



P aul CASEAU

Paul Caseau a été élève à l'Ecole Polytechnique (de 1954 à 1956) et à l'Ecole des Ponts-et-Chaussées (1957 à 1958).

Il a été Directeur des Etudes et Recherches à EDF, puis à la Direction Générale.

Il a été Président de FINOVELEC, Société de financement de l'Innovation des domaines technologiques liés à l'électricité et à ses applications.

Il a présidé le groupe de réflexion « superordinateurs et ordinateurs parallèles » des Ministères de la Recherche, de l'Industrie et de la Défense. Egalement membre de la Commission Scientifique et Technique du Traité Euratom.

Il est membre de l'Académie des Technologies ;

Chevalier de l'Ordre national de la Légion d'Honneur ;

Officier de l'Ordre national du Mérite.

L'énergie au XXI^{ème} siècle : trois transitions majeures

Le titre choisi pour cet exposé est « *Energie au XXI^e siècle: trois transitions majeures* ». Cela veut dire qu'en abordant le cours du XXI^e siècle, je ne vais pas traiter seulement des vingt prochaines années, comme on le fait en général quand on veut donner des chiffres dont on soit à peu près sûr. Je vais avoir l'inconscience de pénétrer bien plus avant dans le XXI^e siècle.

D'autre part, trois transitions ne veut pas dire trois scénarios. Les transitions sont des événements et en les combinant (plus fortes, moins fortes, l'une avant ou après l'autre), on obtient des scénarios. Je vous parlerai essentiellement des transitions, et vous pourrez imaginer des scénarios. J'en imaginerai un ou deux avec vous.

Oublier l'approche besoins-ressources

J'avais sous-titré cet exposé: « Il faut oublier l'approche besoins-ressources ». L'approche besoins-ressources, c'est la façon dont on a toujours traité les problèmes d'énergie. Cela consiste à dire: en 2050, nous serons 11 milliards de personnes, le PIB par tête sera à peu près à tel niveau...

Certains pays en auront rattrapé d'autres, et la consommation d'énergie par PIB, ça sera à peu près tel chiffre. On multiplie alors les trois chiffres, on obtient un résultat et on dit : voilà les besoins. Ensuite, on fait le compte des ressources disponibles, une sorte de panier de la ménagère et on regarde si le panier est assez bien rempli pour que les besoins soient couverts. Je pars de l'idée que cette approche ne peut plus fonctionner.

Il y a une raison profonde pour que cette approche échoue. C'est que les deux chiffres de croissance, sur lesquelles on basait solidement les calculs, qui sont la croissance démographique et celle de la consommation énergétique en fonction du PIB¹, étaient considérés comme très stables et très sûrs. Or ils sont maintenant au contraire très instables et très peu sûrs. Et donc, quand on demande « Quelle sera la consommation d'énergie en 2100 ? », on peut constater facilement que l'incertitude sur la réponse est de un à quatre. C'est dire qu'en 2100, la consommation d'énergie sera soit de 9 Gtep², - on a actuellement un peu plus, donc elle aurait un peu baissé -, soit de 36Gtep : là, on aurait beaucoup augmenté. Entre 9 et 36, vous pouvez placer tous les

¹ PIB : produit intérieur brut (somme de toutes les valeurs ajoutées, mesurées et enregistrées)

² Gtep ou GigaTep : Tep signifie tonne-équivalent pétrole. Giga = milliard de.

futurs de l'humanité que vous voulez imaginer. Donc cette approche n'apporte rien puisque l'incertitude est beaucoup trop grande pour que vous puissiez continuer à construire un raisonnement.

Revenons à l'incertitude de un à quatre : l'incertitude qu'admettent les démographes est à peu près de un à deux, c'est-à-dire que la population en 2100 sera comprise entre 7 milliards et 15 milliards. Cette population sera répartie, soit de façon «très inégalitaire» ou bien «plus ou moins inégalitaire» : certains considèrent que 80 % de la population mondiale, et 80 % de la richesse surtout, sera circonscrite à une bande côtière du monde de 100 kilomètres de largeur : c'est un système très, très inégalitaire. L'autre solution est une répartition plus homogène. L'inégalité change complètement le PIB, la répartition du PIB et les consommations. Il faut donc, si on veut aller jusqu'au bout de la prévision, pouvoir prédire l'inégalité.

Et le dernier point, c'est que la consommation, la traduction de la consommation en énergie, et du PIB en énergie peut varier aussi de un à deux. Là, toutes les prévisions s'accordent. Si l'on cumule tous les facteurs (le degré d'inégalité, le niveau des prix, l'adaptation des technologies, l'incertitude

sur la population) à la fin on a un facteur d'incertitude de un à quatre.

On pourrait objecter que si pour 2100, on n'arrive pas à réduire l'incertitude, on saurait à peu près prévoir ce que sera 2050. En fait, il n'est pas très difficile de montrer qu'à mi-course du XXIème siècle, on a presque un facteur de un à deux. Et qu'en réalité tous les facteurs jouent à leur tour, plus vite et plus profondément qu'on ne le croit, de sorte que l'incertitude finale reste forte².

Trois transitions

Ayant donc mis de côté tout ce qu'on pratiquait d'habitude, je propose de faire autrement, c'est-à-dire de réfléchir à des transitions. Je vais donc en citer trois, en réalité quatre parce que la première se double quelque peu.

- La première, c'est ce qu'on appelle le *peak-oil*, le pic du pétrole, qui est suivi comme son ombre par une espèce de réplique, vingt ou vingt-cinq ans plus tard par le même phénomène en matière de gaz. Que signifie ce phénomène ? Il signifie qu'à partir d'une certaine date, l'extraction du pétrole atteint un maximum et ne suit plus la croissance des besoins (croissance qui pour le moment

² Les incertitudes sur la démographie restent fortes, comme le montre un chiffre intéressant et peu connu : le nombre des naissances, c'est-à-dire l'entrée des hommes sur la terre. Ce nombre est maintenant stable ou légèrement décroissant. Donc la population mondiale ne continue à croître que parce que l'âge moyen croît, et non pas parce que le nombre des entrants augmente. On voit tout de suite qu'une telle évolution n'est pas «durable». Mais il est très difficile de donner une date pour le retournement.

est à peu près linéaire). Actuellement, la croissance est continue, mais l'offre suit de moins en moins facilement. On atteindra un jour une asymptote de production³, et savoir si on redescendra (si le pic est vraiment un Everest) n'est pas une question importante. La question importante, c'est qu'on décrochera par rapport à la croissance de la consommation, et donc il devra se passer quelque chose. L'asymptote est peut-être à 30 milliards de barils par an, peut-être à 40, peut-être à 45 : il est difficile qu'elle soit bien au-delà. Les pessimistes disent 30, et c'est bientôt. Les optimistes disent 45, et ce n'est pas avant 2030. Après quoi, il se produit un report naturel des consommations d'une énergie fossile sur l'autre, tout le monde se précipite sur le gaz, et le phénomène se reproduit pour le gaz, vingt à vingt-cinq ans plus tard. Donc vous avez deux transitions l'une après l'autre (T1 et T3).

- La deuxième transition, - je l'appellerai T2 -, est la transition qui nous fera entrer dans un monde « contraint en carbone », celle qui correspond à ce que l'humanité doit faire et pourrait se décider à faire - non seulement énoncer ce qui est à faire, mais le faire effectivement - à propos de la lutte contre l'effet de serre. Et cette transition se définit par la proposition suivante : « l'humanité a mis en place un système cohérent

de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre ». Cela ne signifie pas seulement que le monde a compris l'importance de l'effet de serre, parce que si ce n'était que cela, la transition serait déjà derrière nous - je considère en effet que le monde a effectivement compris. Mais il y a une distance presque infinie entre le fait de comprendre et le fait d'agir. Vous pouvez pendant très longtemps considérer que beaucoup de gens devraient agir à votre place : vous avez vu dans quelle niche vous pouvez vous mettre et vous ne faites rien. Ce que j'appelle la transition T2, c'est le moment où tout le monde dit : « Stop, il faut que tout le monde fasse quelque chose ». Et je suis exigeant en disant cela parce que T2 consiste à mettre en place un système cohérent de lutte, c'est-à-dire pas de lutte les uns contre les autres. L'alternative, c'est « pas de système », ou des systèmes incohérents. Je vais vous donner deux exemples d'organisation. Le premier est relativement incohérent (je l'évoquerai plus tard dans un scénario) et le second est très, et même trop cohérent.

Le premier : vous pouvez lutter contre l'effet de serre par la technologie en développant des technologies nouvelles, plus économes, qui diminuent effectivement les émissions, et vous mettez alors presque toutes vos billes dans le panier technologie.

³ L'une des raisons, c'est que tout puits de pétrole, à peine ouvert, voit sa production commencer à baisser. Il arrive donc un moment où, malgré l'ouverture de nouveaux puits, la production des champs pétroliers commence à décroître. Le champ américain décroît depuis les années 70 - et la théorie du peak-oil est célèbre parce que celui qui l'a émise le premier a prédit la décroissance du champ américain : il a prédit - quelques années avant - qu'à partir de 1970, la production du champ américain baisserait. Il y a maintenant une association (l'association ASPO) qui se consacre à l'étude du peak-oil.

Ce que vous ne mettez pas dans ce panier, vous acceptez de le laisser aux échanges inégaux : vous vous dites « il y aura bien toujours quelqu'un pour me vendre des permis parce qu'il y aura des gens qui seront coincés bien avant moi ou qui auront besoin d'argent bien plus que moi, donc je compte sur les échanges ». Et, troisième point, je compte sur la transition T1 déjà évoquée. « Si le prix de l'énergie se met à monter et double, le prix de l'énergie fossile essence double et celui du gaz suit. Alors pourquoi lutter contre l'effet de serre, ça va se faire tout seul! ». Ce schéma, c'est une organisation plutôt incohérente même si on le considère comme une organisation.

Le second exemple, c'est le programme « facteur 4 »⁴ dont vous avez tous entendu parler, et « facteur 4 », c'est une réduction des émissions avant 2050. Les Européens ont presque annoncé cet engagement. Il me semble que la France l'a également inscrit dans la loi sur l'Energie, bien que cela ressemble plutôt à un discours de fin de banquet. Mais on a quand même effectivement commencé à annoncer ce genre de choses et pour faire bon poids, on a dit : « il n'y aura quasiment pas d'échange, on ne compte pas sur des échanges pour remplir nos quotas, on fait nous-mêmes l'effort facteur 4 ». Vous verrez tout à l'heure, quand j'en parlerai à propos des scénarios, que cela secoue

l'économie, et même que cela secoue sérieusement.

- La troisième transition est à mon avis déjà derrière nous, mais elle n'est pas encore complètement entrée dans les mœurs et dans les conceptions. C'est la séparation entre les usages fixes de l'énergie, c'est-à-dire les usages en réseau, l'industrie, le tertiaire, l'habitat, toutes ces activités pour lesquelles vous utilisez en général l'énergie que vous fournit un réseau. Vous ne la faites pas venir par barils ou en petites unités, mais par un réseau de gaz ou d'électricité, éventuellement un réseau fixe de fuel par camions-citernes. Ce sont les usages en réseau : les autres sont au contraire les usages du transport. Là, l'énergie que vous utilisez doit vous accompagner, ce qui est une contrainte extrêmement sévère. La séparation entre les deux, chacun peut s'en rendre compte, est déjà très largement engagée dans les pays développés. C'est-à-dire que l'on pourrait faire une découverte radicale sur les éoliennes, le nucléaire ou dieu sait quoi, ça ne ferait pas avancer les voitures, sûrement pas. Et je dirai réciproquement que, si l'on trouvait que l'hydrogène fait très bien avancer les voitures, cela aurait un impact assez faible sur la façon dont on se chauffe, dont on s'éclaire, ou dont tourne l'industrie. Les usages se séparent, les marchés se séparent. Le marché de l'essence et de tout ce qui sert aux voitures

⁴ Le facteur 4, c'était le titre d'un livre qui disait : « On va diminuer la consommation d'énergie par quatre, à service rendu égal ». Aujourd'hui, avec ce que nous savons de l'effet de serre, ce facteur quatre, c'est un facteur quatre de réduction des émissions, donc c'est, à service rendu égal, non pas diminuer l'énergie consommée par quatre, mais diminuer les émissions de gaz à effet de serre par quatre. Si on se donne le temps qu'il faut, c'est-à-dire si on veut avoir divisé par 4 vers 2060/2070, les scénarios et les chiffres sur l'Europe permettent de dire « Oui, c'est possible ». En énergie fixe, c'est même relativement facile. En énergie mobile, on est obligé de faire nettement plus d'efforts, mais bon, il n'y a pas d'impossibilité technique profonde. D'autre part, c'est une quasi-nécessité de stabiliser le CO₂ vers 2080/2100. Si on le stabilise plus tard, l'humanité risque des ennuis graves.

est un marché complètement autonome. Il influence le gaz, c'est vrai, mais au fond les reports sont maintenant de moins en moins clairs d'une énergie vers l'autre. Donc vous avez d'un côté les énergies qui servent pour les transports et de l'autre les énergies en grilles, en réseaux.

On notera tout de suite que les énergies en réseaux ne posent quasiment aucun problème technologique, et n'en posent pas d'insolubles sur le plan économique. En effet, nous avons quatre énergies ou équivalents qui permettent de s'adapter à la fois à T1, c'est-à-dire à la montée brutale des prix du pétrole ou à T2, c'est-à-dire à la fermeture des émissions. Ces quatre énergies sont les économies d'énergie, que j'appelle le Négawatt : c'est très efficace (mais pas éternellement efficace, on ne peut évidemment pas descendre en dessous de zéro). Vous avez les énergies renouvelables thermiques, c'est-à-dire tout ce qui produit de la chaleur, qui est très efficace (les autres énergies renouvelables le sont beaucoup moins mais celles-là le sont) et représente des volumes importants. Vous avez évidemment le nucléaire et vous avez la séquestration⁵. Et vous avez d'autre part le charbon et le pétrole non conventionnels qui eux font des émissions - donc tout dépend si on lutte en même temps contre les émissions - mais si vous ne vous préoccupez que du prix du pétrole, vous êtes relativement tranquille, vous avez une frontière qui est vraiment

tout à fait simple, le charbon et le pétrole non conventionnel vous attendent.

Au contraire, du côté des usages mobiles, le choix des vecteurs est très contraignant, car finalement, vous n'utiliserez pas l'électricité. Si vous utilisez un liquide, c'est que vous aurez mis du carbone dedans. Ce carbone, où l'aurez-vous trouvé ? Et si vous devez utiliser de l'hydrogène pur, il faudra démontrer que cela marche bien et puis aussi le fabriquer. Donc là, vous avez un des grands défis technologiques et un défi économique également. D'autant plus - j'ai envie de souligner ce point - que les usages mobiles sont le fer de lance de la mondialisation. Sans transport, pas de mondialisation. Pour toutes les raisons que vous pouvez imaginer, on ne va pas y renoncer si facilement et les sociétés développées sont prêtes à y mettre beaucoup d'argent. Voilà une situation pas facile, un défi technologique, un défi que la société voudra certainement relever.

Voilà les trois transitions. L'une est annoncée entre 2015 pour les plus pessimistes dans le monde professionnel, et 2035 pour les optimistes un peu professionnels. La seconde, c'est-à-dire la lutte contre l'effet de serre, n'est pas annoncée parce que tout le monde se dispute (avons-nous commencé à le faire, n'avons-nous pas commencé à le faire ?), et c'est probablement le point le plus douloureux. Et la troisième, c'est-à-

⁵ Le potentiel de la séquestration du CO2 est un peu difficile à évaluer, mais les chiffres sont au départ très grands : si la séquestration marche, c'est 10 Gigatonnes d'équivalent de pétrole qui pourraient être séquestrés chaque année. Savoir si cela peut être fait pour un prix acceptable est donc la question essentielle.

dire la séparation entre transports et autres usages, est déjà pratiquement faite, pour les pays industrialisés en tout cas.

Situer recherche et développement par rapport aux transitions

Les trois transitions sont comme trois cartes, auxquelles vous donnez la valeur que vous voulez, c'est-à-dire que vous pouvez être optimiste ou pessimiste. Mais retenons aussi que cette analyse a d'abord été développée pour évaluer des programmes de recherche, et pour dire aux chercheurs, : « attention, dans la mesure où vous êtes chercheurs - et pas seulement technologue très proche de la sortie des produits -, cela signifie que ce sur quoi vous travaillez pourrait aboutir dans vingt ans, voir dans trente, voir dans cinquante. Et donc dans tous les cas, il faut regarder ce que sera la société quand votre invention va sortir. Elle sera nécessairement très différente de la société actuelle. »

Là, il faut se rappeler qu'il existe un marché des énergies, qu'il y a ce qu'on appelle un *merit order*, un ordre de mérite des énergies et que les règles du marché sont en général « *winner takes all* », « le gagnant prend tout »⁶. Le second a des miettes, le troisième se suicide. Donc si vous ne voulez pas être dans la position du troisième, ré-

fléchissez ! L'approche des trois transitions est un rappel à tout ceux qui cherchent et développent... Ils ne peuvent pas tous avoir raison. Ils développent trop de choses dont les prix ne sont pas très connus et surtout pas très connus à l'horizon 2040, 2050, 2080. Cela vaut pour tout, que ce soit la quatrième génération, la fusion, les piles à combustible, les éoliennes. Il faut à chaque fois réfléchir dans quel avenir, - au moment où je pense que mon système va sortir -, lesquelles des trois transitions se seront déjà produites et à quoi elle auront conduit.

Deux scénarios

Pour changer un peu d'exercice, puisque je vous ai précisé mes trois cartes, je vais évoquer deux scénarios, pour l'exemple. Ce ne sont pas nécessairement ceux que je considère les plus probables, mais ils sont franchement différents l'un de l'autre et leurs conséquences sont très différentes, non seulement pour l'économie, mais aussi pour les questions que peut se poser l'humanité.

Le premier scénario, c'est « *T1 et T3 fortement marqués, et T2 repoussé aux calendes* », c'est-à-dire un pic sur le pétrole bien marqué, à un moment où les infrastructures que nous connaissons aujourd'hui doivent être renouvelées. Et celui du gaz se produit,

⁶ La règle *winner takes all* : j'ai présenté une partie de cette analyse lors de la discussion à l'Académie des technologies, et j'ai été très critiqué. Je reformulerai donc la règle de la façon suivante : « partez de cette idée-là, certes c'est une idée pénible, donc partez de celle-là et vous aurez des surprises agréables, parce qu'effectivement, de temps en temps, le second ne se porte pas si mal, parce que les marchés sont parfois segmentés. Et le travail des gens intelligents, c'est de segmenter les marchés pour éviter la loi *winner takes all*.

environ vingt ans plus tard, mais en général il est anticipé. L'humanité est exceptionnelle pour ne pas voir ce qui est devant ses yeux, mais par contre, quand elle l'a vu, elle voit aussi ce qui n'est pas tout à fait devant ses yeux mais juste après : dès qu'on a été averti, on en vaut deux, comme chacun sait⁷. Donc T1 et T3 fortement marqués et puis on se dispute pour savoir ce qu'on va faire, si on doit faire... Comme trop de gens ont découvert qu'ils pouvaient plus ou moins gagner la bataille économique en essayant de repousser tout accord sur l'effet de serre, il n'y a pas d'accord sur l'effet de serre, au moins tant qu'on est dans la période qui va d'aujourd'hui à 2050. C'est mon premier scénario.

Que s'y passe-t-il ? Un doublement des prix du côté pétrolier. Mais immédiatement le charbon et le pétrole non conventionnels deviennent des valeurs sûres : si le prix du pétrole double et si on ne s'occupe pas du CO₂, le charbon et le pétrole non conventionnels sont des valeurs sûres. Et donc l'humanité, ou plutôt sa partie industrielle développée, pousse un soupir de soulagement, car elle sait que finalement, elle ne risque pas énormément. Il y a une véritable effervescence technologique pour s'adapter aux nouvelles conditions. Quand les prix doublent, en général, toute l'industrie qui est basée sur ces prix change. C'est une période très intéressante pour les chercheurs, les ingénieurs. Les économies d'énergie sont payées par les gains sur les consom-

mations,. Seuls les fous n'économisent pas l'énergie quand elle est à deux fois le prix actuel : tout le monde le fait, et c'est tout naturel. Et comme de plus chacun imite toujours son voisin, cela se répand comme une traînée de poudre, donc la question de l'économie d'énergie est réglée. En définitive, l'inégalité devant le doublement des prix est évidemment la question majeure. Je vous ai décrit la situation en prenant le point de vue que je connais - ce n'est pas parce que je le considère comme meilleur que les autres, mais je le connais -, qui est le point de vue des pays développés et industrialisés. Très différent serait celui des pays émergents. Peut-être pas tous, cela dépend de leur degré d'émergence, mais ceux qui n'auront pas émergé souffriront atrocement car ils ne pourront pas suivre un doublement des prix de l'énergie. Donc il y aura un reclassement des nations sur le chemin du développement qui peut-être d'une très grande brutalité. On peut dire d'autres choses à propos de ce scénario si on le regarde un peu plus dans le détail, mais je crois que cela donne déjà une idée de la situation qui en découle.

Je prends maintenant un scénario opposé : T1 et T3 sont tardifs, c'est-à-dire en 2030 ou 2035 pour T1 et 2050 pour T3. En revanche, dès 2010, les nations touchées, inspirées par l'Esprit Saint ou par ce que vous voulez, se mettent d'accord et disent « On fait quelque chose » contre l'effet de serre et, comme la question de l'équité est essentielle, elles tombent d'accord sur l'idée

⁷ Pensons, par exemple, à ce que nous lisons tous les jours sur la canicule et à ce que nous ne lisons absolument pas lorsque que la canicule allait venir, était pratiquement là. Donc il faut que les yeux se dessillent, mais une fois qu'ils sont dessillés, ils le sont.

que les nations industrielles diminuent d'un facteur 4 leurs émissions, peut-être pas trop brutalement, peut-être pas à l'horizon 2050, mais plutôt 2060. Les autres se voient autoriser des quotas d'émission beaucoup plus grands, mais pas grands au point qu'ils puissent les revendre à bas prix au premier venu. Il n'y a donc pas de tricherie trop marquée sur ce point. Donc des solutions « facteur 4 » pour 2050 ou 2060 sont mises en place. Et leur effet peut être très brutal.

On commence à le savoir parce qu'on commence à étudier le prix du CO₂ si on institue un marché, un «facteur 4» et un marché des permis interne aux pays développés. Le prix du CO₂ se met à grimper en flèche vers 2030 et, en flèche, cela veut dire qu'au bout d'un moment, quand vous achetez un litre d'essence, le CO₂ qui est contenu dedans et que vous allez émettre coûte deux fois plus que l'essence elle-même. Et donc vous avez des situations complètement abracadabrantes, car le système des prix que nous connaissons est complètement déstructuré. On ne peut d'ailleurs pas savoir comment les gens réagiront : est-ce qu'ils changeront très rapidement leurs comportements, auquel cas il y aurait moins de secousses et d'instabilité. Car l'évolution sera d'autant plus de brutale que les gens refusent d'accompagner le mouvement,

c'est-à-dire ne vont pas très vite vers les économies d'énergie. Ils continuent à s'affronter les yeux dans les yeux pour savoir s'ils font ou ne font pas du nucléaire. Ils perdent ainsi trois ans, quatre ans, dix ans et le temps court. A un moment, on ouvre le livre de comptes et on règle ses comptes, c'est-à-dire que tout le monde s'aperçoit que les émissions sont en train de monter fortement, ce qui engendre des prix terriblement hauts.

Il faut que vous sachiez que c'est exactement ce qui s'est produit avec les NOx⁸, les dérivés de l'azote, qui sont contrôlés en Californie par un marché, le marché des émissions de NOx. Sur ce marché, tout le monde vivait dangereusement, c'était vraiment la chèvre de Monsieur Seguin, on ne peut pas le décrire mieux. Et puis, par une série de hasards - ces choses là arrivent -, presque tous les producteurs sont arrivés au bout ou quasiment au bout de leurs autorisations, donc ils se sont mis à acheter sur le marché des NOx. Et comme tout le monde achetait, les prix sont montés verticalement. Ils ont été répercutés sur les utilisateurs et on a eu la crise californienne. C'est un des facteurs déclenchants. Il y avait d'autres raisons, bien entendu, parce que la crise aurait pu se résoudre par l'importation etc., ce qui n'a pas été fait. Mais le facteur déclenchant est

⁸ Une automobile qui fait un kilomètre fabrique aujourd'hui un demi-kilo de CO₂ et une cuillère à café de Nox. Par exemple, mille kilomètres par mois, c'est 500 kilos de CO₂ et 500 cuillères à café, c'est-à-dire 2,5 litres de NOx qui peuvent se transformer en acide nitrique, et peut contribuer à la création d'ozone.

Pour traiter cette question, les Américains ont créé un système avec permis. Les producteurs d'électricité recevaient des quotas, c'est-à-dire une interdiction d'émettre plus qu'un certain niveau. Et s'ils avaient besoin d'émettre plus, ce qui s'est produit, il leur fallait acheter à un autre émetteur, sur un marché, des droits à émettre du NOx. Ce système est propre aux États-Unis, ils se sont félicités de son fonctionnement pendant des années, mais ils n'avaient pas vu que de temps en temps, ce système peut créer des instabilités. L'Europe a choisi la réglementation, c'est à dire l'interdiction de dépasser une valeur fixée à l'avance.

bien celui-là. Et donc dans notre cas, cela peut tout à fait se produire... L'impact sur la demande peut même être alors tellement brutal que cela peut conduire le prix du pétrole à baisser. Vous voyez que suivant l'ordre des facteurs, vous pouvez avoir des effets complètement opposés. Je ne suis pas très sûr que des calculs existants conduisent à cela avec précision, mais l'effet est suffisamment troublant pour qu'il faille regarder de plus près.

Enfin, l'équité dans le partage des efforts est la question majeure; parce que si la tornade est aussi forte, ceux qui chercheront à s'éclipser à l'anglaise pendant que tout le monde regarde ailleurs seront très, très nombreux, bien entendu.

Voilà deux scénarios, d'autres pourraient être imaginés. Je les ai pris assez tôt dans la première moitié du siècle. Il y a à cela deux raisons. C'est que sur la deuxième moitié, on en sait quand même beaucoup moins et d'autre part, on peut penser que si l'humanité passe 2060, c'est qu'elle saura comment passer la suite. Ce raisonnement reste assez théorique, car il suppose que les tensions seront moins fortes après 2060. La population sera probablement en train de baisser, certains mécanismes auront été mis en place et commenceront à produire des effets, mais par contre, ils n'auront pas fait rebaisser la température du globe. Que peut-il se passer à ce moment-là ? Des tensions venant de la température elle-même, qui peuvent modifier la façon dont l'humani-

té vivra. Et d'autre part, il y a ou il y aura, - mais peut-être il y aura eu déjà - des effets qui ne sont pas liés à l'énergie mais à l'agriculture, à la liaison entre l'eau et l'agriculture, qui peut créer d'autres transitions, d'autres surprises.

Comment conclure ce tableau ?

D'abord, en répétant que l'approche besoins-ressources n'apporte rien: elle est défectueuse, il faut l'abandonner. A minima, si on tient compte de la transition de séparation usage fixe/usage mobile de l'énergie, il faut étudier deux approches besoins-ressources. Si vous lisez un papier qui ne fait pas ce travail, alors jetez-le à la poubelle, vous aurez gagné du temps. Par ailleurs on doit tenir compte de la contrainte CO₂. Les approches besoins-ressources qui ne respectent pas la contrainte CO₂ mais qui la découvrent à la fin de leurs conclusions ne sont pas sérieuses.

A contrario, vous disposez par exemple pour lancer le débat, d'un article de Pierre Radanne dans la série verte des *Annales des mines*⁹ Bien que je ne sois pas complètement d'accord avec lui, parce qu'il utilise l'approche besoins-ressources, néanmoins il sépare le problème de l'énergie en deux, fixe et mobile, et il le fait en tenant compte de la contrainte CO₂. C'est déjà très riche en informations. Par contre, il ne traite pas les prix et donc il y a des choses qui lui échappent. Mais comme il le dit lui-même,

⁹ Références svp janvier 2004

« C'est pour commencer la discussion ».

Donc il faut avoir fait cette double approche, sous contrainte CO₂. Mais en outre, il faut dans tous les cas regarder l'interaction avec le système des prix parce qu'elle jouera un rôle fondamental sur la consommation. Elle joue en effet sur la consommation elle-même, elle joue parce qu'elle élimine certaines énergies qui sont trop mal situées dans le système du *merit order*. Par exemple, il est possible que la séquestration du CO₂ n'arrive pas à percer, parce qu'elle est trop mal située sur cette échelle : elle aura probablement beaucoup de mal dans les usages fixes. Elle peut percer si les usages mobiles deviennent tellement exigeants qu'il faudrait absolument faire une chimie compliquée, fabriquant de l'hydrogène par exemple, et remettant dans la terre le CO₂.

Un petit instant de philosophie. On note que la transition T1 est brandie souvent comme un épouvantail ; c'est vrai pour les pays en voie de développement, mais ça n'est pas vrai pour les pays industrialisés, parce que pour les pays industrialisés, ça n'est jamais qu'un choc pétrolier un peu irréversible ; au fond, une fois qu'on a avalé sa potion, c'est-à-dire le doublement des prix, on s'habitue très bien. Par contre, les PVD s'habituent mal. Donc, je ne crois pas aux Cassandre qui disent qu'en 2015 le système des pays industrialisés explose. Je crois que même si la transition se produit – ce que je ne sais pas – le système réagira. En revanche, les changements qu'on peut associer au CO₂

sont eux beaucoup plus profonds et c'est pourquoi la transition T2 est la transition majeure du XXI^e siècle. Et elle est obligatoire parce qu'il n'est pas question de se dire que cela regarde nos successeurs – seuls les gens très âgés aujourd'hui peuvent se le dire. Quelqu'un qui a aujourd'hui vingt ans, trente ans, peut être sûr qu'il vivra avec une augmentation de température très importante, et se rendra compte qu'il est vital qu'on arrête. Même si on est stupide au début, on ne le sera pas éternellement, donc nécessairement, cette transition aura lieu. Espérons que ce sera le plus tôt possible.

C'est une transition majeure parce qu'elle oblige à mettre en place une organisation mondiale. Donc c'est l'entrée dans un régime international qui ne sera ni le multilatéralisme complet, ni un système de blocs. Tout le monde en discute : est-ce que ça peut être un système de grands blocs, est-ce que ça peut être un système multilatéral ? Même l'OMC n'est pas suffisante pour répondre, donc il faut inventer quelque chose, c'est tout à fait sûr.

Deuxièmement, la transition T2 impacte beaucoup les transports qui là, n'ont plus le soutien du charbon et du pétrole non conventionnels puisque ils produisent du CO₂ en grandes quantités. Donc c'est aussi un défi technologique et économique extrêmement fort : T2 est bien la transition majeure du XXI^e siècle.

Ma conclusion finale est la suivante. C'est que, que ce soit pour l'une ou pour l'autre des transitions, mais surtout pour celle dont je viens de parler, l'anticipation va jouer un rôle essentiel. On a un peu mal au cœur d'aboutir à cette conclusion, alors qu'on anticipe si peu. Cependant, considérons un argument de poids : les investissements en économie d'énergie ou en énergies renouvelables thermiques se rentabilisent très rapidement après l'une ou l'autre des transitions, c'est tout à fait sûr.

Donc où voulez vous placer vos risques ? L'anticipation me paraît la valeur sûre. Et la même chose est vraie des investissements nucléaires qui, - comme tous les investissements de ce type d'ailleurs - ne sont chers

qu'au début, comme chacun sait.

On peut en dire autant de la réorganisation du secteur des transports et de la logistique, et de l'aménagement du territoire: c'est tout un ensemble qui demandera nécessairement plusieurs générations. Donc là aussi, il y a une prime énorme à ceux qui commenceront assez tôt. Et on voit bien que les pays qui ont commencé tôt en matière d'économie d'énergie et même de réorganisation des transports commencent déjà à toucher certains bénéfices. C'est tout à fait évident. Donc tout ceci plaide évidemment pour une anticipation, qui, elle, est indépendante des scénarios et indépendante des transitions, car ses effets sont vérifiés dans chacune des situations.

Paul CASEAU

Membre de l'Académie des Technologies

Questions/réponses

Dans l'un des scénarios, vous avez choisi T1 et T3 d'abord, la lutte contre l'effet de serre ensuite, mais dans ce cas-là, est-ce que la plupart du pétrole et du charbon et du gaz naturel ne sont pas épuisés, ce qui limite tout naturellement l'émission de CO2 et alors la condition T2 se mettrait en place, entre guillemets, un peu en douceur ?

Eh bien, je crois que c'est le pari du gouvernement américain, ce que vous venez d'exposer. Il y a plusieurs possibilités d'explication à leur refus de ratifier Kyoto. Ou bien ils sont irresponsables ou bien ils pensent uniquement aux élections qui auront lieu dans l'année, ou bien ils pensent ce que vous venez de dire. Laissons leur le bénéfice du doute, et il reste deux possibilités : l'élection, et ce que vous venez de dire. Pendant un certain temps, j'ai pensé que c'était très, très possible. J'en suis moins sûr maintenant. Car, dans ce scénario, on est rattrapé assez vite par deux choses. Premièrement le fait que la transition ait lieu en douceur implique qu'il faut l'organiser (et donc ratifier un accord international), parce que sinon on laisse les plus puissants écraser les plus faibles, et cela devient vraiment l'horreur. Deuxièmement, on risque de laisser le charbon se développer au delà du raisonnable, et d'être rappelé à l'ordre un peu plus vite qu'on ne le pense. D'ailleurs, si vous lisez la presse énergétique, on voit le lobby pétrolier est finalement tellement sûr

que, pour lui, la transition T1 est l'essentiel qu'il dit « OK, oui, je discute » Les gaziers savent que c'est maintenant qu'ils vont faire fortune, et qu'après, après, ça n'est pas éternel : T3 viendra sûrement, mais le plus tard possible. Quant aux charbonniers, c'est le sphinx. Les charbonniers espèrent bien que, jusqu'à la transition T1, on les oubliera et qu'ils diront alors : « Mais moi je peux extraire de l'essence, j'ai des réserves pour des millions d'années, etc. ». Mais un sphinx noir !

Aucune innovation majeure, même concernant toute la production d'énergie et le transport, ne suffirait à réaliser le facteur 4 - voire plus maintenant-puisqu'on continue à augmenter les émissions. Et donc le changement qui en découle de nos comportements, et de notre qualité de vie ne conduit pas seulement à des réductions de consommation mais à une révolution où il faudra aussi renoncer à certains usages, à certains confort qui sont considérés comme nécessaires.

Je crois que vous êtes trop pessimiste, mais en même temps, il y a beaucoup de vrai : de toute façon, il faut toujours renoncer à quelque chose. Si nous avions voulu tous conserver la consommation du début du XIX^e siècle, notre PIB ne serait pas ce qu'il est, c'est certain. Autrement dit, il faut

42

L'énergie
au XXI^{ème}
siècle :
trois
transitions
majeures

toujours s'adapter aux contraintes économiques et la consommation s'adapte, et on dit alors que c'est le progrès. Par contre, vous pouvez parfaitement imaginer des bâtiments avec un « facteur 4 ». Ce n'est pas du tout difficile. Vous pouvez imaginer une industrie assez proche du facteur quatre. Même si vous rencontrez réellement des difficultés avec les transports, le facteur deux pourra se réaliser assez facilement, donc on commence par là. On doit aller très longtemps dans le même sens, on ne peut pas s'arrêter et dire «on l'a fait pendant un moment, ça suffit maintenant». Et d'autre part, c'est un problème mondial, et résoudre un problème mondial, c'est toujours une révolution.

Mais en France, on a un quart de l'émission de chaleur qui vient de la production d'énergie, un quart d'industries, un quart de l'agriculture et un quart de transports. Donc, même si on réduit sur trois de ces points d'un facteur quatre, au global, on n'aura pas un facteur quatre. Donc on ne peut pas s'attaquer à certains points seulement. Il faudra changer son comportement, c'est peut-être envisageable de le faire maintenant, ce qui permet d'économiser davantage.

Oui, je suis d'accord avec les deux points, mais pas tout a fait. Il y a un article d'Henry Prévost dans la revue de l'énergie, la RGE, qui aboutit à une réduction d'un facteur trois d'ici 2030. