets indirects sont ceux qui résultent du réchauffement de la planète et des dépôts acides, tous deux liés à l'utilisation des combustibles fossiles.

L'acidification des eaux et des sols peut affecter la mobilisation écologique de certaines substances présentes dans l'environnement, comme les métaux, ce qui peut avoir des répercussions sur la santé humaine. Le mercure par exemple peut être entraîné dans des eaux acidifiées et s'accumuler dans des poissons qui seront ensuite pêchés et consommés par l'homme; on a aussi avancé l'hypothèse d'une relation entre le développement de la maladie d'Alzheimer et les concentrations d'aluminium dans l'eau potable.

Le changement de climat peut, indirectement, agir sur la santé en entraînant par exemple une baisse de la production alimentaire et en modifiant la répartition des maladies vectorielles (à noter que des conséquences du même type, mais plus localisées, peuvent résulter de la construction d'aménagements hydro-électriques de très grande ampleur entraînant des modifications importantes et difficilement réversibles des conditions hydrologiques et climatiques préexistantes dans une vaste région).

5.27 Importance des risques autres que sanitaires légués aux futures générations (Tableau 5.18)

a) Conditions et limites de l'évaluation

Les problèmes légués aux futures générations par suite des activités présentes dans le domaine de la production d'énergie électrique ne sont pas seulement de nature sanitaire. On peut considérer que toute modification sensible des conditions physico-chimiques régnant sur Terre, toute destruction massive d'espèces animales ou végétales (appauprissement de la "diversité biologique"), ainsi que l'épuisement de ressources naturelles ayant une valeur autre qu'énergétique constituent autant d'atteintes inacceptables au patrimoine que nous transmettront à nos descendants.

En ce qui concerne le premier point, les modifications de l'environnement que constituent le réchauffement de la planète et les dépôts acides représentent les principales sources de préoccupation pour l'avenir. Ces effets ont déjà été traités dans la classe des impacts sur l'environnement et la santé, mais dans un contexte un peu différent de celui abordé ici, c'est-à-dire les conséquences générales pour nos descendants des activités entreprises aujourd'hui dans le domaine énergétique. Le deuxième point est en partie lié au premier; il s'agit d'évaluer les risques que peuvent faire courir à la survie de certaines espèces animales et végétales les bouleversements de notre environnement entraînés par les activités susmentionnées. Enfin, on prendra en compte dans le dernier point le fait que la combustion, dans des chaudières, de matières premières non renouvelables ayant des applications autres qu'énergétiques à plus haute "valeur ajoutée" peut être considérée comme un gaspillage de ressources précieuses pour nos descendants.

b) Analyse des évaluations

En raison de l'émission de gaz à effet de serre ainsi que de NO_x et de SO₂ dans l'atmosphère, les installations utilisant des combustibles fossiles sont évidemment celles qui présentent le plus grand risque de perturber de façon sensible, durable et globale certains paramètres physico-chimiques de notre environnement. En ce qui concerne le risque de destructions massive d'espèces animales ou végétales, on a considéré que le cycle du pétrole présentait à cet égard un danger particulier en raison des incertitudes qui existent sur les effets à long terme de la pollution des océans et eaux de surface par les déversements de pétrole.

Le pétrole et, dans une moindre mesure, le charbon sont d'autre part des matières premières précieuses pour la pétrochimie; il serait en conséquence souhaitable de préserver ces ressources pour de telles utilisations dans la mesure où ces agents fossiles peuvent être remplacés dans leur rôle énergétique par des sources d'énergie n'ayant elles guère d'autres utilisations pratiques (uranium en particulier).

L'énergie nucléaire ne présente guère de risque de modifications globales des conditions de vie sur Terre (il faudrait admettre la possibilité d'une contamination radioactive généralisée, ce qui est totalement irréaliste). En cas de relâchement important de l'inventaire d'un dépôt de déchets de haute ou moyenne activité dans la biosphère, on pourrait néanmoins s'attendre à des dégâts importants et de longue durée à la faune et à la flore pouvant conduire à la disparition de certaines espèces dans une zone plus ou moins étendue. Cela suppose cependant des circonstances tellement exceptionnelles (séisme d'une intensité encore jamais enregistrée par exemple, ou chute d'une grosse météorite) que les conséquences directes de celles-ci seraient probablement plus à craindre que les effets d'une possible contamination radioactive.

En ce qui concerne les énergies renouvelables, on peut admettre qu'elles n'ont en principe pas d'effets néfastes du type de ceux envisagés dans cette section (exception faite peut-être pour de très importants aménagements hydro-électriques).

5.28 Impacts macroéconomiques

a) Conditions et limites de l'évaluation

Après discussion au sein du groupe d'experts, il a été décidé que les critères à prédominance "sociétale" devaient être écartés de la présente étude pilote. L'évaluation de tels critères dépend en effet pour une part des valeurs attribuées aux critères examinés précédemment, mais aussi et surtout d'appréciations beaucoup plus subjectives. Seule une procédure de consultation élaborée, parmi un groupe de personnalités vraiment représentatives du tissu social de notre pays, pourrait fournir une base solide et crédible à des évaluations de ce type; une telle action sortirait du cadre fixé à la présente étude.

5.29 Acceptation sociale

a) Conditions et limites de l'évaluation

Voir 5.28.

5.30 Compatibilité avec le cadre politique, législatif et administratif suisse

a) Conditions et limites de l'évaluation

Voir 5.28.

5.3.1 Tableaux d'évaluation des critères/indicateurs

Tableau 5.1	Diversific. géopolit. des réserves	Nbre pays exportateurs (monde)		% réserves dans pays OCDE	Potentiel suisse exploitable [TJ/an]	Limites imp. par capacité réseaux [TJ/an]	Puissance totale installable [MWe]
Charbon	Moyenne	8 - 10		40	33000	—	1300
Pétrole	Faible	28		25	33000	114000	1300
Gaz naturel	Forté	15 - 19		41	50500	—	2000
Nucléaire	Forté	4 - 5		59	140000	—	5000
Ordures/déchets	Absolue	—	—	—	4000 - 4500	—	
Hydraulique	Absolue	—	—	—	135000 à 145000	—	
Eolienne	Absolue	—	—	—	540	—	0.65 - 50
Solaire	Héliothermique	Absolue	—	—	4500	—	3000 - 4000
	Photovoltaïque	Absolue	—	—	4000	—	1000 - 3000

Principales références utilisées: 38, 188, 91, 183, 179, 188, 204, 206

1, 2, 23, 36, 83, 102, 107, 148, 150

Tableau 5.2	Ressources au niveau mondial [Exajoules]			Production mondiale annuelle [Exajoules]	Réserves prouvées au niveau mondial [Années]
	Réserves additionnelles [Exajoules]	Réserves prouvées [Exajoules]	Réserves prouvées au niveau mondial [Années]		
Charbon	262700 à 285400	238700	24000 à 46700	101	240 - 460
Pétrole	26100 à 27600	20400	5700 à 7200	132	43 - 55
Gaz naturel	14700 à 14800	10500	4200 à 4300	65	65 - 66
Nucléaire	Réact. thermiques	1210	2100	1900	75
	Surgénérateurs	82700	28700	54000	25.5
Ordures/déchets	non applicable	non applicable		non applicable	non applicable
Hydraulique	non applicable	non applicable		non applicable	non applicable
Eolienne	non applicable	non applicable		non applicable	non applicable
Solaire	non applicable	non applicable		non applicable	non applicable

Principales références utilisées: 38, 39, 91, 122, 154, 179, 188, 202, 203, 204, 206, 235

Classement des réserves:

Pétrole

1. Arabie Saoudite; 2. Irak; 3. Koweit; 4. Iran; 5. Abou Dabi; 6. Venezuela;
7. CEI (ex URSS); 8. Mexique; 9. USA; 19. Chine; (11. Libye)

Gaz

1. CEI (ex URSS); 2. Iran; 3. Abou Dabi; 4. Arabie Saoudite; 5. USA; 6. Qatar;
7. Algérie; 8. Vénézuela; 9. Irak; 10. Canada; (11. Nigéria)

Charbon

1. Arabie Saoudite; 2. CEI (ex. URSS); 3. Chine; 4. Australie; 5. Inde; 6. Allemagne-Ouest;
7. Afrique du Sud; 8. Pologne; 9. Allemagne-Est; 10. Colombie; (11. UK)

Uranium

1. Australie; 2./3. Canada, USA; 4. France; 5. Espagne; 6. Allemagne-Ouest;
7. Suède; 8. Portugal; 9. Grèce; 10. Japon; (11. Italie)

Classement des exportations:

Pétrole

1. Arabie Saoudite; 2. Irak; 3. Koweit; 4. Iran; 5. Abou Dabi;
- 6./7./8./9./10. Venezuela, CEI (ex URSS), Mexique, Chine, Libye

Gaz

1. CEI (ex URSS); 2. Canada; 3. Pays-Bas; 4. Norvège; 5. Indonésie; 6. Algérie;
7. Malaisie; 8. Brunei; 9. Irak; 10. Abou Dabi

Charbon

1. USA; 2. Australie; 3. Afrique du Sud; 4./5. Canada, Pologne;
- 6./7./8./9./10. Chine, Colombie, Indonésie, Vénézuela, Bostwana

Uranium

- 1./2. Canada, USA 3. Australie; 4. Portugal; (5. Espagne)

Importations suisses

Pétrole

1. Libye: 36.9%; 2. Norvège: 30.1%; 3. UK: 12.7%; 4. Arabie Saoudite: 11.1%;
5. Nigéria: 8.2 %; 6. Algérie: 1%

Gaz

1. Pays du Nord: 85%; 2. CEI (ex URSS): 15%

Tableau 5.3	Facilité de stockage (niv. national)			
		Volume unitaire de stockage [m ³ /TJ]	Coût du stockage [Fr/TJ]	Capacité de stockage actuelle [TJ]
Charbon	Moyenne	33 - 48		2400 - 3600
Pétrole	Moyenne	22 - 36		1800 - 2400
Gaz naturel	Faible	23600 - 31700 (pression normale) 1000 (35 bars)		960
Nucléaire	Grande	1.4 E-05 à 2.8 E-05		155000
Ordures/déchets	Faible	460 - 700		4300 - 6500
Hydraulique (accumulation)	Moyenne	1.0 E-06 (pour chute = 100 m)		30000
Eolienne	Nulle	—		0
Solaire	Nulle	—		0

Principales références utilisées: 21, 83, 179

Tableau 5.4		Maturité technique actuelle	Coefficient de retour énergétique global
Charbon	Centr. therm.	Grande	20 - 30
	Centr. Industr.	Grande	
	Centr. avec gazéif.	Grande	
	Centr. à cycle comb.	Grande	
Pétrole	Centr. therm.	Grande	20 - 30
	Centr. Industr.	Grande	
	Centr. à cycle comb.	Grande	
	Moteurs diesel	Grande	
Gaz naturel	Centr. therm.	Grande	20 - 30
	Centr. à cycle comb.	Grande	
	Turbines	Grande	
	Moteurs à gaz	Grande	
	Turbines/moteurs détente	Grande	
	Piles à comb.	Moyenne	
Nucléaire	Réact. eau légère	Grande	17 - 25
	Réact. haute temp.	Moyenne	
	Surgénérateurs	Moyenne	
Ordures/déchets	UIM	Grande	
Hydraulique	Fil de l'eau	Grande	40
	A accumul.	Grande	
	Mini, micro	Grande	
Eolienne		Grande	
Solaire	Héliothermique	Moyenne	5
	Photovoltaïque	Moyenne	7-8

