

SPECIFICITE DES ENERGIES RENOUVELABLES

Bernard Lachal
Cuepe
19, avenue de la Jonction
1205 Genève

1) Introduction

L'homme n'a pas attendu la fin de ce siècle pour se chauffer, se mouvoir, produire grâce à l'énergie solaire. Elle a longtemps constitué l'unique ressource énergétique de l'humanité, mais la civilisation industrielle n'a pu s'accommoder d'une source d'énergie abondante mais capricieuse, naturelle mais fugitive. Face aux problèmes que posent l'utilisation des énergies non renouvelables (raréfaction des ressources, effets négatifs sur l'environnement, risques de tensions internationales), les énergies renouvelables, flux permanents¹ d'énergie qui finissent de toute façon dégradés dans l'environnement, sont redécouvertes et font l'objet de nombreuses études techniques visant à les domestiquer.

Cet article fait le point sur les filières utilisant les énergies renouvelables et souligne leur spécificité.

2) L'utilisation des énergies renouvelables : une marginalisation récente.

Au niveau biologique, les besoins énergétiques de l'homme sont couverts exclusivement par de l'énergie solaire - 2500 kcal par jour, soit 10.5 MJ ce qui correspond à une puissance moyenne de 120 W environ. Le rendement de conversion de la "machine" humaine, pourtant l'un des plus élevé du règne animal, ne dépasse pas 20% : l'homme dispose donc biologiquement de relativement peu d'énergie et recherche de façon permanente une quantité additionnelle.

Pour satisfaire ses besoins thermiques (cuisine, chauffage, travail des métaux et du verre,...), il a puisé abondamment dans la biomasse, créant tout au long de son histoire de nombreuses crises du bois (dès l'antiquité, en Chine dès le XII^{ème} siècle, en Europe pré industrielle ou de façon critique dans les pays du sud aujourd'hui). Leurs causes se situent autant dans la raréfaction des ressources locales que dans la difficulté à développer un transport terrestre efficace.

Pour satisfaire ses besoins en énergie mécanique (transport, travail agricole, construction, artisanat, industrie,...), il a tout d'abord fait appel à l'énergie d'autres êtres humains et à la force des animaux. L'exploitation directe du travail humain est petit à petit abandonnée. Pour mémoire, rappelons les tentatives d'élevage intensif d'esclaves au Brésil et en Amérique du Nord, heureusement sans succès, ou l'utilisation des enfants pour transporter le charbon dans les mines en Europe au siècle passé. L'utilisation de l'animal, elle, a posé des problèmes aigus dès qu'elle a atteint un certain seuil. Au début du siècle, l'agriculture américaine consacrait 25% de sa surface cultivée pour nourrir ses 25 millions de chevaux. Les transports urbains étaient alors quasi exclusivement réalisés par des chevaux. On estime qu'en 1900, 10 millions de tonnes de crottins étaient déversés annuellement dans les rues des villes anglaises et que

¹ Au niveau de l'homme, puisque si le soleil va disparaître un jour, il continuera à briller encore quelques milliards d'années.

chaque année, la ville de New York devaient se débarrasser de 15 000 chevaux morts abandonnés sur les 700 000 qui l'animaient. L'arrivée de systèmes de transport mus en grande partie par de l'énergie fossile - train, métro et voiture - soulagea la ville, au moins dans un premier temps. Dans beaucoup de pays du sud, l'agriculture et les transports en zone rurale restent essentiellement à base de traction animale .

Deux autres ressources renouvelables ont été également utilisées depuis l'antiquité : le vent et la force hydraulique. En Europe, le moulin à eau s'est beaucoup développé à partir du XI^{ème} siècle, ce qui a conduit à la saturation des sites dès le milieu du XIII^{ème} siècle. L'exploitation des moulins à vent et surtout l'amélioration des techniques ont permis d'augmenter alors la puissance disponible. C'est ainsi qu'à la fin du XVIII^{ème}, on dénombrait 500 000 moulins en Europe, totalisant une puissance estimée à 1500 MW (Cf. table suivante). A ces chiffres, il conviendrait d'ajouter la puissance des bateaux à voile, qui totalisaient à cette date quelques 1 000 MW [1].

	Nombre de moulins	Nombre de roues	Puissance moyenne, kW	Puissance totale, MW	Population millions
fin XVI ^{ème}	300 000	300 000	1.5	450	75
fin XVIII ^{ème}	500 000	750 000	2	1500	187

Table 1 : puissance installée des moulins à eau en Europe, d'après ref.[1]

Le charbon a pris la relève au cours du XIX^{ème} siècle, d'abord en Angleterre puis dans les autres pays. Par exemple, en France, si on recensait environ 110 MW d'hydraulique contre 50 MW de machines à vapeur en 1848; la proportion était inverse en 1900 (500MW contre 1900 MW). L'homme quittait alors l'ère des énergies limitées en flux mais renouvelables pour entrer dans celle des énergies fossiles, sans limite de flux mais épuisables dans le temps (figure 1).

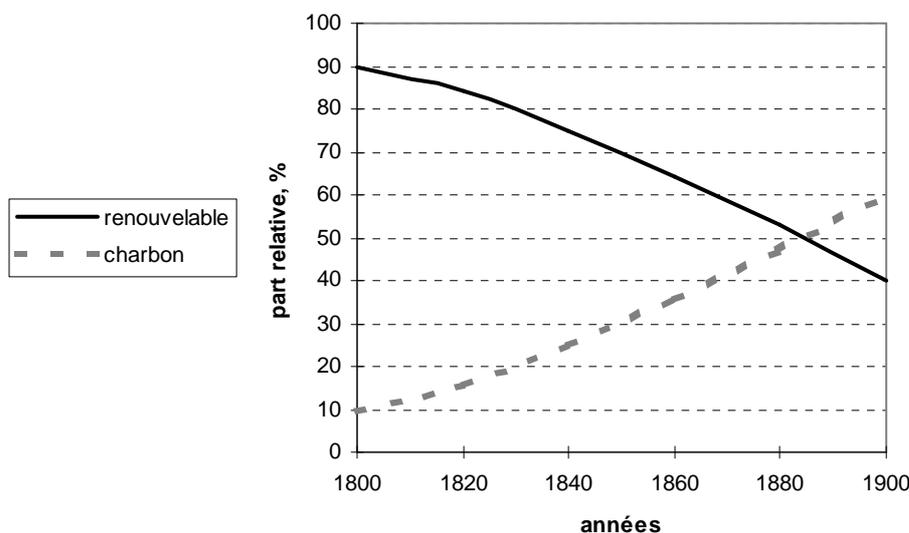


Figure 1 : Evolution des différentes ressources énergétiques mondiales entre 1800 et 1900 (d'après [2])

Parmi les moteurs de cette révolution (voir références [1] et [2] par exemple), on peut citer:

- l'augmentation du prix du bois, due à sa raréfaction,

- la lente amélioration des transports terrestres,
- l'accumulation du capital qui a permis les lourds investissements nécessaires à l'exploitation de mines de plus en plus profondes,
- l'accès à de nouvelles techniques et le développement des connaissances comme la thermodynamique, qui ont abouti à la mise au point des machines à vapeur puis des génératrices. Cette nouvelle filière énergétique a permis de s'affranchir de la saturation des sites propres à l'exploitation de la force hydraulique.

3) Les énergies renouvelables aujourd'hui : des filières anciennes rajeunies.

3.1 Tableau général

En cette fin de siècle, les énergies renouvelables constituent une part non négligeable de la consommation énergétique mondiale, équivalente à 13% du total, supérieure à ce que aurait pu laisser penser l'évolution de la production du XIX^{ème} siècle. Les agents énergétiques se répartissent de la façon suivante (table 2) :

Agents	électricité	autre	total	
Fossiles	19%	63%	82%	
			28%	<i>charbon</i>
			36%	<i>pétrole</i>
			18%	<i>gaz</i>
Nucléaire*	5%	-	5%	
Hydroélectrique*	7%	-	7%	
Biomasse**	-	6%	6%	
TOTAL	31%	69%	100%	

* la part de l'électricité a été "valorisée", c'est à dire ramenée à l'énergie thermique qu'il aurait fallu pour la produire dans une centrale classique. Le facteur multiplicatif est 2.5, ce qui correspond à un rendement de conversion de 40%.

** la part de la biomasse, essentielle dans de nombreux pays du sud, est souvent écartée des statistiques officielles car celles ci ne prennent en compte que les énergies liées à des flux financiers, aisément comptabilisés.

Table 2 : répartition des ressources énergétiques mondiales, d'après [3].

Ces chiffres amènent quelques remarques générales:

- les énergies fossiles fournissent plus de 80% de l'énergie,
- le nucléaire joue un rôle plus faible qu'on ne le pense généralement dans l'approvisionnement énergétique mondial,
- l'hydroélectrique et la biomasse (à condition d'en tenir compte...) sont les seules ressources renouvelables qui contribuent de façon significative aux besoins humains.

L'utilisation intensive des énergies non renouvelables ont plusieurs conséquences fâcheuses:

- la raréfaction progressive programmée de ces ressources, en particulier du pétrole et du gaz. On estime qu'avant le milieu du siècle prochain, les derniers gisements importants de pétrole conventionnel seront concentrés au Moyen Orient, ceux du gaz en Russie et au Moyen Orient. On imagine sans peine les tensions internationales que cela risque de provoquer. D'autres ressources pourront être mobilisées (offshore profond, Arctique, sables

asphaltique, schistes bitumineux), mais à quel coût économique et écologique? Le charbon est plus abondant et mieux distribué géographiquement, mais, en tant que solide, il est moins pratique d'emploi (extraction et transport). Quant aux réserves d'uranium, elles sont mal connues mais sans doute limitées si on les utilise dans les réacteurs actuels.

- des risques environnementaux majeurs : amplification de l'effet de serre due à l'utilisation des combustibles fossiles et réchauffement du globe qui pourrait suivre, risque de pollution radioactive locale ou même globale si on veut faire jouer à l'énergie nucléaire un rôle beaucoup plus important avec les technologies et la gestion des déchets actuelle, pollution de l'air en zones urbaines mettant en cause la santé, pollution des mers par les hydrocarbures,...

La disponibilité en énergie facile à utiliser et bon marché qui prévaut actuellement ne durera pas éternellement. Il faudra donc se tourner tôt ou tard vers des énergies plus difficiles à mettre en œuvre et donc plus chères. Dans cette situation, beaucoup s'accordent pour considérer les énergies renouvelables comme la solution idéale. Regardons de plus près leur situation.

3.2 Les filières transformant les énergies renouvelables en énergie utile

Elles couvrent environ 13% des besoins énergétiques mondiaux, le taux étant très variable d'un pays à l'autre. En Europe², la couverture n'est que de 5.4% : elle se situe entre 24% pour l'Autriche ou la Suède et 0.6% pour le Royaume Uni. La Suisse est dans le peloton de tête avec 16%. Point important à souligner : cette part n'était que de 5% en 1990, ce qui représente une augmentation relative de 8% en 4 années. Il semble donc qu'on assiste à une inversion de tendance : après avoir déclinée depuis le début du XIX^{ème} siècle, l'importance relative des énergies renouvelables augmente.

Sur la dizaine de filières recensées (ref. [4] par exemple), ce sont les deux plus anciennes qui constituent la quasi totalité de la production renouvelable:

- hydraulique : les moulins ont totalement disparu et la force de l'eau est utilisée aujourd'hui pour produire de l'électricité qui peut être facilement transportée et distribuée grâce au développement du réseau électrique. Le taux d'équipement de l'hydroélectricité est très variable d'un continent à l'autre : très élevé en Europe (80%), moyen en Amérique du Nord (50%) et faible en Amérique latine, Afrique et Asie (<30%), qui possèdent un potentiel énorme. L'impact sur l'environnement que peut avoir de grands barrages, comme Assouan en Egypte ou le futur barrage des 3 Gorges en Chine, peut être important; la mise en œuvre d'installations plus petites (jusqu'aux microcentrales de quelques kW) est nettement plus favorable de ce point de vue.
- biomasse : elle est majoritairement utilisée dans les pays du sud, où elle constitue souvent l'essentiel de la consommation énergétique. Le revenu moyen par habitant est un bon indicateur de son utilisation : en dessous de 300\$ de revenu national par habitant et par année, plus de 90% de l'énergie est fournie par la biomasse, en dessus de 2000\$, la substitution est presque complète (figure 3, issue de [5]).

² Source: Eurostat, cité dans "Energy for the future : renewable sources of energy", Green paper for a community strategy, en circulation, Com(96)576.

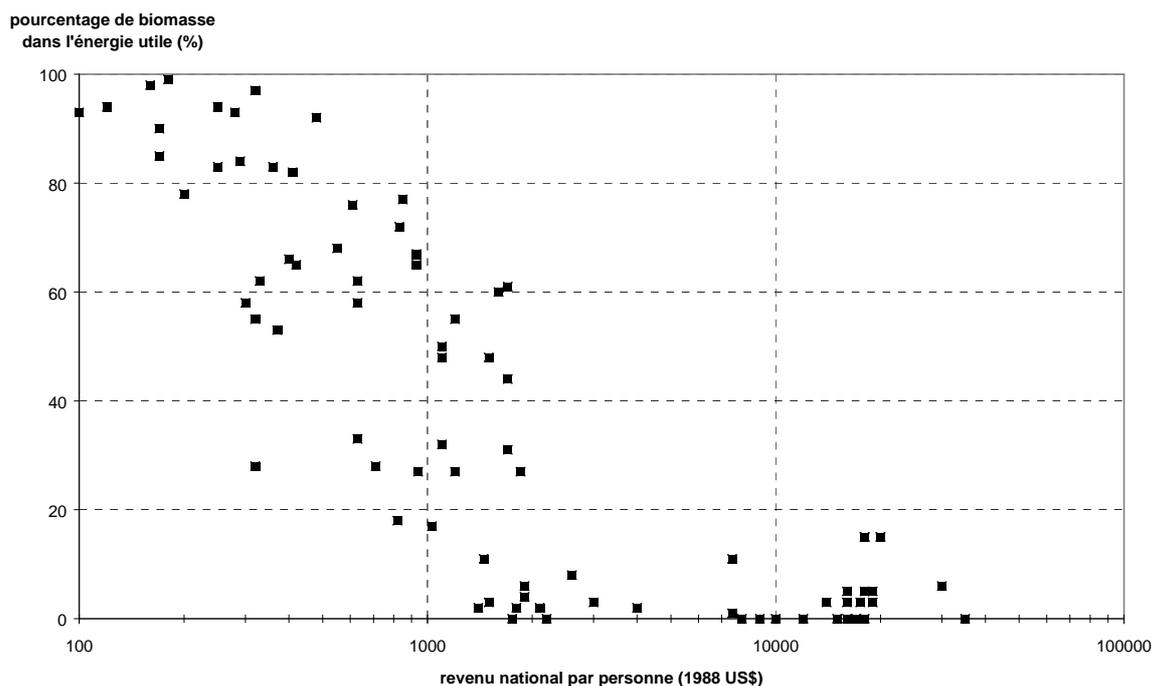


Figure 3. Utilisation de la biomasse et revenu national par habitant, d'après [5].

L'utilisation actuelle de la biomasse est essentiellement prédatrice et doit être radicalement modifiée. Exploitation "raisonnable" de la forêt, développement de cultures énergétiques efficaces et ne concurrençant pas la production alimentaire sont quelques uns des défis à relever pour que le potentiel important de cette filière soit pleinement et durablement exploité, ce qui serait une révolution dans les rapports que l'homme entretient avec la nature

Les autres filières renouvelables ne participent encore que marginalement au bilan global :

- les éoliennes, (en Europe, énergie produite équivalente à 1.5% de celle issue de l'hydraulique). Une génératrice permet de transformer en électricité l'énergie mécanique obtenue grâce au vent. Ce n'est pas non plus une filière vraiment nouvelle, mais la technologie a bénéficié des développements de l'aéronautique et atteint des rendements bien supérieurs à celui des anciens moulins à vent. La bonne rentabilité économique des installations situées dans les régions les plus ventées et un volontarisme affiché de certains pays (Danemark, Allemagne, Grande Bretagne,...) expliquent le décollage actuel de cette technologie (près de 4 000 MW installés dans le monde, dont près de la moitié en Europe, en forte progression). Le potentiel de développement est certainement grand dans la mesure où, globalement, le vent existe plutôt près des mers et l'hydroélectrique plutôt au centre des terres. Les problèmes environnementaux sont faibles : gêne occasionnée aux oiseaux, impacts esthétiques et acoustiques (que l'on a résumé par "soit belle et tait toi"). La référence [6] donne un bon aperçu de l'état de la technique.
- la géothermie, qui, en plus de chaleur, fournit à l'heure actuelle une quantité d'électricité équivalente à celle fournie par le vent, est une filière énergétique relativement nouvelle, même si les chinois anciens et les romains utilisaient l'eau chaude naturelle pour leurs bains. La première utilisation pour le chauffage de locaux (incluant des radiateurs) date de 1909, à Reykjavik, seule capitale entièrement chauffée par la géothermie. Il s'agit d'une source d'énergie intéressante dans certains endroits, mais qui ne peut pas être généralisable. Voir ref. [7] pour une revue récente sur ce sujet.

- L'énergie des marées, utilisée depuis longtemps (moulins à marée). La principale unité industrielle existante, l'usine marémotrice de la Rance (F), possède une puissance de 260 MW et fournit de l'électricité depuis une trentaine d'année à un prix intéressant. Malheureusement, les sites propices sont peu nombreux et les conséquences environnementales sont mal connues mais peuvent être importantes selon les sites touchés.
- L'énergie solaire : transformant directement les photons issus du soleil, les 3 filières solaires (solaire thermique, centrales thermodynamique et photovoltaïque) n'apparaissent pas encore dans les statistiques mais, vu leur potentiel élevé, constituent certainement une ressource intéressante pour le futur. Ces filières sont les plus novatrices et sont souvent qualifiées "d'énergies nouvelles", par opposition aux autres filières renouvelables, qui sont plutôt des filières anciennes "rajeunies". Regardons les de plus près.

4) Le soleil, ressource du futur?

L'énergie solaire a le potentiel le plus élevé des énergies renouvelables. Sur les $1.7 \cdot 10^{11}$ W arrivant en permanence au sommet de l'atmosphère, un peu plus de la moitié atteint le sol, soit environ 10 000 fois la puissance moyenne consommée par l'humanité. Autrement dit, il suffirait de capter cette énergie pendant une heure par année ou pendant 10 secondes par jour pour couvrir l'ensemble de nos besoins. On dispose donc d'une manne d'énergie solaire importante³.

4.1 Les contraintes

Ce rapport énorme entre potentiel et besoins est à prendre avec précaution car pour qu'une énergie puisse être utilisable, elle doit être transformée de telle façon qu'elle puisse faire face aux différentes contraintes techniques, économiques, environnementales et d'acceptabilité sociale.

Les contraintes techniques sont de trois ordres:

- concordance de qualité : ceci suppose des transformateurs adaptés aux besoins : capteurs thermiques à basse température pour le chauffage ou à plus haute température pour la transformation thermodynamique de la chaleur en électricité, cellules photovoltaïques pour la transformation directe des photons en énergie électrique. Le rayonnement solaire incident est intrinsèquement une source de bonne qualité puisque provenant d'une source thermique à 6000K : le rendement thermodynamique maximum par rapport à la température ambiante se monte à 0.95. Les rendements annuels actuellement observés pour des systèmes commerciaux se situent bien au dessous : environ 50% pour les systèmes thermiques à basse température, 20% pour les centrales héliothermiques et 10% pour les centrales photovoltaïques.
- concordance de lieu : le rayonnement solaire est relativement bien réparti sur la terre puisque les lieux les plus avantageés reçoivent environ 2500 kWh/m².an contre un peu

³ Ce rapport énorme est indispensable et si l'homme se risquait à consommer une quantité d'énergie importante (autre que solaire), l'effet sur le climat serait immédiat. On peut estimer grossièrement que chaque % d'énergie ajoutée à l'énergie solaire atteignant le sol augmente la température du globe de 0.5K. Actuellement, l'homme utilise une quantité d'énergie non renouvelable de 0.01% de l'énergie solaire incidente, l'effet sur la température du globe est donc d'environ 0.005K. En doublant la consommation énergétique (non renouvelable) tous les 25 ans, il faudrait 2 siècles pour provoquer une augmentation de température de 1K. Ce problème d'auto-échauffement du globe n'est donc pas encore préoccupant mais donne une certaine limite à l'augmentation exponentielle de la consommation.

moins de 1000 kWh/m².an pour les moins favorisés (Genève : 1250 kWh/m².an). Le problème d'espace se pose différemment dans les zones rurales, où il y a en général assez de place, et dans les zones urbaines, où se peut se poser réellement une question de surface disponible. Dans ce dernier cas, les réseaux de transports d'énergie (électricité, gaz, chaleur) existent et permettent d'alimenter la ville depuis l'extérieur. Il est de toute façon vain de vouloir rendre une ville importante énergétiquement autonome puisqu'elle dépend de toute façon de son entourage géographique pour des besoins aussi vitaux que son oxygène, sa nourriture ou son eau. L'espace nécessaire aux transformateurs solaires n'est pas exagérément important relativement aux autres transformateurs si on tient compte de toute la chaîne, depuis l'extraction jusqu'au traitement des déchets. Ainsi, la production d'un Exajoule d'électricité (288TWh, environ la consommation annuelle d'énergie de la Suisse ou 0.3% de la consommation mondiale) va demander des surfaces au sol très variables selon les technologies (ref [8]):

biomasse :	125 000 à 250 000 km ²
grand barrage:	8 000 à 250 000 km ²
petits barrages:	170 à 17 000 km ²
vent :	300 à 17 000 km ²
photovoltaïque:	1700 à 3300 km ²
centrales solaires :	700 à 3000 km ²
lignite :	7000 km ²
gaz naturel :	200 à 700 km ² .

Les filières renouvelables les plus utilisées aujourd'hui sont les plus extensives, et de plus elles sont liées à d'autres cycles naturels fondamentaux (carbone et eau pour les forêts et les grands barrages). Leur exploitation à grande échelle peut donc poser des problèmes environnementaux, sans que cela d'ailleurs soit une fatalité (voir l'utilisation du potentiel hydraulique des pays de l'arc alpin par exemple).

Les exploitations intensives (solaire mais aussi éolienne) présentent donc des avantages indéniables en permettant d'une part une exploitation de lieux inadaptés pour d'autres activités (déserts, mers,..) et, d'autre part, n'interférant pas avec des cycles naturels fondamentaux. Un exemple d'interférences malheureuses avec le cycle de l'eau est donné par le catastrophique barrage d'Assouan dans la haute vallée du Nil; pour produire la même quantité d'énergie, il suffirait d'installer aujourd'hui une centrale thermique solaire couvrant une surface d'environ 20 km² (soit une très faible portion de la retenue d'eau actuelle), à des coûts économiques et environnementaux très inférieurs. De même, une étude récente de l'université de Genève sur une installation réelle a également montré que l'on pouvait produire aujourd'hui et en Suisse de l'hydrogène photovoltaïque (énergie solaire stockée) avec un rendement 100 fois supérieur à celui réalisé par le bois [9]. Il ne faut toutefois pas forcément opposer production intensive et extensive, qui peuvent très bien être complémentaires: par exemple, la valeur foncière d'un hectare de prairie du Wyoming est de 100 \$ par année, on pourrait lui faire produire, en plus, pour 25 000\$ d'électricité éolienne [8].

Malgré tout, les surfaces nécessaires ne favorisent pas les énergies renouvelables au point de vue économique. L'énergie solaire ne pourra couvrir à long terme une part importante des besoins mondiaux qu'à condition que ceux-ci restent dans une limite raisonnable. De ce point de vue, l'utilisation rationnelle de l'énergie reste une considération *sine qua non* [4].

- concordance de temps : il s'agit de toute évidence d'une question clé pour l'énergie solaire, le déficit fondamental à relever avec celui, très lié, du coût de revient de l'énergie produite. Le stockage temporaire de l'énergie semble a priori la réponse la mieux adaptée, on imagine mal aujourd'hui la demande d'énergie se plier aux caprices du climat. En fait, le

besoin de "concordance de temps" entre production et besoins ne deviendra réellement un obstacle que quand la part de ces énergies deviendra importante. Dans un premier temps, les autres sources d'approvisionnement plus souples peuvent s'adapter aux fluctuations de la production renouvelable, comme elles le font déjà pour la couverture de la demande, par essence très variable. Le seuil au-dessus duquel il devient difficile de gérer une production fluctuante dépend évidemment beaucoup de la courbe de charge et de l'ensemble du système de production. Si ce taux peut monter, dans le cas de l'électricité, jusqu'à 50% en Californie (pointe de demande due à la climatisation très liée à l'ensoleillement), il est certainement beaucoup plus bas en Europe [8]. Au-dessus de ce seuil, il faut soit que les coûts de l'énergie solaire baissent suffisamment pour pouvoir se permettre une baisse de productivité passagère soit stocker l'énergie solaire. Il faut alors distinguer le stockage à court terme (du jour à la nuit), qui ne pose pas de problèmes insurmontables, et le stockage saisonnier, qui est techniquement possible mais économiquement encore très pénalisant, par exemple via la filière hydrogène [10] pour l'électricité ou le stockage souterrain pour la chaleur [14]. En fait, la situation actuelle est bien au-dessous de ce seuil partout dans le monde et, avant que les filières solaires puissent produire une quantité d'électricité telle qu'elle pose des problèmes aux compagnies électriques et pour peu que l'on en ait réellement la volonté, il reste assez de temps pour régler ce problème par la mise en œuvre d'une tarification adaptée ou par le développement des techniques de stockage (filiale "hydrogène",...).

Au niveau économique, l'énergie solaire n'est pas plus gratuite que le charbon, le pétrole ou l'uranium. Ce n'est pas l'énergie primaire elle-même qui a un coût, ce sont les différentes étapes pour son exploitation : extraction, transformation, transport, stockage, distribution. Ainsi, le coût d'un kWh solaire produit pour chauffer de l'eau comporte le prix de l'extraction (collecteurs solaires), du transport (pompes, tuyauteries, électricité), du stockage (ballon solaire)⁴. Ceci étant dit, trois contraintes économiques se posent à l'énergie solaire:

- un lourd investissement initial, du, d'une part, à l'état de la technique actuelle qui doit encore s'améliorer et, d'autre part, à l'obligation d'assurer tout le financement de la chaîne en une seule étape (depuis l'extraction jusqu'à la distribution), ce qui n'est pas le cas de transformateurs utilisant des énergies primaires déjà extraites et continuellement disponibles sur le marché comme le pétrole ou le gaz.
- l'obligation dans de nombreuses applications décentralisées d'installer un auxiliaire ou un stockage pour parer à la variabilité de la ressource solaire.
- peu de facteur d'échelle pour la réduction du prix des systèmes, du fait que la captation d'énergie solaire est par essence "plane"; c'est à dire à deux dimensions, contrairement aux transformateurs opérant avec des combustibles qui travaillent "en volume". La seule baisse importante de coût à attendre est celle liée à la quantité totale produite via la courbe d'apprentissage. Ceci est particulièrement vrai pour le photovoltaïque, où les panneaux eux-mêmes constituent une part importante du coût; il y a donc moins d'intérêt à construire des grosses unités pour diminuer sensiblement le prix de revient de l'unité énergétique.

L'impact environnemental des différentes filières solaires est faible et surtout d'ordre esthétique. Les émissions ne sont présentes qu'à la fabrication des installations elles-mêmes (investissement environnemental initial) et inexistantes lors du fonctionnement. On peut donc

⁴ En fait, l'énergie solaire transforme l'utilisateur en (auto)producteur avec tous les problèmes que cela pose (gestion de la puissance de pointe, suivi à long terme, calcul en terme de production d'énergie et non pas en terme de m² installé,...). Un côté positif est la prise de conscience par l'utilisateur des problèmes liés à la production et à la distribution de l'énergie.

affirmer que toute substitution d'une énergie traditionnelle par de l'énergie solaire, pour autant qu'on atteigne une certaine efficacité, est un gain environnemental dans le sens où on pollue moins.

L'acceptabilité sociale du solaire est sujette à discussion. Si tout le monde est d'accord sur l'avantage qu'il y aurait à utiliser un maximum d'énergie solaire, on trouve plus de sceptiques quand il s'agit de défendre des applications pratiques. La méfiance vis à vis de sa fiabilité a pour origine des défauts de jeunesse et l'idée fautive selon laquelle il s'agit d'une technologie facile. Il est effectivement possible de bricoler le solaire pour son plaisir, il est par contre plus difficile de livrer "clé en main" et avec garantie de résultats une installation solaire performante. Ceci nécessite du personnel compétent, qu'il convient donc de former (ingénieurs, chauffagistes, électriciens...). Le problème d'acceptabilité sociale est cruciale dans les applications de ces techniques dans le sud.

4.2 Les filières

4.2.1 Le solaire thermique

Il s'agit de l'utilisation la plus ancienne et la plus aisée, dont on considérera 3 applications :

- l'eau chaude sanitaire (température demandée de 20 à 50°C, toute l'année)
- l'eau chaude industrielle (température demandée > 80°C, toute l'année)
- le chauffage des bâtiments (température demandée 20°C, en hiver et dans les zones tempérées ou froides).

L'eau chaude sanitaire

Un système actif, comprenant capteurs solaires, pompes, tuyauteries, régulation électronique, etc. permet d'extraire et d'utiliser l'énergie thermique issue du rayonnement solaire. Il s'agit d'une application assez ancienne puisque le capteur solaire proprement dit a été inventé par De Saussure (1740 - 1790) pour mesurer le flux solaire incident. Les capteurs solaires utilisés aujourd'hui ne sont guère différents. Une plaque noircie transforme le rayonnement solaire en chaleur, qui est évacuée par un fluide, en général de l'eau. Cette plaque est plus ou moins isolée de l'air extérieur selon la température à atteindre. On trouve actuellement des fabricants dans tous les pays du monde pour des produits de qualité et de prix très divers.

Pratiquement tous les problèmes techniques liés à cette utilisation du solaire ont été résolus; on dispose d'outils de dimensionnement ayant fait leur preuve, des professionnels compétents existent. La possibilité la plus intéressante sous nos latitudes a été cernée : le préchauffage de l'eau chaude sanitaire dans des immeubles collectifs d'au moins une dizaine de logements et à raison d'environ 0,5 m² à 1m² de collecteur par habitant, couvrant entre 33 et 50 % des besoins d'énergie pour l'eau chaude domestique d'un européen moyen. Chaque mètre carré économise environ 80 litres de mazout par an et a un rendement énergétique situé entre 35 et 50%. Et pourtant, cette possibilité simple d'utilisation du solaire est encore peu usitée. Outre les problèmes économiques (on sait faire du kWh solaire - chaleur au même prix que le kWh électrique, soit 3 fois plus cher que le kWh mazout), il faut mettre en avant 2 raisons :

- l'inadaptation de l'organisation des métiers du bâtiment à la construction de projets de production d'énergie,
- la difficulté pour le propriétaire de reporter les investissements réalisés sur les charges : l'économie est donc réalisée par le locataire alors que c'est le propriétaire qui a investi. Les constructions de systèmes solaires de préchauffage se font donc essentiellement sur des

petits bâtiments privés, alors que ce sont les grands ensembles qui représentent le plus d'intérêts grâce au facteur d'échelle qui diminue un peu le prix et à une demande plus régulière qui augmente la productivité. Il n'est pas étonnant que les pays disposant de nombreuses installations de ce type soient les pays ensoleillés (Chypre, Grèce,..) et ceux possédant une structure d'habitat à dominante individuelle (Australie, Etats Unis,..). On peut toutefois noter certains exemples d'installation à grande échelle de préchauffages solaires de l'eau chaude sanitaire sur des bâtiments locatifs, comme le réalise la ville de Genève [11]. Mais ceci est dû essentiellement à une volonté politique affirmée de rationalité énergétique de la part des responsables en place.

L'eau chaude industrielle

Il s'agit de maintenir de l'eau à des températures supérieures à 80°C pour des usages industriels, médicaux ou autres. Pour ce faire, des capteurs solaires plus perfectionnés, donc plus onéreux, doivent être utilisés si l'on veut maintenir un rendement correct pour l'installation (> 25%). Pour cette application "haute" température on utilise généralement des capteurs évacués, c'est à dire dont l'isolation est réalisée par un vide poussé (dit secondaire). Leur température maximum de travail est 300°C.

Plusieurs expériences pilotes ont été bien suivies de part le monde, notamment en Suisse, et les conclusions obtenues sont les suivantes [12] :

- Les collecteurs solaires nécessaires existent commercialement et sont techniquement au point. Des installations travaillant à plus de 80°C été comme hiver dépassent le seuil des 30% de rendement.
- Les coûts sont encore trop élevés pour pouvoir espérer faire décoller le marché. Mais d'autre part il faudrait un marché minimum pour pouvoir accéder à la baisse des coûts résultant d'une production de masse. Le cercle vicieux dure depuis 10 ans et aucune amélioration n'est en vue.
- Une surveillance minimum des installations est nécessaire. Faute de quoi, des pannes surviennent par manque d'entretien et donnent une mauvaise image à la technologie. Un effort dans le sens d'une augmentation de la fiabilité est à réaliser et ne s'acquiert qu'en expérimentant. Il faudrait développer un service d'entretien organisé et bon marché; comme c'est le cas pour les installations de chauffage domestique par exemple.

le chauffage des bâtiments

Un bâtiment moyen en Suisse est chauffé à raison d'environ 10% par le soleil. On peut monter cette part à 20 - 30 % en utilisant mieux le rayonnement solaire à disposition. Certaines maisons du plateau suisse sont même uniquement alimentées par l'énergie solaire (y compris l'électricité). Il y a donc de belles perspectives pour ce qu'on appelle l'architecture bio-climatique [13].

Une des plus belles découvertes de l'homme est à la base de l'utilisation passive du rayonnement solaire : le verre. Grâce à ses propriétés optiques, ce matériau réalise l'effet de serre et reste aujourd'hui extrêmement intéressant aussi bien pour l'éclairage que pour le chauffage. De nombreux systèmes passifs de captation solaire ont été expérimentés et sont basés sur les 3 principes suivants : capter, stocker et restituer (serre, véranda, atrium, double peau, mur trombe,...).

Les systèmes actifs, identiques à ceux utilisés pour l'eau chaude, sont peu adaptés au chauffage des bâtiments sous nos climats à hiver peu ensoleillé et un investissement dans les

économies d'énergie est souvent préférable. On peut toutefois les utiliser pour certains cas précis : climats méditerranéens ou montagnards, couplage avec une utilisation estivale (piscine,..), stockage saisonnier,....

L'utilisation d'un stockage saisonnier de la chaleur demande de gros investissements, qui ne sont raisonnables que si la taille du stockage est suffisante pour limiter les pertes thermiques relativement à la quantité de chaleur stockée. La capacité thermique minimum requise va dépendre de la qualité de l'isolation. Pour les stocks peu ou pas isolés, elle est environ 50 GJ/K, soit 20 000 m³ de terre ou 10 000 m³ d'eau [14]. Des stocks plus petits demandent une isolation très poussée dont le volume peut atteindre le volume de stockage actif.

En suisse, 11 installations ont été recensées depuis 1973 et cinq nouveaux projets sont en préparation. Le leader mondial reste sans conteste la Suède.

Les freins au développement de cette technologie sont les suivants :

- chaque site est spécifique et nécessite une étude (pas de système clef en main)
- les investissements sont élevés et le coût de l'énergie non compétitif,
- le faible développement des réseaux de chauffage à distance. Or ce sont justement les grandes installations qui sont les plus intéressantes,
- le stockage saisonnier est encore peu connu.

4.2.2 Les centrales héliothermiques pour la production d'énergie électrique

Dans cette application, le rayonnement solaire est concentré pour obtenir un fluide à haute température permettant d'actionner une turbine couplée à un générateur électrique. Elle n'utilise que le rayonnement direct et ne fonctionne bien que dans les zones très ensoleillées. Les premiers développements connus datent du siècle passé avec la fameuse machine à vapeur de Mouchot à l'exposition universelle de Paris ou les installations d'irrigation en Egypte [15]. Plusieurs centrales solaires ont été expérimentées, principalement aux Etats Unis (déserts californiens), mais une seule méthode s'est avérée commercialement viable, qui est basée sur une faible concentration du rayonnement solaire sur des tubes évacués dans lesquels circulent un fluide caloporteur.

Basées sur ce principe, les 9 centrales de Luz, en Californie, atteignent une puissance totale de 300MWe[16]. Elles produisent de l'électricité pour 300 000 personnes à un prix compétitif (environ 12 cents le kWh) puisque vendue aux heures de pointe. Ses promoteurs prétendent pouvoir fournir de l'électricité solaire bon marché, en utilisant de préférence le désert et, comme on l'a déjà vu, ne consommant pas plus d'espace que les autres techniques de production. Beaucoup de pays du sud pourraient être intéressés pour alimenter les réseaux électriques présentant une forte pointe de demande aux heures les plus ensoleillées (refroidissement). Par contre, ce type de centrales n'a que peu d'avenir en Suisse (climat non adapté, sauf éventuellement en région alpine) et n'a aucune utilité pour les habitants des régions privées de réseau électrique. De nombreux projets sont en étude et concernent des pays aussi variés que l'Inde, le Maroc, la Tunisie ou l'Australie.

4.2.3 La filière photovoltaïque

Il s'agit de la voie royale pour le solaire : l'énergie solaire se transforme directement en électricité à l'intérieur d'un matériau. Il n'y a ni usure (aucune pièce en mouvement), ni entretien, ni fluide, ni fumée.

Le principe de l'énergie photovoltaïque est le suivant : à l'intérieur de certains matériaux, la lumière absorbée est capable de mettre en mouvement les électrons qui s'y trouvent, créant ainsi un courant électrique utilisable. Les semis-conducteurs sont un milieu favorable, sous forme monocristalline, polycristalline ou amorphe. D'autres matériaux plus complexes sont actuellement en développement, comme les films semi-conducteurs nanocristallins colorés de Grätzel (EPFL) [17]. Toutes ces cellules produisent un courant électrique proportionnel à la lumière incidente et à un potentiel à peu près constant (1/2 à 1 volt par cellule). Le groupement de cellules en panneaux et de panneaux entre eux permet de générer courants et tensions continus aux valeurs désirées.

Pour les petits systèmes isolés, indépendants et autonomes, les panneaux doivent être couplés à des batteries permettant le stockage de l'énergie et auxquelles se raccorde l'utilisateur. Ce type de systèmes est de plus en plus employé dans les zones isolées, dans les pays du nord comme dans les pays du sud. Ils délivrent en fait plus des prestations (éclairage, frigo,..) que du kWh. Ils apporteront sans doute beaucoup à l'amélioration des conditions de vie des habitants du sud sans que cela soit réellement visible sur les statistiques : l'énergie produite n'est pas vendue mais utilisée directement par le propriétaire du système. On estime à près de 2 milliards le nombre de personnes non encore connectées à un réseau électrique et la plupart ne le seront sans doute pas dans l'immédiat [4,5]. Couvrir quelques besoins élémentaires de cette population (éclairage, radio,..) par des minicentrales solaires décentralisées, individuelles ou collectives, est couramment réalisé. La généralisation de cette pratique à l'ensemble des besoins, à raison de 10Wp⁵ par personne, porterait la demande de panneaux à 20 GWp (200km², surface égale à deux fois la production annuelle allemande de verre plat [10]). Cette demande potentielle représente 250 fois la production annuelle mondiale actuelle et constitue un marché estimé à 100 milliards de francs suisses⁶. En plus de l'amélioration du niveau de vie des plus démunis et de la lutte contre l'exode rurale, un tel scénario rendrait possible le décollage de la filière, dont le volume de production permettrait alors une baisse sensible du matériel, rapprochant le prix de revient du kWh photovoltaïque des pays du nord au prix de revient des sources non renouvelables que l'on trouve sur le réseau.

Une autre possibilité est de coupler directement les panneaux sur le réseau électrique par le biais d'un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif. Un ou plusieurs utilisateurs peuvent se connecter entre l'onduleur et le réseau. Un comptage électrique est alors réalisé sur les flux entrant et sortant. La Suisse a été longtemps un des leaders dans le développement de ces systèmes, le Japon puis les Etats-Unis ont annoncé des programmes ambitieux dans le domaine des "toits solaires" [8].

La puissance des centrales photovoltaïques est modulable depuis quelques watts jusqu'à quelques MW ou plus. Des projets grandioses de production d'hydrogène photovoltaïque au Sahara ont été décrits [10] et consistent en des centrales de très grande puissance (30 GWp) transformant l'énergie solaire en électricité puis en hydrogène, qui serait alors distribué vers l'Europe via des pipelines.

⁵ Le Wp (watt pointe) correspond à une puissance électrique délivrée de 1W dans des conditions normalisées : ensoleillement de 1000W/m² (plein soleil) et température de panneaux de 25°C. En une année, il faut compter l'équivalent d'environ 1000 heures de fonctionnement normalisé pour nos contrées et jusqu'à 2500 heures pour les régions les plus favorisées (déserts tropicaux).

⁶ Cette somme peut paraître à première vue importante, mais elle représente moins de 10% des budgets militaires mondiaux pour une année et le quart de la somme nécessaire à la neutralisation de l'ensemble des mines antipersonnelles [21]. Il ne s'agit donc pas d'un problème de ressources mais d'allocation des ressources.

Le prix de l'énergie photovoltaïque est encore élevé; un ordre de grandeur supérieur à celui du marché actuel. Si on considère une baisse du prix de l'unité électrique photovoltaïque produite de 50% tous les 10 ans, ce qui a été grossièrement observé ces 2 dernières décennies, il faudrait attendre une trentaine d'années pour que l'électricité photovoltaïque vendue en réseau soit commercialement rentable; en plus de ses autres qualités.

4.3 Vers la chasse aux photons extra-terrestres?

Plusieurs projets proposent de capter l'énergie solaire extra-terrestre grâce à de vastes stations photovoltaïques orbitales ou posées sur la lune, qui transformeraient cette énergie sous forme de micro-ondes [18, 19]. Des centrales sur terre réceptionneraient et distribueraient l'énergie électrique ainsi produite. Une récente étude [20] tente de démontrer la viabilité économique et environnementale de tels systèmes. Malheureusement, la démonstration se fait à partir d'une situation hypothétique en l'an 2100 de 20 milliards d'individus consommant comme un américain d'aujourd'hui, ce qui représente une multiplication de la consommation actuelle par 11.7. En étendant ce raisonnement aux autres ressources (régime alimentaire américain pour tous, consommation d'eau,...), l'avenir de l'humanité devient bien sombre.

Bien sur, on peut faire des objections sérieuses sur la crédibilité économique et technique de telles opérations et se demander si, en fin de compte, le bilan énergétique global (en tenant compte de l'énergie investie dans le matériel et les mises sur orbite) ne serait pas négatif. Pourtant, ces études ont le mérite de démontrer que, uniquement dans le cas de l'approvisionnement énergétique, les limites du globe peuvent être dépassées avec les techniques d'aujourd'hui : il serait ainsi possible de puiser dans des ressources extra-terrestres renouvelables quasi infinies à l'échelle de l'homme. Ce qui contredit le mode de pensée géocentrique qui domine actuellement (la planète est limitée) et ouvre une voie vers un nouvel héliocentrisme. Illusion ou, c'est le cas de le dire, perspective "révolutionnaire" ?

5) Conclusion

Ce petit tour des spécificités des énergies renouvelables a fait apparaître 6 points importants pour bien appréhender le rôle qu'elles pourront jouer dans le futur.

1. La part des énergies renouvelables dans la couverture des besoins humains a atteint son minimum et a maintenant tendance à croître. Il s'agit sans doute d'une tendance lourde, qui a pour origine l'amélioration technique des différentes filières concernées et les problèmes environnementaux liés à l'utilisation des autres ressources. Curieusement, grâce à son abondance, le charbon suit aussi la même voie puisque, après avoir baissé depuis le milieu de ce siècle, sa contribution augmentera très certainement dans l'avenir.
2. L'utilisation énergétique de la biomasse constitue encore le pilier des énergies renouvelables, principalement au sud. Toutefois, l'homme a à son égard un comportement essentiellement de prédateur qui doit être radicalement modifié pour qu'elle mérite véritablement son qualificatif de "renouvelable".
3. Les filières très anciennes, datant de l'antiquité (hydraulique et éolienne), ont pleinement bénéficié d'avancés techniques (turbines, aéronautique,..) et constituent encore des technologies sur lesquelles il faut compter. Leur renouveau doit à la fois au développement des réseaux électriques et au développement d'applications décentralisées permettant de fournir de l'électricité à des zones isolées du réseau.

4. A plus long terme, seule la transformation directe du rayonnement solaire (photons) en énergie utile a la capacité quantitative de se substituer aux énergies fossiles, à condition que la demande en énergie se stabilise grâce à une utilisation plus rationnelle. Le rayonnement solaire constitue une ressource 10 000 fois supérieure à la consommation mondiale d'énergie, répartie assez régulièrement à la surface de la terre quand on le compare aux autres ressources. Des différentes filières possibles, le photovoltaïque semble être le meilleur candidat à long terme. Il constitue également la seule filière réellement nouvelle et en pleine évolution, où le potentiel de nouveautés technologiques est immense. Les possibilités d'un développement rapide sont réelles mais soumises à des contraintes économiques difficiles.
5. Il ne faut pas opposer production centralisée et production décentralisée, qui sont complémentaires. Un point de vue souvent rencontré veut qu'on oppose ces deux possibilités. Ne vaut-il pas mieux renoncer à de tels schémas, souvent purement idéologiques, et saisir toutes les opportunités de développement des énergies renouvelables: la première forme fournit des kWh à un réseau tandis que la deuxième fournit soit directement des prestations dans des zones isolées, soit soulage le réseau existant.
6. La poursuite du développement des énergies renouvelables suppose une vision à long terme et une action volontariste, comme le montre clairement le succès de la filière "éolienne". Un rôle critique est tenu par les pouvoirs publics et par les grandes sociétés énergétiques, en pleines évolutions actuellement (mondialisation de l'économie, affaiblissement du rôle de l'état, libéralisation des marchés de l'électricité et du gaz,...). Une attention particulière sera nécessaire pour que la réglementation qui va être mise en place à l'occasion de la libéralisation des marchés énergétiques prennent en compte le nécessaire développement des énergies renouvelables.

Bibliographie

- [1] J.C. Debeir, J.P. Deléage, D. Hémerly, "Les servitudes de la puissance. Une histoire de l'énergie", Flammarion, 1986.
- [2] J.M. Chevalier, P. Barbet, L. Benzoni, "Economie de l'énergie", Presse de la fondation nationale des sciences politiques & Dalloz, 1986.
- [3] F. Pharabot, "Atlas mondial de l'énergie", Editech, 1989.
- [4] B. Dessus, "Atlas des énergies pour un monde vivable", Syros, Paris, 1994.
- [5] D.F. Barnes, W.M. Floor, "Rural energy in developing countries : a challenge for economic development", Annual review of energy and the environment, Vol. 21, 1996, pp. 497-530.
- [6] "Eolienne : la croissance", Systèmes Solaires, N°110, Novembre-décembre 1995.
- [7] E. Barbier, "Nature and technology of geothermal energy. A review", Renewable & Sustainable Energy Review, Vol. 1, N°1, March-June 1997, pp. 1-67.
- [8] C. Flavin, "Domestiquer le soleil et le vent", L'Etat de la Planète 1995/1996, pp. 87-113, La Découverte.
- [9] P. Hollmuller, Cuepe, 19 av. de la Jonction, 1205 Genève, communication privée.
- [10] C.J. Winter, J. Nitsch, "Hydrogen as an energy carrier", Springer-Verlag, 1988.

- [11] C. Macherel, G. Krebs, "Installations solaires de préchauffage de l'eau chaude sanitaire", Cahiers du service du chauffage de la ville de Genève, n°3, 1990.
- [12] J. Hurdes, B. Lachal, "Industrial solar heat", Delta energy, CH-8197 Rafz, 1986.
- [13] W. Weber, "Données interactives d'architectures solaires DIAS", logiciel, Cuepe, CH-1205 Genève.
- [14] D. Pahud, "Analyse énergétique de l'immeuble industriel Marcinhès à Meyrin", thèse n° 2645, Université de Genève, 1993.
- [15] A. Crober, "En captant la chaleur solaire, nous pourrions nous passer de charbon", La Science et la Vie, Tome V, avril-juin 1914.
- [16] R. Dracker, P. De laquil III, "Progress commercializing solar-electricity power systems", Annual review of energy and the environment, Vol. 21, 1996, pp. 371-402.
- [17] P. Bonhote, M. Graetzel, " Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi-conducteurs nano-cristallins", Stratégies Energétiques Biosphère & Société, 1995, pp. 61-68.
- [18] Numéro spécial "Wireless power transmission", Solar Energy, vol. 56, N°1, 1996, pp. 1-131.
- [19] "Prospective XXI^e siècle", Systèmes Solaires, N°67/68, Mars-avril 1991.
- [20] D.R. Criswell, R.G. Thompson, "Data envelopment analysis of space and terrestrially-based large scale commercial power systems for earth : a prototype analysis of their economic advantages", Solar Energy, vol. 56, N°1, 1996, pp. 119-131.
- [21] M. Renner, "Le budget du désarmement", L'Etat de la Planète 1995/1996, pp. 224-250, La Découverte.