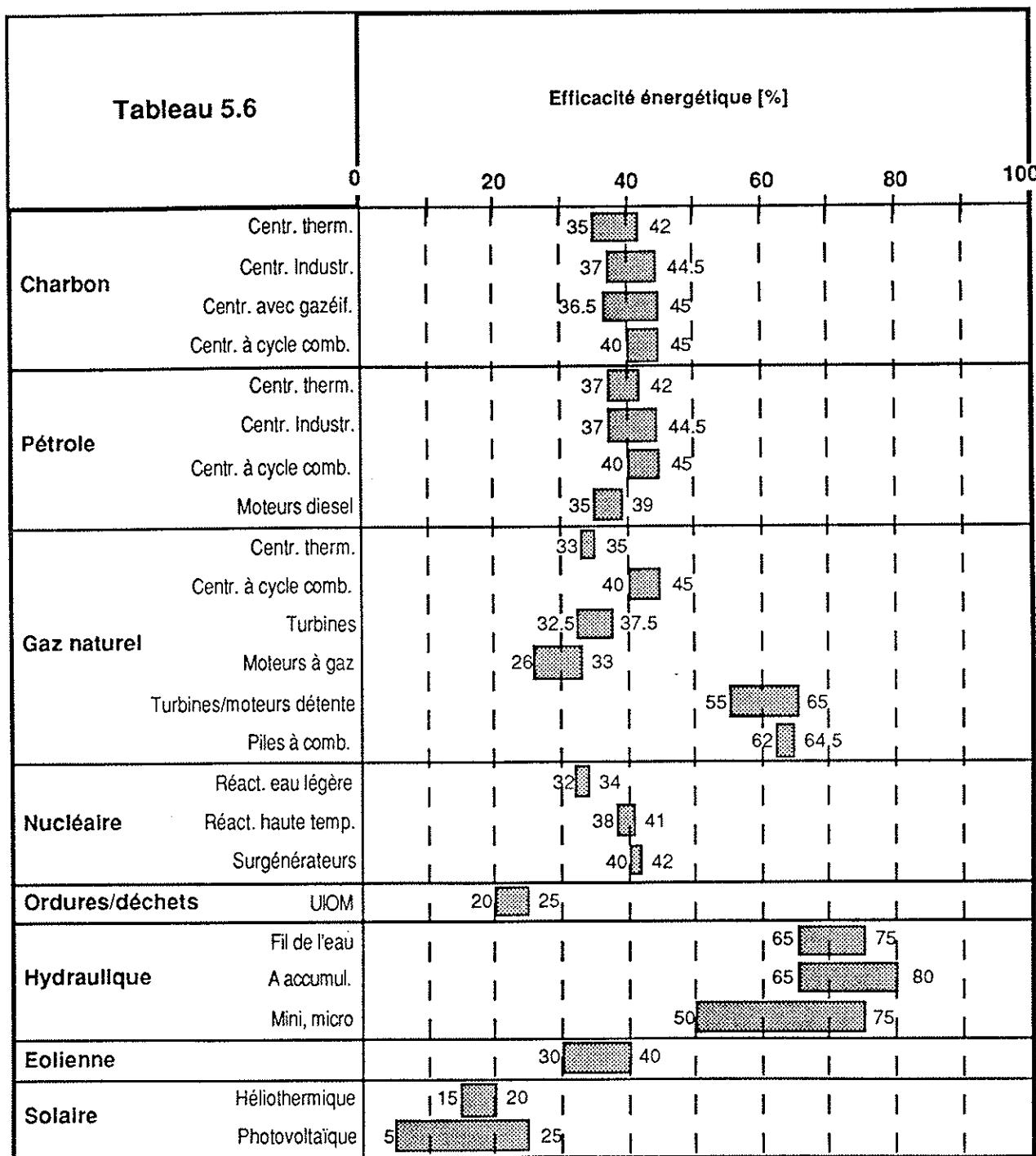
Principales références utilisées: 66, 151, 158, 180

152, 179, 213

Tableau 5.5

		Facilité de mise en oeuvre	Temps requis pour la construction [mois]	Temps requis pour le démantèlement [mois]	Infrastructure nécess. pour construction	Infrastructure nécess. pour démantèlement
Charbon	Centr. therm.	Moyenne	24 - 60	6 - 12	mi-lourde	mi-lourde
	Centr. Industr.	Moyenne	9 - 18	4 - 9	mi-lourde	mi-lourde
	Centr. avec gazéif.	Moyenne	12 - 42	6 - 12	mi-lourde	mi-lourde
	Centr. à cycle comb.	Moyenne	12 - 42	6 - 12	mi-lourde	mi-lourde
Pétrole	Centr. therm.	Moyenne	24 - 60	6 - 12	mi-lourde	mi-lourde
	Centr. Industr.	Moyenne	9 - 18	4 - 9	légère	légère
	Centr. à cycle comb.	Moyenne	12 - 42	6 - 12	mi-lourde	mi-lourde
	Moteurs diesel	Grande	3 - 6	3 - 6	légère	légère
Gaz naturel	Centr. therm.	Moyenne	24 - 60	6 - 12	mi-lourde	mi-lourde
	Centr. à cycle comb.	Moyenne	24 - 36	6 - 12	mi-lourde	mi-lourde
	Turbines	Grande	3 - 6	3 - 6	mi-lourde	mi-lourde
	Moteurs à gaz	Grande	3 - 6	3 - 6	légère	légère
	Turbines/moteurs détente	Grande	3 - 6	3 - 6	légère	légère
	Piles à comb.	Grande			légère	légère
Nucléaire	Réact. eau légère	Faible	72 - 120	360	lourde	lourde
	Réact. haute temp.	Faible	72 - 120	360	lourde	lourde
	Surgénérateurs	Faible	72 - 120	360	lourde	lourde
Ordures/déchets	UICM	Moyenne	36 - 48		mi-lourde	mi-lourde
Hydraulique	Fil de l'eau	Moyenne	24 - 72		mi-lourde	mi-lourde
	A accumul.	Faible	24 - 160		lourde	lourde
	Mini, micro	Grande	3 - 12		légère	légère
Eolienne		Grande	1 - 24	1 - 6	légère	légère
Solaire	Héliothermique	Moyenne	12 - 36		mi-lourde	mi-lourde
	Photovoltaïque	Grande	12 - 24	0.5 - 3	légère	légère

Principales références utilisées: 145, 151, 203, 207, 231, 232



Principales références utilisées: 28, 71, 93, 176, 177, 179, 189, 193, 199

Tableau 5.7		Souplesse de produc.				
			Possibilité de suivi de charge [%]	Taux de var. de la puissance [%/min]	Coefficient de disponibilité [%]	Caractère de la production
Charbon	Centr. therm.	Moyenne	50	<5	55 - 75	prévisible
	Centr. Industr.	Grande	30	5	75 - 85	
	Centr. avec gazéif.	Moyenne	50	5	55 - 65	
	Centr. à cycle comb.	Moyenne	50	<5	55 - 75	
Pétrole	Centr. therm.	Moyenne	50	1 - 1.5	98 - 99	prévisible
	Centr. Industr.	Grande	30			
	Centr. à cycle comb.	Moyenne	50			
	Moteurs diesel	Grande				
Gaz naturel	Centr. therm.	Moyenne	50			prévisible
	Centr. à cycle comb.	Moyenne	50			
	Turbines	Grande	30			
	Moteurs à gaz	Grande				
	Turbines/moteurs détente	Grande				
	Piles à comb.	Grande				
Nucléaire	Réact. eau légère	Faible	80 - 90		85 - 90	prévisible
	Réact. haute temp.					
	Surgénérateurs					
Ordures/déchets	UOM	Moyenne			95	prévisible
Hydraulique	Fil de l'eau	Moyenne				peu prévisible
	A accumul.	Grande		65 - 100	75 - 90	prévisible
	Mini, micro	Grande				peu prévisible
Eolienne		Grande	30	35 - 100	87 - 98	imprévisible
Solaire	Héliothermique	Grande				imprévisible
	Photovoltaïque	Grande	0 - 70	100	40 - 80	

Principales références utilisées: 145, 151, 190, 203, 231, 232, 233

Tableau 5.8		Prix de rev. de l'énergie produite [Fr/kWh]	Coût actual. des invest. [Fr/kWh]				Coût actual. d'exploitation [Fr/kWh]	Coût actual. du combust. [Fr/kWh]	Total actual. heures de fonctionnem. [heures]
Charbon	Centr. therm.	0.11 - 0.18	0.014 - 0.05	0.009 - 0.010	0.03 - 0.13				35900 à 66480
	Centr. Industr.								
	Centr. avec gazéif.		0.03 - 0.06	0.01	0.07 - 0.12				
	Centr. à cycle comb.								
Pétrole	Centr. therm.	0.13 - 0.18	0.011 - 0.013	0.009 - 0.010	0.041 - 0.042				35900 à 66480
	Centr. Industr.								
	Centr. à cycle comb.								
	Moteurs diesel		0.17 - 0.19	0.03 - 0.14	0.013 - 0.038	0.042 - 0.135			
Gaz naturel	Centr. therm.	0.16 - 0.26		0.009 - 0.010					35900 à 66480
	Centr. à cycle comb.		0.05 - 0.75						
	Turbines	0.085 - 0.215		0.060 - 0.065	0.017 - 0.050				(4000 - 8000)*
	Moteurs à gaz	0.085 - 0.26		0.017 - 0.018	0.017 - 0.050				
	Turbines/moteurs détente	0.04 - 0.18				0.017 - 0.050			(2000 - 8000)*
	Piles à comb.								
Nucléaire	Réact. eau légère	0.08 - 0.15	0.05 - 0.07	0.015 - 0.025	0.015 - 0.017				31970 à 61940
	Réact. haute temp.	0.065 - 0.088							
	Surgénérateurs								
Ordures/déchets	UIM	0.05 - 0.10							(2000 - 7000)*
Hydraulique	Fil de l'eau	0.07 - 0.13							(2000 - 7000)*
	A accumul.	0.08 - 0.15							
	Mini, micro	0.04 - 0.12							
Eolienne		0.20 - 1.00							(1000 - 3000)*
Solaire	Héliothermique	0.40 - 0.70							(1000 - 3600)*
	Photovoltaïque	0.50 - 1.80							

* Lorsque le total actualisé des heures de fonctionnement n'a pu être déterminé, on donne à la place le nombre d'heures de fonctionnement annuel espéré de l'installation

NB: Les taux d'actualisation retenus varient en général entre 8 et 10 % (fourchette)

Principales référ. utilisées: 2, 3, 44, 66, 69, 70, 174, 187, 197, 214, 222, 223, 235, 240, 241, 242, 244

Tableau 5. 9	Stabilité des coûts de production	Coûts externes [Fr/kWh]
Charbon	Grande	0.02 - 0.08
Pétrole	Faible	0.02 - 0.08
Gaz naturel	Moyenne	0.016 - 0.019
Nucléaire	Grande	0.08 - 0.22
Ordures/déchets	Moyenne	
Hydraulique	Grande	
Eolienne	Moyenne	0.04 - 0.11
Solaire	Moyenne	
	Moyenne	0.05 - 0.15

Principales références utilisées: 179, 214, 222, 223
172, 197, 225

Tableau 5.10		Importance des rejets polluants [m ³ /kWh]	Volume de dilution NO _x [m ³ /kWh]	Volume de dilution SO ₂ [m ³ /kWh]	Volume de dilution partic. solides [m ³ /kWh]	Volume de dilution radioactivité [m ³ /kWh]
Charbon	Centr. therm.	(0.5 - 9) E+05	(1.7 - 31) E+04	(4 - 55) E+04	0.9 E+04	
	Centr. Industr.					
	Centr. avec gazéif.					
	Centr. à cycle comb.					
Pétrole	Centr. therm.	(0.5 - 7) E+05	(1.7 - 9) E+04	(3 - 58) E+04	(0.3 - 0.4)E+04	—
	Centr. Industr.					
	Centr. à cycle comb.					
	Moteurs diesel		(4.7 - 17)E+04	(0.8 - 2) E+04		
Gaz naturel	Centr. therm.	(0.2 - 8) E+05		(1.5 - 80) E+04		—
	Centr. à cycle comb.					
	Turbines					
	Moteurs à gaz					
	Turbines/moteurs détente					
	Piles à comb.					
Nucléaire	Réact. eau légère	< 0.1	—	—	—	< 0.1
	Réact. haute temp.					
	Surgénérateurs					
Ordures/déchets	UIOM					—
Hydraulique	Fil de l'eau	—	—	—	—	—
	A accumul.					
	Mini, micro					
Eolienne		—	—	—	—	—
Solaire	Héliothermique	—	—	—	—	—
	Photovoltaïque					

Principales références utilisées: 29, 46, 60, 116, 117, 199, 248, 249, 250

Tableau 5.11		Importance émissions gaz à effet de serre [kg CO ₂ /kWh]				
			Emissions de CO ₂ [kg/kWh]	Emissions de CH ₄ [kg/kWh]	Emissions de CFC [kg/kWh]	Emissions de N ₂ O [kg/kWh]
Charbon	Centr. therm. Centr. Industr. Centr. avec gazéif. Centr. à cycle comb.		0.90	0.07 E-03		
Pétrole	Centr. therm. Centr. Industr. Centr. à cycle comb. Moteurs diesel		0.75	0.050 E-03 à 0.065 E-03 0.18-0.55 E-03		
Gaz naturel	Centr. therm. Centr. à cycle comb. Turbines Moteurs à gaz Turbines/moteurs détente Piles à comb.		0.50	0.03-0.05 E-03 0.05 E-03 0.18-0.75 E-03 0.04 E-03 —		
Nucléaire	Réact. eau légère Réact. haute temp. Surgénérateurs		0.008	—	—	—
Ordures/déchets	UIOM					
Hydraulique	Fil de l'eau A accumul. Mini, micro		0.003 0.003 0.010	— — —	— — —	— — —
Eolienne			0.007	—	—	—
Solaire	Héliothermique Photovoltaïque		0.004 0.005	— —	— —	— —

Principales références utilisées: 29, 46, 60, 116, 117, 126, 157, 198, 199, 248, 249, 250, 252

Tableau 5.12	Importance des nuisances liées aux déchets solides			
		Volume de déchets solides [m³/kWh]	Niveau de toxicité	Efficacité des mesures d'isol. de la biosphère
Charbon	Grande	2 - 5 E-05	moyen	moyenne
Pétrole	Faible	négligeable	moyen	grande
Gaz naturel	Faible	négligeable	moyen	grande
Nucléaire	Faible	négligeable	élevé (radioac.)	grande
Ordures/déchets	Moyenne		moyen	moyenne
Hydraulique	—	—	—	—
Eolienne	—	—	—	—
Solaire	—	—	—	—

Principales références utilisées: 19, 43, 123

Tableau 5.13		Emprise au sol (unité de prod. uniquement) [m ² /MWe Inst.]	Importance des impacts micro- climatiques (unité de prod. uniquement)	Impact visuel (unité de prod. uniquement)	Importance de nuisances d'autres types (bruit, odeurs, etc.)			
Charbon	Centr. therm.	120 - 180	Faible à moyenne ³⁾		Faible			
	Centr. Industr.							
	Centr. avec gazéif.							
	Centr. à cycle comb.							
Pétrole	Centr. therm.	100 - 150	Faible à moyenne ³⁾		Faible			
	Centr. Industr.							
	Centr. à cycle comb.							
	Moteurs diesel							
Gaz naturel	Centr. therm.	120 - 150	Faible à moyenne ³⁾		Faible			
	Centr. à cycle comb.							
	Turbines	75 - 120						
	Moteurs à gaz							
	Turbines/moteurs détente							
Nucléaire	Piles à comb.		Faible à moyenne ³⁾		Faible			
	Réact. eau légère	75 - 120						
	Réact. haute temp.							
	Surgénérateurs							
Ordures/déchets	UIOM		Faible		Moyen (od.; trafic)			
Hydraulique	Fil de l'eau	500 - 50000 ¹⁾	Faible		Faible			
	A accumul.	> ~ 1.0 E+06 ¹⁾	Moyenne à forte					
	Mini, micro	300 - 500	Faible					
Eolienne		10000 - 15000 ²⁾	Faible		Moyenne (bruit)			
Solaire	Héliothermique	10000 - 15000	Faible		Moy. (éblouiss.) Faible			
	Photovoltaïque							

1) Très variable suivant le type d'installation et les conditions géographiques et géologiques du site

2) Difficile à comparer (les surfaces au sol situées entre les installations restent utilisables à d'autres fins)

3) Importance moyenne lorsqu'il est fait appel à des tours de refroidissement (install. de fortes puissances)

Tableau 5.14	Impacts directs sur les écosystèmes	Impacts sur la santé des professionnels [MDL/MWe.an]	Impacts sur la santé du public [MDL/MWe.an]
Charbon	Moyens à forts	19 - 60	20 - 1850
Pétrole	Moyens	3 - 19	9 - 1000
Gaz naturel	Faibles à moyens	0.16 - 4.8	0.15 - 4.9
Nucléaire	Faibles à moyens	1.8 - 12	0.3 - 70
Ordures/déchets	Faibles		
Hydraulique	Moyens à forts	26 - 33	6.6 - 10
Eolienne	Faibles	9.7 - 33	0.21 - 4.7
Solaire	Faibles	5 - 27	0.8 - 90

Principales références utilisées: 35, 175

123, 152, 199

Tableau 5.15	Taux normalisé de décès immédiats par suite d'accid. graves [décès/GWe.an]	Probabilité d'accid. graves [acc./GWe.an]	Probabilité d'un accident causant plus de 100 morts [acc./GWe.an]	Probabilité d'un acc. causant plus de 1000 morts [acc./GWe.an]
Charbon	0,34	3 E-04 - 2 E-03	(1.0 - 2.0) E-03	(3.0 - 8.0) E-04
Pétrole	0,10	1 E-07 - 4 E-04	(1.0 - 4.0) E-04	(1.0 - 4.0) E-07
Gaz naturel	0,17	2 E-07 - 2,5 E-04	(1.0 - 2.5) E-04	(2.0 - 6.0) E-07
Nucléaire (LWR)	0,03	1 E-09 - 1,5 E-07	6 E-09 - 1,5 E-07	1 E-09 - 2 E-08
Ordures/déchets				
Hydraulique	1,41	1 E-06 - 1,5 E-04	1,5 E-05 - 1,5 E-04	1 E-06 - 3,5 E-05
Eolienne	—	—	—	—
Solaire	—	—	—	—

Tableau 5.16	Ampleur des dommages matériels		
		Ampleur des dégâts matériels potentiels [MFr/accident]	Etendue concernée [km²/accident]
Charbon	Moyenne	Non disponible	Non disponible
Pétrole	Moyenne	Non disponible	Non disponible
Gaz naturel	Moyenne	Non disponible	Non disponible
Nucléaire	Grande	Non disponible	10'000 (Tchernobyl)
Ordures/déchets	Faible	Non disponible	Non disponible
Hydraulique	Grande	Non disponible	Non disponible
Éolienne	Faible	Non disponible	Non disponible
Solaire	Héliothermique	Faible	Non disponible
	Photovoltaïque	Faible	Non disponible

Principale référence utilisée: 14, 19, 199

Tableau 5.17	Importance des risques sanitaires différents			
		Probabilité de relâchement diff. de substances nocives	Amplitude des con- séquences d'un tel relâchement	Durée de la me- nace potentielle
Charbon	faible	faible	faible	moyen terme
Pétrole	faible	faible	faible	moyen terme
Gaz naturel	faible	faible	faible	moyen terme
Nucléaire (LWR)	moyenne	faible	év. grande	très long terme
Ordures/déchets	faible	faible	faible	moyen terme
Hydraulique	nulle	—	—	—
Eolienne	nulle	—	—	—
Solaire	Héliothermique	nulle	—	—
	Photovoltaïque	moyenne	faible	moyenne
				long terme

Tableau 5.18	Importance des risques non sanitai- res différenciés			
		Risque à long ter- me de modifica- tions physico-chim. à l'échelle mond.	Risque à long ter- me de destr. mas- sive d'espèces a- nimales ou végét.	Risque d'épuise- ment de ressour- ces naturelles de grande valeur
Charbon	moyenne	grand	faible	moyen
Pétrole	grande	grand	grand	grand
Gaz naturel	moyenne	grand	faible	faible
Nucléaire (LWR)	moyenne	faible	év. grand	faible
Ordures/déchets	faible	faible	faible	nulle
Hydraulique	faible	faible	faible	nulle
Eolienne	nulle	—	—	—
Solaire	nulle	—	—	—

Principale référence utilisée: 14, 19, 199

5-84

6. CONCLUSIONS GENERALES

L'étude présentée dans ce rapport n'avait pas pour ambition de fournir un classement définitif des différentes filières de production d'électricité en fonction d'un quelconque "indice de mérite global" qui resterait d'ailleurs à définir. Il s'agissait plus modestement et plus réaliste d'évaluer la possibilité de prendre en compte dans une mesure aussi large que possible l'ensemble des critères qui interviennent (ou peuvent intervenir) dans le choix de filières de production d'électricité. L'idée maîtresse de la démarche proposée est qu'il n'est pas (ou plus) possible de faire abstraction des valeurs fondamentales de la société dans les processus décisionnels de ce genre; cela signifie d'une part que les critères sélectionnés doivent faire une juste place aux valeurs en question et d'autre part que l'évaluation de ces critères ne peut être légitimée qu'en accordant aux différentes composantes de ladite société un droit de regard sur les choix effectués.

Dans notre étude, cette représentation "sociétale" était symbolisée par le groupe d'experts qui comprenait des personnalités de formations et de sensibilités diverses. Un certain dialogue a ainsi pu être établi entre "techniciens" et "humanistes" sur des questions que ces deux groupes de spécialistes n'ont en général guère l'occasion d'aborder ensemble, ce qui représente déjà en soi un résultat intéressant de la présente étude; pour des raisons à la fois pratiques (disponibilité des membres du groupe) et budgétaires, cette concertation entre experts d'horizons différents n'a cependant pas atteint toute l'ampleur et toute la profondeur qui auraient été souhaitables. Il faut par conséquent considérer que les critères sélectionnés dans le cadre de cette étude et les valeurs qui leur ont été attribuées n'ont pas un caractère définitif mais plutôt celui d'une première ébauche qui pourrait encore certainement être affinée dans le cadre d'un travail plus ambitieux et de plus longue haleine.

Il est intéressant de noter dans ce contexte que l'on assiste depuis peu à un très net renouveau d'intérêt pour les études comparatives (plus spécialement pour les études comparatives de risques) dans le domaine des systèmes de production d'électricité. Ce renouveau d'intérêt est lié à la progression de la demande internationale d'électricité et à la nécessité de renouveler une grande partie des installations actuelles de production d'électricité dans les décennies à venir, conjuguées à la prise de conscience croissante par le public des effets de la pollution à l'échelle de la planète.

Le colloque sur l'électricité et l'environnement d'Helsinki (mai 1991), situé dans l'"orbite" du "Sommet de la Terre" (Rio, 1992), a en particulier permis de réaliser un tour d'horizon très complet des travaux entrepris à ce jour, des résultats déjà obtenus et des lacunes encore à combler dans ce domaine. Il convient de relever à ce propos qu'une des principales recommandation de ce colloque présente un intérêt tout particulier pour un éventuel prolongement de la présente étude; il s'agit de l'établissement d'une base de données, coordonnée au niveau international, portant sur les paramètres techniques, économiques, d'impacts sur la santé et l'environnement des différentes filières de production d'énergie électrique. Une réunion technique s'est tenue à Vienne tout récemment (31 août - 4 septembre 1992) pour préciser la façon de coordonner la collecte des données et d'intégrer la base de données en question à d'autres méthodologies actuellement à l'étude pour des évaluations comparatives des différentes sources d'énergie servant à produire de l'électricité; d'autres réunions techniques du même genre suivront. Selon le calendrier adopté lors de cette première réunion technique, cette base de données devrait être disponible à fin 1994. Etant donné que la collecte de données fiables et actuelles a constitué la principale pierre d'achoppement de la présente étude pilote (et consommé un temps considérable!), il est certain que l'établissement d'une telle base de données internationale ouvre des perspectives très prometteuses pour de futurs travaux dans le domaine de l'analyse comparative des filières de production d'électricité.

Sur un plan plus méthodologique, et pour revenir plus spécifiquement à notre étude, divers commentaires généraux peuvent d'ores et déjà être faits sur les développements effectués dans le cadre de la phase pilote qui fait l'objet du présent rapport:

- L'évaluation comparative des mérites des différentes filières de production d'électricité suppose un ensemble clair et cohérent d'hypothèses ainsi qu'une définition uniforme des systèmes à comparer. Cela exige en particulier que soit prise en compte la totalité du cycle du combustible des différentes technologies étudiées. Si la nécessité de respecter une telle condition s'impose sans discussion sur un plan théorique, sa mise en pratique se révèle pourtant extrêmement problématique. Il est en effet très difficile de définir avec précision et de manière uniforme les limites des systèmes; en outre, les informations permettant de savoir quelles sont les hypothèses faites dans ce domaine par les différents auteurs auxquels nous nous sommes référés pour obtenir les données nécessaires à notre étude font le plus souvent partiellement ou totalement défaut.

- La plupart des sources d'énergie n'étant pas converties uniquement en électricité mais aussi, concurremment, en d'autres formes d'utilisations et produits énergétiques finals, il est d'autre part parfois difficile d'attribuer des risques ou des nuisances par exemple à la partie du système énergétique utilisée spécifiquement pour la production d'électricité.
- Nous avons initialement considéré dans notre étude une définition relativement "fine" de la notion de filière de production d'électricité (voir chap. 2). Parce qu'une décomposition aussi fine n'a pas forcément de raison d'être pour certains des critères retenus, et aussi parce qu'il n'a pas toujours été possible de réunir les données correspondantes, nous nous sommes cependant limités dans bien des cas à une comparaison par agent énergétique uniquement.
- En plus de la définition des systèmes considérés, la cohérence d'une étude du type de celle présentée ici suppose que les limites spatiales et temporelles considérées soient clairement précisées. Là encore des problèmes pratiques apparaissent lorsqu'il s'agit par exemple de comparer des pollutions ou des nuisances; on se rend bien compte que limiter dans ce cas les comparaisons aux seules pollutions ou nuisances produites à l'intérieur du territoire national (cadre géographique fixé en principe à notre étude) n'aurait aucun sens. Nous avons en conséquence étendu les limites géographiques de l'étude de manière à englober l'ensemble de la partie du cycle du combustible concernée chaque fois que cela nous a paru nécessaire. Au niveau de l'horizon de temps considéré, il est également difficile en règle générale de prévoir l'incidence des progrès technologiques futurs sur beaucoup des critères retenus. En conséquence, les données fournies dans la plupart des tableaux reflètent plutôt l'état actuel des choses, même si dans certains cas les fourchettes de valeurs données tiennent compte d'une évolution prévisible dans les années à venir; la limite temporelle choisie, une quinzaine d'années, a en fait surtout été déterminante pour la sélection des filières qui pouvaient raisonnablement entrer en ligne de compte dans cette étude comparative.
- Etant donné la diversité des contextes technologiques, économiques et sociaux, il est douteux que des évaluations faites dans d'autres pays puissent sans autre s'appliquer à la Suisse. Nous n'avons cependant souvent pas eu d'autre choix que d'accepter des valeurs de sources "étrangères" étant donné que plusieurs des filières considérées n'ont encore jamais fait l'objet de réalisations dans notre pays.

- Il est important de noter que certains critères (ceux liés aux atteintes à la santé et à l'environnement essentiellement) permettent difficilement de comparer valablement les différentes filières entre elles sur une base purement "générique"; une étude d'impact pour un site particulier pourrait par conséquent déboucher sur des conclusions éventuellement différentes de celles présentées dans ce rapport.
- Pour la plupart des critères, les évaluations fournies ont en général été rapportées à une valeur unité d'énergie électrique produite ((kWh) ou (TJ) par exemple) afin de permettre de les comparer; dans d'autres cas, des unités différentes ont été choisies (unité de puissance installée par exemple). A condition de garder une même normalisation pour un critère donné, cela n'a évidemment aucune influence sur le résultat de comparaisons effectuées critère par critère.
- Pour donner un autre "éclairage" sur certaines caractéristiques des filières sélectionnées, des indicateurs ont parfois été utilisés dans différents contextes (différents critères ou familles de critères). Cette entorse au principe d'indépendance des critères, qui ne serait pas acceptable dans le cadre d'une véritable analyse multicritère, n'est pas gênante lorsqu'il s'agit comme dans la présente étude d'analyser les mérites respectifs des différentes filières sur une base "monocritère" (c'est-à-dire de répondre à la question: "comment se comparent les différentes options par rapport à tel ou tel critère?").
- Enfin, il nous semble important d'insister sur le fait que la lecture des tableaux 5.1 à 5.18 doit être faite avec une certaine prudence, ceux-ci présentant l'information de manière extrêmement condensée. Une analyse critique et une "mise en perspective" de ces données brutes, telles celles réalisées dans le chap. 5, sont à cet égard indispensables.

Les mérites respectifs des filières sélectionnées ayant précisément déjà été analysés dans le chap. 5 pour chacun des critères retenus, nous n'y reviendront pas ici sinon pour faire notre la conclusion générale suivante tirée de la Conférence d'Helsinki:

"Tous les principaux cycles du combustible des systèmes de production d'électricité, une fois dotés des technologies les plus récentes, peuvent fournir de l'électricité moyennant des risques relativement faibles pour la santé et pour l'environnement, exception faite des émissions de CO₂ provenant de l'utilisation de combustibles fossiles".

A laquelle on peut ajouter les recommandations suivantes, toujours tirées de la même conférence:

" L'expérience acquise permet de dire que ces nouvelles études (comparatives) seront d'autant plus utiles qu'elles seront plus étroitement liées à des contextes décisionnels spécifiques. On s'oriente donc vers l'intégration des effets sur l'environnement et sur la santé dans différents scénarios de production d'électricité qui combinent diverses sources d'énergie et les relient au contexte socio-économique pour lequel ils sont envisagés. Ces nouvelles études comparatives de risques devraient être réalisées sur la base de régions formant une entité géographique, démographique et économique cohérente et homogène du point de vue de l'offre et de la demande d'énergie. Avec cette approche à dimension socio-économique, il est clair que la question des limites des systèmes devrait être abordée spécifiquement à la lumière des contraintes inhérentes aux mêmes systèmes ".

REFERENCES

R - 2

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
1	Journées romandes des électriciens	Nov. 87	Analyse du potentiel des ressources hydr.	Energie hydro-électrique	M. Mayer	Office féd. écon. des eaux	**
2	Journées romandes des électriciens	Nov. 87	Analyse du potentiel des autres éner. ren.	Energies renouv.	J.-C. Mayor	PSI, NEFF	**
3	Cahiers de l'électricité No 5	Mars 89	Caractéristiques des éner. renouvelables	Energies renouv.	J.-C. Mayor	PSI, NEFF	**
4	Cahiers de l'électricité	Mars 89	Recherche, la Suisse y croit	Energies renouv.	M. Roux	NEFF	**
5	Etude réalisée dans le canton de Berne	Juin 89	Exploit. d'éoliennes dans canton Berne	Energie éolienne	METEOTEST, Berne	METEOTEST, Berne	
6	Energie Plus No 85	Sept. 89	Point de vue sur les petites centrales hydr.	Energie hydro-électrique	L. Moniton	AFME, France	*
7	Energie, environnement, sécurité	Mai 86	Les éoliennes et leur développement	Energie éolienne	R. Bautz, ing.	Electricité neu-châteloise	*
8	Energie, environnement, sécurité	Mai 86	Développement d'une éolienne de 10 kW	Energie éolienne	R. Bautz, ing.	Electricité neu-châteloise	*
9	Cahiers de l'électricité no 9	Mars 90	Possibilités tech. pour l'approvision. futur	Techniques alternatives	W. Hossli	Directeur ABB	**

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
10	Cahiers de l'électricité No 9	Mars 90	Moins de fossiles, oui mais comment	Energie et environnement	T. von Weissenfluh	Electrowatt, Zurich	*
11	Revue de l'énergie	Sept. 91	Le développ. énergét. dans dynamique env.	Energie et environnement	G. Scrlas, P. Verstraete	LASEN, DGC EPFL	
12	Cahiers de l'électricité	Mars 90	Energie et environnement	Energie et environnement de la confusion	P. Suter	EPFZ, Zurich	*
13	Style de vie chrétienne et environnement	Oct. 89	Energie, les faits et les conduites	Ethique	Foi+Economie	CP28 Fribourg	
14	Energie, smog, CO ₂ , radioactivité		Des risques et des parades	Environnement et risques	J.-F. Dupont	EOS, Lausanne	***
15	Petits aménagems. hydro-électriques en Suisse	1987	Utilisation des forces hydrauliques en Suisse	Energie hydro-électrique	Groupe d'étude	Office féd. économie des eaux	*
16	Aménagements hydro-électriques		Classification des aménagements hydro-électriques	Centrales hydro-électriques	R. Sinniger, P. Henry	DGC, DME EPFL	
17	Cedra actualités	Mars/ Avr. 90	Surveillance et stockage définitif	Stockage du combustible irradié	CEDRA	CEDRA, Baden	
18	ASPEA	Nov. 81	Le couplage chaleur-force à partir de cent. nucléaires	Production combinée chaleur/électricité	J.-Ph. Borel	EOS, Lausanne	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
19	Congrès d'Athènes	Juin 85	Acceptation et risques comparés des différ. énergies	Comparaison des risques dans la product. électrique	Groupe d'experts	UNIPEDÉ	**
20	Bulletin ASPEA No 19	1985	Quelle est la situation actuelle de l'énergie nucléaire ?	Energie nucléaire en Suisse	H. Albers, M. Pellaud	Electrowatt, Zurich	
21	Statistiques suisses de l'électricité	1989	Statistiques consom., production indigène	Electricité, product. consommation	Office féd. énergie	Berne	
22	Scénarios énergétiques GESE	1988	Préal., possibilité, conséq., abandon nucléaire en Suisse	Nucléaire/autres énergies->Electricité	Grpe experts	Berne	***
23	L'électricité d'origine hydrauliques		L'exploitation des ressources hydrauliques	Energie hydro-électr. en Suisse	J.-H. Meyer	Office électricité Suisse romande	
24	Guide des visites d'install. électriques		Info. générales sur les différentes centrales	Différ. caractérist. techniq. des central.		Office électricité Suisse romande	
25	RWE UMWELT-BILANZ		Info. générales	Différ. caractérist. techniq. des centr.			
26	Centrale thermique de Chavallion, Revue de Fach-berichte 88/1	1988	Caractérist. techniques de cette centrale	Le fonctionnement de Chavallion	M. Rollier	EOS, Lausanne	
27			Umweltfreundliche Kohleverstromung	Constr. traitement fumées centr. charbon	Badenwerk	EOS, Lausanne M. Rollier	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
28	Fach-berichte 87/1	87	Blockheizkraftwerke- Paternösung für eine dezentr. ...	Diffr. types produc. électricité	Badenwerk	EOS, Lausanne M. Rollier	
29	Staub-Reinhaltung der Luft		Weltkongress der IUAPPA	NO2, CH4, NOx, ...			*
30	Bulletin des médec. suisses		L'air c'est la vie	Valeurs limites d'émission	Otto, Scholer Moser	Bâle, Bâle, Lausanne	**
31	OFPE		Les milliards de l'éco- logie	Milliards pour la pollution			
32	Rap. Genève, Centre écologie humaine		Bitan des coûts écon. de la pollution	Coût de la pollution	G. Pillet	Genève	**
33	Exxon Research and Engineering & Co		The Environmental Influence of Coal Liquefaction	Charbon co alternat.:	Magee, Jah- ning, Kafalde!	Linden	
34	Union inter. prod. distrib. Energ. élect.		Effets atmosph. Prod. therm. à combustible fossil	Diffr. émissions	Grpe experts	Paris	
35	EOS/YR (note interne)	1987	Effets sur la santé des principaux polluants atmosphériques	Diffr. émissions	Y. Rollier	EOS, Lausanne	*
36	Energie-gaz naturel		Importations gazières suisses	Diffr. valeurs production, import.	Ser. docu. ind. gaz suisse	Lausanne	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
37	Le projet COMPASS		Incidences sur l'env. des énergies renouvel.	Energies renouvel. dans prospect. glob.	OCDE	Paris	*
38	Bulletin VSE-UCS Rap. congrès CME		Aspects économ. scénar. énerg. mond.	Couverture des besoins	Baumberger	NOK, Baden	
39	Bulletin VSE-UCS Rap. congrès CME		Possibilités techn. approuv. de demain	Tour d'horizon des différentes énergies	W. Hossli	ASEA Brown Boveri, ZH	
40	Cahiers électricité No1	Oct. 87	Où vient l'énergie dans le chauffage ?	Interv. diff. agents énerg. dans chauff.	M.F. Roth	Off. électr. suisse Romande	
41	Cahiers électricité No 8	Déc. 89	Vaud, archives. cant.	Prix achat agents couplages	Berthoud	Canton de Vaud	
42	Cahiers électricité No 10	Juill. 90	Plaidoyer pour une énergie qui n'a pas démerité	Risques, besoin	J. Rognon	Elect. Neuchâtel.	
43	Cahiers électricité No 10	Juill. 90	Les réacteurs chauff.	Contribution assainissement de l'air	G. Sarlos	EPFL, Lausanne	
44	RGN-1984	Mars/ avril 84	Coûts comparés KWh charbon dans CEE	Compétitivité élect. nucléaire dans CEE	G. Gerini	Direct. générale Energie CEE	*
46	Lab. Gén. Mammif. Cent. Etudes Nucl.		Impacts des diff. formes prod. élec. sur santé humaine	Action mutag. de diff. formes énergétiques	A. Leonard	Univ. Catholique de Louvain	**

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
47	UNIPEDE		Compar. risques associés aux sources éner.	Prob. d'accid. avec effets cancéri.		UNIPEDE Friedland, Paris	***
48	Energie électrique en Suisse occident.		Rôle de EOS, Canton Valais	Electric. consomm. production	Grpe Experts EOS	Lausanne	
49	Energies renouvelables		Les énergies renouvelables	Appréciation des énerg. renouvelables	Grpe Experts EOS	Lausanne	
50	Electricité : Information UCS	1989	Augment. rapide nbré inst. photovoltaïques	Place dans réseau distribution	UCS	Zurich	
51	Chaleur et force au gaz naturel		Possibil. de product. décentral. de courant électrique	Utilis. pour produire de l'électricité			
52	Elektrizitätswerke des Kantons Zürich		Solarzellen-Pilotanlage im Unterwerk Aathal	Coût du solaire (Cf Borel)	Grpe ingén. (Cf Borel)	EOS, Lausanne	***
53	Modern Power Systems		Placerita combined cycle goes on line	Turbines gaz, émissions, cogénération	Scialzo, Mc Laurin, Sato	Westinghouse..., Mitsubishi Inc.	
54	Revue Polytechnique		Energie solaire en CH, efforts méritoires	Etat actuel technique Recherche	P. Suter Comm. expert	Commis. experts	
55	Rwe - Anwendungs-technik	1989	Photovoltaik in partnerschaft mit der Natur	Impact écologique à Kobern-Gondorf	Borel	EOS, Lausanne	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
56	Cours cycles postg. EPFL	1990	Energie renouv. études de cas	PV Mont-Cheseau+ Mont-Soleil+éolien. biog.	P. Verstraete	EPFL, Lausanne	
57	1+T/RTS	Mai 86	Eoliennes et leur développement	Eoliennes, nature, Avantages nucléaire autres énergies	R. Bautz	EPFL, Lausanne	
58	EOS/YR (note intime)	Juin 86	Approvis. en électr. et protect. de l'environ.	Avantages nucléaire autres énergies	Rollier	EOS, Lausanne	*
59	Document dossier	1989	CEE proposit commis sur énergie-environ.	Adoption de mesures	CEE		
60	Départ. Travaux Publics, Genève	1988	Adaptation installations cantonales traitement résidus	Rapport d'impact sur l'environnement	Soc. Ing. Schindelholz, DENE	Genève	*
61	Revue tech. SULZER Sommaire 2/90	1990	Coupl. chaleur-force, production d'énerg. noble	Facteurs appréc. chaleur/force	H. Hess	Equip. techn. bâtiment	*
62	Revue tech. SULZER Sommaire 2/90	1990	Valeurs limites d'émis. de NOx réduites	Evolution internat. Emission	R. G. Bässler	Equip. Techniq. Bâtiment	
63	Revue tech. SULZER Sommaire 4/90	1987	Possibilités et limites des énergies renouvel.	Analyse problèmes Ressourc., énerg. fut.	H. Mohr	Univ. Ludwig,	
64	Revue tech. SULZER Sommaire 1/87	1987	Turbine à gaz type 10: Ecolo. et conception		A. Marriot		*

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
65	Revue tech. SULZER Sommaire 1/87	1987	Désulfuration des gaz, fumée selon procédés	U. Gasche, B. Lorétan P. Bomi			
66	Revue tech. SULZER Sommaire 3/89	1989	Centrale énergét. so- latore 30MWe démons.	Etude recherche énerg. renouvelable	H. Fricker	Division génie Sulzer	*
67	Revue tech. SULZER Sommaire 3/89	1989	Elimination déchets spéci. pour sauve. envir.	Déchets, compatib. environnement	I. Aegerter	Direction travaux publics Zurich	*
68	Rapport instal. cant. traitement résidus	1988	Adaptat. instal. cant. traitement résid.	Traitement déchets spéciaux	Sté ingén. Shindelholz	Genève	*
69	OCDE Nuclear energy Agency		Projected costs of Generating Electricity	Different costs production d'électricité		Paris	*
70	Electrowatt Ingenieur unternehm. AG7/87	1987	Blockheizkraftwerke BHKW	Bilan tech. et écon.	Groupe ingén. Electrowat, Zurich		
71	Nouvelles tech. éner.	1988	Possibilités et limites	Possib. et tech. des énergies renouv.	Office fédéral de l'énergie	Berne	*
72	Forenergy Forum européen	1986	Notes prises par ingé- nieurs EOS	Valorisation des dé- chets/incinération	Rollier	EOS, Lausanne	**
73	Touring Club Suisse		Technique et envi- ronnement	Emissions NOx, SO2 HC, bilan	Groupe ingénieurs	TCS-EMMEN	
74	Kernenergie		Energie und Gesund- heit	Santé, accident de travail, agents énerg.	Meinrad, Schär	Université Zurich	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
75	PTB-Mitteilungen 2/1979		Radioaktive Stoffe in Flugaschen aus Kohlekraftwerke	Activités spécifiques des éléments	W. Kolb		
76	UNIPEDE	1982	Particules et éléments traces	Concentration, radioactivité, cent. cha. atmosphériques	Groupe experts effets	Paris	*
77	Ecolog. Hic	fév. 82	Cancers du charbon (étude russe)	Radiation et cancers charbon/nucléaire	Iliin, Krishnikov, Barkhi	Rollier EOS Lausanne	
78	GRS-KURZ-Information	1981	Stellungnahme der Strahlenschutzkommission zum ...	Radioactivité du charbon	mbH (GRS)	Köln	
79	Bulletin ASPEA No 8	1981	Facteur charge cent. nucléaire, état 1980	statistiques centrale nucléaires (CH et Etr.)	ASPEA		
80	Program. impulsion install. tech. bâti.	1986	Les installations solaires d'aujourd'hui	Solaire, transport stockage, durabilité	PIITB	Bibliothèque EOS	
81	Photonetics SA Doc. techniques		Panneaux solaires 4330EG, cellules sol.	Caract. tech. installation solaire	Photonetics	Nyon	
82	Cahiers du Service Service chauffage		Instal. solaires pré-chauffage eau chaude fonsct. investis.	Dimensionnement	C. Macherel G. Krebs	Construction et Voirie, Genève	
83	Gaz naturel CH+		Industrie gazière suisse dévelop., distribution	Structure et état d'approvisionn. GN	Groupe CH+ OPEN		

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
84	Publication CEE		Méthode calcul coûts product. énergie élect.	Estimation coûts cent. classiq. nucl.	Groupe experts CEE	Bruxelles	
85	Publication UVACIM	Nov. 87	Gaz naturel, énergie en plein essort	5 avantages décisifs pour le gaz	P. Freudweiler	Commission fédérale énergie	
86	La Suisse	Nov. 87	Le gaz naturel d'URSS	Accord énergétique pour vingt ans	RG	Zurich	
87	VGB Kraftwerks-technik	Janv. 86	Schwermetallgehalte im Rauchgas	Pollution /métaux lourds dans fumée	G. Erbach, P. Schöner	GmbH, Hanau	
88	VGB Kraftwerkstechnik	Janv. 87	Kraftwerkneubau oder Umweltschutz-Erfüchtigung	Coût investissement dépollution	H. Gramer	PreussenElektrica SA, Hannover	
89	Cahiers de l'environ. (OFPE)	1987	Enquête sur les déchets spéciaux en Suisse	Inventaire qualit./quantit. déchet spéc OFPE	Groupe exp.	Berne	*
90	PTB Mitteilungen	1979	Radioaktiv in Flugaschen aus Kohlekraft.	Radioactivité du charbon	W. Kolb		
91	Revue de l'énergie	1983	Prix futur du charbon vapeur (géopolitique)	Réerves comb. solide et pétrole	R. Ovart	OCDE	*
92	Sciences et techniq.	1980	Combustion en lit, réponse d'avenir	Retour du charbon assoc. à nouvelles tech.	J.-F. Large France	Univ. Compiègne	
93	Sciences et techniq. No 63		Avenir du charbon aux USA	Conso. marché, coût techn. de liquéfact.	Mission amb. Fr. France	Ambassade France USA	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
94	Nation. Radiological Protection Board		Coal-fired Power Stations	Radiation, dose est. centr. 2000 MWe	W.C. Camplin	Harwell, Didcot, Oxon	
95	OCDE		Projected costs of generating electricity	Méthode, hypothèse estimation	Grpe experts	Paris	
96	OCDE	Janv. 86	Elektrizität aus Solarkraftwerken	Potentiel production coût électr. sol.	W. Durisch B. Hofer		**
97	EIR Bulletin No 57	Janv. 86	Kosten von Emission-beschränkungen	Possibilité, coût limitation pollution	Groupe ingénieurs		
98	VKR Informationen		Fernwärmekraftwerk Buer	Données tech. centr. chal. à dist. Buer	Groupe ingénieurs	Rollier, EOS Lausanne	**
99	VKR Informationen		Kraftwerk Scholven	Données techn. cent. Rollier, EOS	Groupe ingénieurs		
100	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen		VEW-Kohle-Umwandlungsverfahren				
101	Pour la Science	Nov. 87	Futures centrales au charbon	Prod. électricité + économ. , polluan.	R. Balizser, K. Yeager		
102	World Energy Conference	1989	National Energy Data Profile Suisse	Sources prod. énergies	Comité suisse WEC		**
103	Association suisse de l'industrie gazière		Gaz naturel, faits et chiffres	sécurité, approuv. écon. propreté, gaz	Groupe ingénieurs	Rue Richard Lausanne	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Non auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
104	Revue techn. Sulzer Sommaire 3/89	1989	Modernisation de turbines à gaz	Augmentation renta- bilité, disponibilité	K.Koster	Div. Turbomach. Sulzer	*
105	EIR-Bericht No 528	1984	Abgasmessungen an stationären Gasmotor	Centrales thermiques à gaz, fuel	M. Koebel	EIR, Würenlingen	***
106	La géothermie en Suisse	1990	Gisements et possib. d'utilisation	Diff. possib. d'exploit. géothermique CH	R. Weber A. Fehr	OPEN, Berne	*
107	Solarzellen	1985	Nutzungsmöglichkeiten in der Schweiz	Possibilités utilisation énergie solaire	M. G. Real	AGFA Real AG Zurich	
108	BW K	1990	Zukünftige Rolle nu- klearer und erneuerb. Energie	Comparaison nuclé- aire/autres agents énergétiques	A. Voss	Stuttgart	
109	OPEN	1989	Simulation numérique d'une pile céramique au gaz naturel	Programme simul. pile céramique gaz	R. Gruber	GASOF EPFL Lausanne	
110	SIA	1990	TISO, instal. photo- volt. 4kW modules Si	Installations photo- voltaiques	M. Camani	Sezione energia Bellizone	
111	SEV	1989	Schnelle Reaktor, SIN Konzept, Sicherheit	Réacteurs rapides pr. utilis. lg terme Nu	P. Wydler	PSI, Villigen	
112	UNIPEDE	1982	Etud. technologies av. pour centr. électr.	Rendem. centrales	Grpe experts	Av. Friedland	***
113			Modèle stockage ds concurr. entre procéd.	B. Saugy	cf Borel, EOS Lausanne		

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
114	EOS, Rapport interne		Approvis. en électric. protect. de l'environ.	Protection environ. Dispersion émissions	Grpe experts	cf Rollier, EOS Lausanne	
115	EIR-Bulletin No 51	1984	Dezentrale Wärme Kraft Koppelung	Caractéristiques	Grpe experts EIR	EIR, Würenlingen	*
116	EOS-Bulletin interne	1985		Emissions mesurées moteurs gaz/diesel	Y. Rollier	EOS, Lausanne	***
117	Cahiers électricité No 8	Déc. 85	Coupl. chaleur-force comptable avec env.	Emissions mesurées diff. types CCF	Joop van Gilst	Argus Engineering Lausanne	***
118	Cahiers électricité No 5	Mars 89	Caractér. énergies renouvelables	Energies renouvel.	J.C. Mayor	PSI Würenlingen	
119	Cahiers électricité No 5	Mars 89	Nvelle jeunesse pour couplea. chaleur-force	Chaleur-force	J. Van Gilst	Argus engineering	**
120	Cahiers électricité No 6	Jun 89	Approv. sûr sans nvelles grdes centrales	Avenir futures cent.	M. Lenzlinger	Energie ville Zurich	
121	Cahiers électricité No 3	Jun 88	Déchets nucléaires et les autres	Déchets en général	B. Pellaud	Soc. Suisse Ing. Nucléaire	
122	Revue Ciba-Geigy		Face à l'énergie	Diff. agents énerg.	H. U. Meister	Ciba-Geigy	***
123	OMS rapport sur une réunion	Jul 83	Effet sur la santé des diff. types d'énergie	Diff. sources d'éner. et impacts	Grpe experts	Bureau régional Europe Copenhag.	**
124	Rapport sur congrès de la CME	1990	Energie pour demain	Consomm., réserves d'énergie renouv.	Th. von Weissenfluh	Electrowatt	**

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
125	Hebdo No 13	Sept. 90	La ronde des énergies	Comparaison génér. diff. agents énerg.	P.A. Stauffer		
126	Elektrizitätswirtschaft	1983	Strom im Wärmemarkt	Comparaison des émissions polluantes	V.Hutterloher W. Pillet	Isar Amperwerke München	**
127	VKR Informationen		Das Fernwärmekraft. Buer	Données techniques	Grpe experts	cf. Rollier, EOS, Lausanne	*
128	VKR Informationen		Kraftwerkstandort Voerde	Données techniques	Grpe experts	cf. Rollier, EOS, Lausanne	*
129	UCPTE		Améliorations fonct. grands générateurs	Qualité du service attendu/centr. charb.	Grpe experts	cf. Rollier, EOS, Lausanne	*
130	OPEN Publi. No 35 Commission techn. CAD		CFF modulaires, centr. à énergie totale équipes	Chaudière gaz/mo- teur gaz (rentabilité émission)	Grpe experts	OPEN, Berne	*
131	Motortechnische Zeitschrift 44	1983	Stadtgasmotor, um- weltfreundlichkeiten	Centrale CAD émissions	Mollenhauer H. Pucher	Technische Uni. Berlin	*
132	VGB Kraftwerks- technik	1985	Dezentrale Stromer- zeugung	Compar. succincte diff. centrales électr.	O. von Funke	Energ. Versog. Schwab, Stuttgart	*
133	EIR Bulletin No 51		Dezentrale Wärme- Kraft-Kopplung-Char	Caractérisation du CCF	J.C. Mayor	PSI, NEFF	*
134	Power Engineering	1988	Direct. coal-fired gas turbine development	Turbine à gaz (charbon)	RW Smock		

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
135	VGB Kraftwerkstech.	1987	Steigerung von Wirkungsgrad/Verfügbarkeit	AF Armor GL Touchton	Kraftwerk Union Erlangen	*	
136	Revue Brown Boveri	1985	Centrale combinée 300 MW avec gazéific. charbon	Schéma installations performance, coût	R. Kehlhofer	ABB, Zurich	***
137	VGB Kraftwerkstechnik	1987	Steigerung der Wirtschaftlichkeit. von ...	Centrales à vapeur (à charbon)	A. Aerni, R. Kehlhofer	ABB, Baden & Mannheim	
138	VGB Kraftwerkstechnik	1984	Kohleveredelung als alternative zu Umweltschutzma.	Centrale combinée diff. types centrales charbon	R. Müller	Kraftwerk Union Erlangen	*
139	VGB Kraftwerkstechnik	1986	Strukturwandel in der technik. fossilheizer Kraftwerk	Centr. therm. fossil. in RDA	H. Freyer	Kraftwerk Union Erlangen	***
140	VGB Kraftwerkstechnik	1986	Zukunftsweisende Techni. im Kraftwerk.	Recherch. actuelles sur centrales	G. Hirschfelder	Veba Kraftwerke Ruhr AG	
141	Revue Energie No 396	87	Grenoble 2ème chauf. urbain de France	Diff. moyens de production	R. Cazenave	Compagnie de chauffage	
142	Brennst. Wärme Kraft No 10	Oct. 92	Versuchsbetrieb Modelkkraftwerk Völklingen/raufen	W. M. Meyer BWK 1978	Cf M. Röller, EOS, Lausanne		
143	Revue Brown-Boveri	1982	Centrale de chaufa. chaudière à fl. fluid.	Centr. charbon petite et moyen puissance	P. Wengfeld	ABB Mannheim	**

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Non auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
144	Schweizer Ingenieur und Architekt.	1983	Atmosphärische Wirkungsdickefeuerung				***
145	Expertengruppen Energieszenar. No 20		Potential, Einführungs-Geschwindigkeit Kosten Solar	Centrales solaires, Projet Alpes	W. Durisch H. Fischer	EIR Würenlingen Elektrow. Zürich	***
146	Expertengruppen Energieszenar. No 23		Energie aus Biomasse	Centrales biomasses	Grpe experts	Infosolar, Tänikon	***
147	Expertengruppen Energieszenar. No 18		Capteurs solaires et hautes températures	Centrales photovoltaïques	O. Guisan	Section phys. Uni. Genève	***
148	Expertengruppen Energieszenar. No 19		Potential Solarzellenanlagen	Installations solaires	Grpe experts	Alpha Real AG Zürich	***
149	Off. féd. écon. des eaux comm. No 2	1987	Petits aménagements hydro-électr. en CH	Centrales hydro-électriques	Grpe experts	OFEE Berne	**
150	Off. féd. écon. des eaux		Statist. amén. hydro-élect.	Centrales hydro-électriques	Grpe experts	OFEE Berne	**
151	Cycle postgr. en énergie EPFL	1990/91	Fossil fired plants	Centrales thermiques	Dr G. Gyarmathy		*
152	Cycle postgr. en énergie EPFL	1990/91	Energies renouvelables	Energies renouvelab.	P. Verstraete	EPFL-LASEN Lausanne	***
153	Cycle postgr. en énergie EPFL	1990/91	Fiabilité et sécurité des installations éner.	Général (risque, acc. impact, ...)	P. Verstraete	EPFL-LASEN Lausanne	***

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
154	Cours cycle postgr. EPFL	90/91	Economie gaz naturel	Gaz naturel	E. Defago	Cf LASEN Lausanne	**
155	Chaire inaugrale Uni. Louvain	1982	Méthodol. analyse du risque assoc. form. én.	Général	J. Devooght	EPFL, Lausanne	***
156	Forschungsergebn. BMFT	1986	Daten und Fakten für Nutzung regenerat. En.	Energies "régénératives"	Grpe experts	BMFT Bonn 86	**
157	Programm. Systemforsch/Techn. Entw.		CO2 Emissionen Energieversorgung	Emission de CO2	Dr H. Wagner	Forschungszentru. P5170 Jülich	***
158	Revue OCDE Ag. Int. Energie Paris	1987	Sources d'énergies renouvelables	Energies renouvelab.	Grpe experts OCDE	OCDE , Paris	***
159	Techniques de l'énergie	Nov. 81	Technologies de combustion du charbon	Techn. fluidisation. combustion charbon	R. Dumont	Creusot, Loire	*
160	TGVB Kraftwerks-technik	Déc. 84	Kohleveredelung als Alternative Umwelts.	Emissions suivant techniq. charbon	R. Müller	Kraftwerk Union Erlangen	**
161	VGB Kraftwerks-technik	Mars 87	Steiger. der Wirtschaft. von konv. Damkraft.	Centrale combinée: données techniques	A. Aerni	ABB, Baden	*
162	Revue Brown Boveri	1982	Centrales à chaudière lit fluidisé	Centrales charbon	P. Wengfeld	ABB Mannheim	*
163	VGB Kraftwerks-technik	1987	Steiger von Wirkungsgrad und Verfügbar.	Centrales charbon : combinées + gazéifiq.	Af. Armor	EPRI Palo Alto	*
164	Revue de l'énergie	Oct. 87	Energie charbon, fact. mattise énergie	Centr. charbon: analyse réseaux chaleur	M. Bever	GL Touchton USA	*
						CDF Energie service résident	*

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
165	Revue de l'énergie	Oct. 87	Progrès technolog. matériels d'utilisation	Centr. charbon: techn. modernes	S. Delessard	CDF Energie	*
166	Revue de l'énergie	Oct. 87	Techn. dévelop.: foyer à projection	Centr. charbon	J.Y. Carosso	CITIC	*
167	Revue de l'énergie	oct. 87	Chaudières automatisques	Centrales charbon: automatisation	J. Verrier	Seccacier SA	*
168	Revue de l'énergie	Oct. 87	Grille vibrante et lit fluidisé froid	Centrales charbon	M. Chrétien	Lardet BABCCCK	*
169	Revue de l'énergie	Oct. 87	Etudes cas: Grenoble 2ème chauffa. urbain	Centrales charbon + ordure + chauffage	R. Cazenave Direct. CGC	Cie Gle de chauffe	*
170	Schweizer Ing. und Architekt.	1983	Atmosphäre Wirbelschichtfeuerung	Centrale charbon	HR Schenk	Winterthur	*
171	Revue Techn. Suizer	1983	Foyer lit fluidisé applic. écolgie rentab.	Centrale charbon	HR Schenk	Sulzer Chaudière/ Génie nucléaire	*
172	Auftrag KNS	1990	Übersicht über Method. social costs ener. cons.	Energie solaire	D. Spreng Zürich	IEH ETH Zentrum	*
173	EIR		Sans titre: partie de document	Centr. charb. pétrole gaz et Moteurs	Grp experts	Cf. M. Rollier, EOS	**
174	Revue OCDE, Paris	1989	Prévision des coûts de l'électricité(1995-2000)	Centrales thermiques	Grp experts	OCDE, Paris	*
175	Revue OCDE, Paris	1989	Environmental impacts of renewable	Energies renouvelab.	Grp experts	OCDE, Paris	*

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
176	Revue Ass. Suisse de l'Ind. Gazière	1989	Chaleur et force au gaz naturel	Gaz naturel	Grpe experts	Lausanne	***
177	Fondation for environ. conservation	1985	Solar-hydrogen energ. system for environ. compatib.	Production électr. à production hydrogen	M. Bockris, T.N. Veziroglu	Dpt Chemis. Uni. Texas, CERI Uni Miami	*
178	Cycle postgr. en énergie EPFL	1990/91	Nuclear power	Centrales nucléaires	Dr P.A. Haldil	EPFL, LASEN, Lausanne	*
179	Manuel pour ingén./économ. Pergamon.	1975	Economie et prospectives	Energie en général	A. Gardel	EPFL-Lausanne	***
180	Projet Compass de l'OCDE, Paris	1988	Incidence sur environ. des énerg. renouv.	Energies renouvelab.	Grpe experts	OCDE, Paris	***
181	Public. VSE-UCE Zürich	1989	Augmentation rapide nombre install. photo. well	Installations photovoltaïques	Grpe experts	VSE-JCS, Zürich	*
182	Modern power system	Sept. 88	Wind/diesel fares	Cogénér. Eolienne/ moteur diesel	Incorporating Energ. intern.	Cf Borel, EOS Lausanne	*
183	Cours: anal. systèmes énergétiques	1990	Besoins socio-économ. fondamentaux	Diff. besoins énergét. mondiaux	G. Carlos	Lasen, EPFL	*
184	Projet Général SATOM	juin 88	Epuration rejets gazeux et amélior. instal.	Centre incin. déchets	Grpe experts + ingénieurs	SATOM Monthey	*
185	Rapport annuel d'activités	1987		Centre incin. déchets	Conseil administration	SATOM Monthey	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Non auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
186	Publication OPEN	1988	Nouvelles techniques énergétiques	Nouvelles sources d'énergie	Grpe experts	OPEN, Berne	
187	Rapport OCDE Agence Energie Nuc.	1983	Coûts production Ener. élec. centr. nucl. charb	Centr. nucléaire + charbon coût kWh	Grpe experts	OCDE, Paris	
188	Assemblée générale UCS	1986	Réflexions sur avenir énergétique	Energie, réserves, potentiel	A. Gardel	EPFL, lausanne	
189	BWK No 3	1991	Perspektiven der Photovoltaik	Photovoltaïque	K. Hassmann Keller.Stahl	Erlangen	
190	BWK No 3	1991	Erfahrungen mit netzgekoppelten Phot.	Photovoltaïque	W. Knaupp	Stuttgart	
191	BP Statistical Review of World Energy	1990		Réerves énergies	Grpe experts		**
192	Nuclear Power Technology	1983	Livre			Clarenden press Oxford	**
193	Elements of Nuclear Engineering	1982	Livre		Prof. Ligou	Ligou, Harwood Acad. Publishers	
194	Ingénieurs et archit. suisses No 27	Mars 90	Gestion déchets, réd. volume déchets	Incinération déchets	HP Fahrni	OFEFP-BUWAL Berne	
195	Rapport Agence Int. Energie	1987	Sources Energies Renouvelables	Energies renouvelab.	Grpe experts	AIE-OCDE	***
196	Technical report series No 241	1994	Expansion Planning Electr. Generat. Syst.	Système énergétique	Grpe experts	AIEA Vienne	**

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
197	6ème congrès annu. exposition Bâle	Mai 91	Environ. et énergies renouvelables II	Energies renouvelables	Grpe experts	Intern Hightech-Forum, Bâle	• *
198	Kraft/Wärme/ Kopplung	Fév. 87	Grenzänge mit gas	Moteurs-turbines à gaz	HA Rostek D. Rathmenn	Gaswärmegesellschaft, Dorsten	• * *
199	Senior Expert Sym- pos. on elec.-envir.	Mai 91	Key issues papers	Filières d'électricité	Grpe experts	IAEA, Vienne	• *
200	Comité National Suisse de CME	Déc. 89	Energie demain	Energie, économie, technologie, envir.	Grpe experts	P. Kraftt Electrowatt, ZH	• *
201	IAEA ref. Data series No 1	Juil. 90	Energy, electr. and nucl. power estimates	Energie nucléaire	Grpe experts	Vienne	• *
202	OCDE/NEA	1990	Statistical update: re- sourc. produ. demand	Energie nucléaire	Grpe experts	Paris	• *
203	Cycle postgr. en énergie EPFL	1990/91	Le charbon	Charbon	J.P. Mussano	Rueil-Malmaison	• *
204	Union pétrolière	1990	Pétrole: Statistiq. suis- ses et mondiales	Pétrole	Grpe experts	UP, Zürich	• *
205	Solarzellen	1985	Nutzungsmöglichkeiten in der Schweiz	Energie Photovoltaï- que suisse	G. Reali	Alfi Real AG	*
206	OCDE	1988	Energie nucléaire et cycle combustible	Energie nucléaire	Grpe experts	Paris	*
207	Séminaire SOSIN	1983	Etude démantèlement centrales nucl. CH	Centrales nucléaires	Grpe experts		

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
208	Nuclear engineering international	Août 85	Dossier Decommissioning	Démantèlement cent. nucléaire	Grpe experts		**
209	Brennstoffwärme-kraft (BWK)	Avril 90					
210	Mandat EPFL-LENI No 91057	Mai 91	Analyse thermodyn. UIOM Valais	Efficacité de transformation	V. Cutti D. Favrat	EPFL-LENI	
211	Cycle postg. en énergie EPFL	1990/91	Le charbon	Diversif. géopolitique	J.P. Mussano	ENSPM, Paris	*
212	Meteotest, Bern Windmessprogramm	Juin 89	Windenergienutzung	Potentiel éolien canton de Berne	Grpe experts	Dir. transports	*
213	Collection Verlag der Fachvereine	1989	Wieviel Energie braucht die Energie?	Energie: rendement coeff. retour énerg.	D. Spreng	VDF, Zürich	*
214	AIE-OCDE	1989	Prévision coûts de l'électricité	Coûts électr. énerg. fossiles	Grpe experts	OCDE, Paris	***
215	Cycles postg. en énergie EPFL	1990/91	Transport et stockage énergie électrique	Energie électrique (général)	M. Jufer	Cf LASEN-EPFL Lausanne	*
216	ASUE Revue	1991	Strom aus Gasdruck	Turbines et moteurs de détente	Grpe experts	Rationell. Erdgas-einsatz, Stuttgart	***
217	Ingenieure + Berater	Mai 91	Abschätzung des Potent. Photov. Anlagen	Potentiel suisse photovoltaïque	Grpe experts	EWI AG, Zürich	
218	Cahiers de l'environ. No 88	Avril 88	Installations traitement de déchet spéciaux	Inclination déchets spéciaux	Office fédéral protect. envir.	OFPE, Berne	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Nom auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
219	Rapp.: Evacuation commun. ordure CH	Janv. 90	Fiches techniques pour instal. UIOM	Stockage déchets (capacité ...)			
220	Kommission für Nutzung Sonnenen.	Sept. 89	Soziale Kosten im energie Bereich	Coûts sociaux et environnementaux	KNS, Berne	Berne	
221	Rapport Direct. gaz, Elect., fioul	1989	Coûts référence prod. élect. origine thermiq.	Evolution coût kWh nucl. charbon			
222	UNIPEDDE, rap. général Congr. Kébenhavn	Juin 91	Coûts production éner. électrique 1990	Prix revient, évaluat. équipem. 2000	Grpe experts Cost. G. Moynet	UNIPEDDE, Paris	***
223	UNIPEDDE	Juin 91	Etude prix revient des usines hydrauliques	Prix énergie hydraulique	Grpe Hydro. J.L. Jourdet	UNIPEDDE, Paris	***
224	BiNE Projekt Info-Service	Nov. 87	Einsatz kleiner Wind-kraftanlagen in BDR	Biene: prix sou- plesse production	Grpe experts BiNE, Bohn	BiNE, Bohn	***
225	BiNE Informations-paket	Sept. 84	Umweltfreundliche Kohlekraftwerke	Information techn. centrales charbon	Grpe experts BiNE, Bohn	BiNE, Bohn	***
226	BiNE Informations-paket	Avril 84	Kohleveredelung: Ver-gasung und Verflüssig.	Information techn. centrales charbon	Grpe experts BiNE, Bohn	BiNE, Bohn	***
227	Cahiers de l'environ. No 76	Déc. 87	Emissions polluantes en CH dues activ.hum.	Emissions	Grpe experts OFPE, Berne	OFPE, Berne	
228	Cahiers de l'environ. No 75	Nov. 87	Emissions polluantes air prov. sources natur.	Emissions NOx, CO2 CH4	Grpe experts OFPE, Berne	OFPE, Berne	

Numéro	Document	Année	Titre du document	Sujet traité	Non auteur ou source	Adresse professionnelle	Classe de l'information
229	Cahiers de l'environ. No 66	Jun 87	Comment réduire les émissions de composés organ. volatils	Emissions	Grpe experts	OFPE, Berne	
230	Cahiers de l'environ. No 55	Nov. 87	Emissions polluantes trafic routier privé	Emissions	Grpe experts	OFPE, Berne	

Annexe A: LISTE DES EXPERTS CONSULTES

(ordre alphabétique)

Prof. A. Baer	Office Fédéral de l'Energie (OFEN/BEW), Berne
Dr. M. A. Boillat	Inst. Universitaire de Médecine du travail et d'hygiène industrielle, Lausanne
Prof. J. C. Campiche	Institut d'Ethique Sociale de la FEPS, Lausanne
M. A. Colomb	Energie de l'Ouest-Suisse S.A. (EOS), Lausanne
M. J. J. Daetwyler	Journaliste scientifique, Berne
J. F. Dupont	Energie de l'Ouest-Suisse S.A. (EOS), Lausanne
Prof. D. Favrat	EPFL - Département de Mécanique, Laboratoire d'énergétique industrielle
M. J. F. Habermacher	Aumônerie universitaire, Lausanne
M. N. Houlmann	Soc. suisse de l'industrie du gaz et des eaux, Lausanne
Prof. J. C. Lambelet	UNIL - Hautes Etudes Commerciales, Lausanne-Dorigny
Prof. D. Mange	EPFL-Département d'Informatique, Laboratoire de systèmes logiques
Prof. L. Y. Maystre	EPFL - Département de Génie Rural, Institut du génie de l'environnement
M. G. Pillet	Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen
M. Y. Rollier	Electricité de l'Ouest-Suisse S.A. (EOS), Lausanne
Prof. G. Sarlos	EPFL- Département de Génie Civil, Laboratoire de systèmes énergétiques
Prof. J.-J. Simond	EPFL - Département d'électricité, Labo. d'électroméc. et machines électrique
M. J. Simos	EPFL - Département de Génie Rural, Institut du génie de l'environnement
M. C. Yechoouroun	EPFL - Département d'électricité Laboratoire d'électronique industrielle
Prof. J. Cl. Védy	EPFL - Département de Génie Rural, Pédologie

Annexe B: NOTES SUR LES METHODOLOGIES D'EVALUATION ET SUR L'ANALYSE MULTICRITERE

B.1 Caractéristiques et mérites de l'analyse multicritère

Nous rappelons succinctement comment nous sommes venus à considérer une approche de type multicritère pour comparer les mérites respectifs des différentes filières de production d'électricité. En raison de la croissance prévisible des besoins énergétiques mondiaux, de l'évolution des critères de choix de la politique énergétique dictée par ceux de la société contemporaine (de nouveaux critères, associés aux contraintes écologiques, à la limitation des ressources naturelles, à la prise en compte des risques aux générations futures, etc., venant s'ajouter aux critères plus conventionnels d'ordre technique et financier) et de la vocation de service public des entreprises électriques, il est apparu plus que nécessaire d'examiner toutes les filières (ou "variantes" selon la terminologie "multicritère") envisageables de production d'électricité par rapport à l'ensemble des critères de décision intervenant dans le choix des systèmes d'offre. En effet, il s'agit aujourd'hui pour les décideurs d'arriver à tenir compte le plus possible d'intérêts parfois divergents en vertu de la constatation suivant laquelle il n'existe pas de décision qui puisse être considérée comme la meilleure possible selon tous les points de vue, toute "optimisation" ne peut-être que relative. C'est pourquoi des méthodes d'aide à la décision ont vu le jour afin de fournir des outils mieux adaptés au traitement de ces réalités plus complexes. Ces méthodes se subdivisent selon les spécialistes en 3 grandes familles:

- la théorie de l'utilité multiattribut, qui consiste à agréger des points de vue différents en une fonction unique qu'il s'agit d'optimiser;
- les méthodes de surclassement, qui permettent la construction de relations appelées relations de surclassement, représentant les préférences solidement établies du (des) décideur(s);
- les méthodes interactives, où il s'agit d'alterner des étapes de calcul et de dialogue pour arriver à un consensus entre les différents acteurs.

L'analyse multicritère appartient au deuxième type de méthode. Elle consiste notamment à choisir une technique d'agrégation des préférences exprimées sur un ensemble donné (agrégation partielle de critères et non totale comme pour les méthodes fondées sur la théorie de l'utilité multiattribut) après avoir défini l'ensemble des décisions, modélisé les préférences, précisé les relations de surclassement, etc.

B.2 Méthodologie d'évaluation de la matrice filières x critères

Introduction à la méthodologie

Les hypothèses et postulats formulés dans le cadre de la présente évaluation globale des différentes filières de production d'électricité sont exposés ci-après. On y rappelle en particulier les principes et idées qui sont à la base d'une analyse de type multicritère. Rappelons que la structure de la base de données créée dans le cadre de cette étude pilote a été conçue dans l'optique d'une analyse de ce type, même si nous nous sommes limités dans la phase actuelle à l'examen des mérites de chaque filière par rapport aux divers critères pris individuellement.

On distingue trois étapes principales dans toute étude d'effets: l'identification des impacts ou effets, la génération de stratégies, l'évaluation des variantes. Le but de cette étude est de suivre une telle approche en établissant la matrice d'évaluation, c'est-à-dire en produisant l'ensemble des jugements ($G_j(a_i)$) qui permettent de qualifier les mérites des différentes filières "i" par rapport à chacun des critères "j" retenus. L'établissement de cette matrice n'est pas lié à la méthode d'agrégation qui sera utilisée pour l'évaluation finale. Le choix du modèle de décision est par ailleurs indépendant des données enregistrées dans cette matrice.

Problématique, définitions et objectif

Définition de l'évaluation

L'évaluation porte sur l'étude systématique des impacts prévisibles directs ou indirects qui peuvent résulter d'une action projetée. Elle résulte d'un processus

cognitif¹ négocié, structuré en plusieurs étapes; son but est d'aider à la prise de décision dans une optique de meilleure gestion du patrimoine confié au(x) décideur(s).

Problématique

L'identification et l'évaluation des critères économiques, techniques, environnementaux, etc. sont l'affaire de spécialistes de chacun de ces domaines, ceux-ci utilisant leurs connaissances des sciences de base: mathématiques, physique, chimie, biologie, sciences de la terre, etc. Par contre, l'évaluation globale des critères de décision, de leurs relations et de leurs "poids" relatifs n'est plus du ressort d'un seul spécialiste, car il n'existe pas de méthode scientifique universellement admise pour agréger les conséquences des différentes actions qui pourront être choisies sur la base des critères sélectionnés (l'ensemble des actions étant défini comme étant l'ensemble des objets, décisions, etc. que l'on explorera dans le processus de décision). L'exploitation des données fondamentales en vue de prendre une décision pose problème dans ce genre de démarche interdisciplinaire. Le choix des intervenants en particulier est primordial: l'échec de récents projets techniques pourtant légitimés par les instances scientifiques et politiques, mais finalement abandonnés devant l'opposition populaire, en témoigne.

Objectifs

Les principaux objectifs du LASEN et de l'EOS dans le cadre de cette étude pilote sont d'établir un récapitulatif des données fondamentales, ainsi que d'effectuer une première évaluation critère par critère des différentes filières de production d'électricité. Après cette première étape monocritère, une étude plus complète devrait aider à la définition d'une politique énergétique globale, qui permette de répondre à la demande en énergie électrique, tout en respectant les principes fondamentaux d'une bonne gestion de l'énergie:

- diversification de l'approvisionnement (diversification, stockage, exploitation rationnelle des énergies nouvelles);

¹ Cognitif: se dit des processus par lesquels un être vivant acquiert les informations sur son environnement

- utilisation économique et rationnelle des énergies et matières premières (aux stades du développement, de la construction et de l'exploitation des installations);
- meilleure gestion de la consommation d'énergie et de sa conversion;
- conformité aux directives et règlements en vigueur.

L'élaboration d'une nouvelle méthodologie d'évaluation et de décision pouvant aider les autorités concernées à prendre leurs décisions en intégrant les critères représentant l'ensemble des valeurs sociétales est le but assigné aux travaux de recherche qui devraient faire suite à cette étude pilote.

Importance du contexte de l'étude

Le développement actuel des méthodologies d'évaluation est le signe patent de la volonté des dirigeants de tout horizon de faire intervenir une appréciation fine des différentes valeurs de la société dans le processus de décision concernant les futures politiques à tenir en matière de gestion d'énergie. L'analyse multicritère est certes un outil intéressant pour effectuer une évaluation qui prenne en compte des valeurs autres qu'économique et technique ainsi que les points de vue d'acteurs très divers, cependant les différentes applications déjà réalisées de par le monde et les échecs enregistrés dans le cadre d'évaluations scientifiques enseignent que l'absence de réflexion sur le mode d'évaluation, et plus encore sur le mode d'agrégation de ces évaluations, facilite les abus, introduit divers biais et est la cause directe des insuccès rencontrés. C'est pourquoi l'évaluation doit être conçue par son coordinateur selon une méthodologie pertinente, explicite et bien expliquée à tous les participants. Nous avons par conséquent tenu à préciser ici les fondements des méthodologies d'évaluation et donc, a posteriori, de l'analyse multicritère.

Hypothèses de travail

Ce paragraphe précise le contexte dans lequel l'évaluation des filières de production d'électricité a été abordé:

- le cadre institutionnel et social est celui d'un pays démocratique et décentralisé;
- les décisions particulières prises par les instances politiques ne doivent pas restreindre le champ de la réflexion.

L'utilisation d'un processus négocié exige le respect des conditions requises pour la négociation: la principale restriction concerne la compatibilité des structures de décision (sociétés de production d'électricité) avec la négociation publique. Pour ceux qui souhaitent des indications plus détaillées, le présent développement s'inspire de l'ouvrage de M. J. Simos¹.

Postulats de base

Les postulats de tout processus d'évaluation sont les suivants:

- Postulat 1: tout acteur² impliqué dans une évaluation exprime une opinion qui, de son point de vue, est rationnelle.
- Postulat 2: le rôle de l'homme d'étude est de trouver une solution satisfaisante pour l'ensemble des acteurs en présence.

B.3 Aide multicritère à la décision et méthodes d'évaluation

Pourquoi une approche multicritère?

Nous avons brièvement rappelé les trois grandes familles de méthodes d'évaluation. En particulier, lorsqu'une action n'a pas de conséquences trop complexes et trop nombreuses, on peut envisager de retenir un seul critère d'évaluation capable de les appréhender toutes; en d'autres termes, exprimer chacune d'entre elles dans une unité commune. Mais trois écueils doivent être évités: exclure de l'évaluation les conséquences difficilement appréciables, réduire exagérément la réalité pour favoriser les comparaisons, ou aboutir à une formule complexe guère compréhensible par les décideurs. Quand l'hétérogénéité des conséquences est telle que ces difficultés ne peuvent être surmontées, il est alors préférable de retenir une analyse multicritère.

¹ "Evaluer l'impact sur l'environnement, une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation". J. Simos. Collection meta. PPR

² Acteur: celui qui prend une part active, joue un rôle important (Cf. Petit Robert)

C'est l'approche retenue pour le stade ultime du projet intitulé "Etude comparative des filières de production d'électricité"; la présente étude (étude pilote) doit permettre la sélection des variantes envisageables pour la production d'électricité ainsi que la définition des critères servant de base à l'évaluation. L'évaluation des critères est à ce stade effectuée individuellement. Dans une étape ultérieure, nous proposons d'utiliser une méthode multicritère qui correspond mieux au processus réel de la prise de décision et ne donne pas un faux sentiment de certitude. L'objectif de cette méthode est d'effectuer un choix dans une liste de scénarios cohérents; on en attend une réduction des situations conflictuelles, de leur complexité, en améliorant la transparence de la prise de décision et en mettant en évidence les bons et mauvais côtés de chaque décision.

Définitions: aide à la décision, problème monocritère, problème multicritère, processus de décision

Selon B. Roy, l'aide à la décision se définit comme étant l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision; ces éléments concourent à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs auxquels les intervenants doivent se référer d'autre part.

Mathématiquement, le problème monocritère se définit comme suit:

optimiser $C(s)$

s.c. $s \in S$ où C est le critère unique,

S l'ensemble des variantes.

Alors que le problème multicritère se définit comme

optimiser $C(s) = C_1(s), C_2(s), \dots, C_m(s)$

s.c. $s \in S$ où les $C_i(s)$ désignent les m critères.

Le problème multicritère est en réalité mal posé car il n'a pas de solution au sens mathématique du terme. A travers cette définition, peut-être un peu dérangeante pour les non-initiés, il faut comprendre que le paradigme multicritère peut apporter des explications par rapport au paradigme monocritère au moins dans les domaines où la décision humaine intervient. Il est fondé sur les considérations suivantes:

- plusieurs critères sont pris en compte;
- ces critères sont bien souvent conflictuels;
- ces conditions incitent à réaliser des arbitrages, à faire se succéder des compromis et non pas à atteindre un optimum "absolu";
- ces compromis ou arbitrages ont pour objet de conférer aux critères des valeurs qui soient compatibles avec une certaine forme d'équilibre; lorsqu'il y a succession, cela tient au caractère transitoire de l'équilibre atteint.

Conditions de mise en œuvre d'une analyse multicritère

Postulats

Différents postulats sont à la base de l'analyse multicritère. Nous les citons brièvement ci-après pour être complets. Pour plus de précisions relatives à ces derniers, on peut se référer à l'ouvrage d'A. Schärlig¹.

Postulat de l'optimum:

"Dans toute situation devant entraîner une décision, il existe au moins une décision optimale, décision pour laquelle il est possible (sous réserve de disposer de suffisamment de temps et de moyens) d'établir objectivement (c'est-à-dire indépendamment de tout système de valeurs) qu'il n'en existe pas de strictement meilleure et ceci en demeurant neutre vis-à-vis du processus de décision".

¹ A. Schärlig est l'auteur d'un livre sur les méthodes d'évaluation, notamment sur l'analyse multicritère. Ce livre "Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère" est édité par les PPR

Ce postulat impose les trois contraintes suivantes:

- la contrainte de globalité des actions potentielles;
- la contrainte de stabilité de l'ensemble des valeurs potentielles;
- la contrainte de la complète comparabilité transitive: entre deux actions potentielles, il y a soit préférence stricte de l'une par rapport à l'autre, soit indifférence entre les deux.

Postulat de la réalité de premier ordre:

"Les principaux aspects de la réalité (préférences d'un individu, frontière entre le possible et l'impossible, conséquences d'une action,...) sur lesquels l'aide à la décision prend appui se rapportent à des objets de connaissance qui peuvent être regardés comme donnés (existant en dehors de l'étude et indépendamment d'elle) et comme suffisamment stables (face à la durée, la diversité des acteurs, au discours et à l'observation de l'homme d'étude) pour que référence puisse être faite à l'état exact ou à la valeur exacte de telle ou telle de leurs caractéristiques (de nature certaine ou stochastique) jugée significative d'un aspect de la réalité".

Postulat du décideur:

"Toute décision est le fait d'un décideur: acteur bien identifié, doté des pleins pouvoirs, agissant en vertu d'un système de préférences rationnel au sens d'un certain corps d'axiomes excluant l'ambiguïté et l'incomparabilité, que l'aide à la décision n'a pas pour objet de modifier".

Nous voyons d'ores et déjà la nécessité de garder une certaine distance vis à vis de ces postulats: s'il intervient plusieurs décideurs lors de l'évaluation comme dans le cas de notre étude. Il faudra dans ce cas procéder à plusieurs agrégations des conséquences des effets (une agrégation par décideur) si l'on veut respecter les fondements de la méthodologie multicritère.

Problématiques

Il existe quatre types de problématiques différentes dans l'analyse multicritère:

- choix de la meilleure action;
- tri des actions d'après leur valeur intrinsèque (procédure de segmentation);
- classement des actions selon un ordre de préférence décroissante (processus de classement);
- descriptions des actions et/de leurs conséquences de façon systématique et formalisée (procédure cognitive).

Remarques pour la mise en place de l'évaluation

Après avoir défini l'ensemble des actions à explorer dans le processus de décision - ensemble en extension (les éléments de l'ensemble peuvent être énumérés) ou ensemble en compréhension (définition par une propriété caractéristique ou par des contraintes mathématiques, ensemble infini ou suffisamment grand), ensemble "stable" (la définition ne peut être changée durant la procédure) ou "évolutif", etc. - il est important de procéder à la modélisation des préférences c'est-à-dire à l'organisation des préférences du décideur et des relations de préférence envisageables (préférence, indifférence, incomparabilité, etc.). L'étude pilote doit donc préparer aux futures étapes de dialogue nécessaires pour la mise en route de l'évaluation. Il nous paraît opportun de signaler ici que, même si pour le moment l'étude s'est bornée selon le mandat reçu à produire la matrice des gains (c'est-à-dire des évaluations), le choix du processus de décision devrait se porter sur les méthodes de type Electre II ou III qui permettent une agrégation partielle des critères (c'est-à-dire qu'elles donnent la possibilité de tenir compte des préférences et points de vue propres à chaque décideur en acceptant des situations d'incomparabilité) étant donné que des appréciations à la fois quantitatives et qualitatives interviennent dans l'évaluation des critères sélectionnés.

B - 10

Annexe C: CALCULS ECONOMIQUES

C.1 Investissements

Dans les coûts d'investissement d'une installation de production d'électricité sont compris, outre les dépenses de construction (terrain, génie civil, équipements techniques ...), un certain nombre d'autres dépenses telles que les frais de maître d'oeuvre, les frais de formation du personnel, etc.

Pour calculer le coût global des investissements, on ne peut sans autre additionner des dépenses faites à des dates différentes, pour deux raisons:

- La monnaie ne garde pas la même valeur dans le temps. On résout cette difficulté en substituant aux dépenses réelles, comptabilisées en francs courants, des dépenses fictives évaluées en supposant que le franc garde une valeur constante. On adopte généralement la valeur du franc au 1^{er} janvier de l'année où l'on se place pour calculer les investissements.
- Dans une économie en expansion, une somme S , disponible aujourd'hui, offre d'autre part des possibilités plus grandes que la même somme disponible par exemple une année plus tard. On écrit donc que S disponible aujourd'hui correspond à $S(1+a)$ dans un an. Le terme a , qui est de même nature qu'un taux d'intérêt, est appelé **taux d'actualisation**.

Ainsi, avant d'additionner entre elles des dépenses faites à des dates diverses, on les actualise toutes à la même date (généralement celle où l'installation commence effectivement à fournir de l'énergie au réseau). Comme une dépense D faite un an après cette date origine correspond à une dépense $D/(1+a)$ faite à la date origine, le **coût actualisé des investissements** est donné par:

$$I_a = \sum_j \frac{D_j(t)}{(1+a)^t}$$

où t est le temps écoulé entre la date d'actualisation et la date de la dépense $D_j(t)$. La formule s'applique également à des dépenses faites éventuellement avant la date origine, t étant alors négatif.

En divisant le coût actualisé des investissements par la puissance continue nette, exprimée en kW, on obtient le **coût du kW installé**.

C.2 Dépenses d'exploitation

Les dépenses d'exploitation comprennent les frais de conduite et d'entretien de l'installation, les frais généraux, les taxes et impôts locaux.

Le **coût actualisé d'exploitation**, F_a , est obtenu en appliquant à ces dépenses la même méthode de calcul qu'aux dépenses d'investissement.

C.3 Dépenses de combustible

Le coût du combustible doit inclure celui de toutes les opérations du cycle imposé à ce combustible, depuis l'extraction du minerai jusqu'au retraitement et au stockage des déchets.

Le **coût actualisé du combustible**, C_a , est obtenu en faisant la somme des dépenses actualisées qui concernent les diverses opérations du cycle considéré.

C.4 Coût moyen actualisé du kWh

Une fois calculé les coûts actualisés des investissements, de l'exploitation et du combustible, le coût du kWh est déterminé à partir de la somme des coûts et du nombre de kWh produits par l'installation pendant toute la durée de son fonctionnement.

Mais le coût du kWh à un moment donné, c'est la part des dépenses affectées à chaque kWh produit par l'installation à ce moment. Comme on actualise ces dépenses à la date de mise en service de l'installation, il est nécessaire pour rester cohérent d'actualiser également le coût du kWh à cette même date. Ce que l'on se propose de calculer c'est donc le coût moyen du kWh actualisé à la date de début de fonctionnement de l'installation. Soit c ce coût, à une date ultérieure t le coût du kWh est:

$$\frac{c}{(1+a)^t}$$

On démontre qu'en supposant que toute l'énergie fournie au cours de l'année n'est produite au milieu de l'année en question, le résultat est très peu différent de celui que donne une actualisation continue.

Dans ces conditions, la valeur du kWh au milieu de l'année n est donnée par:

$$\frac{c}{(1+\alpha)^{n-1/2}}$$

Si, pendant cette n^{ème} année, l'énergie fournie est E_n , son coût est:

$$\frac{c E_n}{(1+\alpha)^{n-1/2}}$$

Le coût total de l'énergie, égal à la somme des coûts d'investissement, d'exploitation et de combustible peut donc s'écrire:

$$I_a + F_a + C_a = \sum_{n=1}^N \frac{c E_n}{(1+\alpha)^{n-1/2}} = c \sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+\alpha)^{n-1/2}}$$

L'expression $E_a = \sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+\alpha)^{n-1/2}}$ porte le nom d'**énergie totale actualisée**.

Le coût moyen actualisé du kWh s'exprime ainsi de la manière suivante:

$$c = \frac{I_a + F_a + C_a}{E_a}$$

En divisant le numérateur et dénominateur de cette expression par la puissance nominale de l'installation, on obtient:

$$c = \frac{\text{coût de l'énergie par kW installé}}{H_a}$$

où H_a est le **nombre actualisé d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance**.

Dans ce qui précède, le calcul du kWh a été effectué dans l'hypothèse d'un fonctionnement "en base". Si ce n'est pas le cas, il faut tenir compte que le coût total de l'énergie produite par une installation comprend une part fixe, qui reste la même que la centrale fonctionne ou non, et une part proportionnelle au nombre de kWh produits (coût total = part fixe + coût proportionnel x énergie produite). Dans ces conditions, la valeur du coût moyen actualisé du kWh se décompose en deux termes:

$$c = c_1 + c_2 = \frac{\text{part fixe actualisée}}{\text{énergie actualisée}} + \text{part proportionnelle actualisée}$$

C - 4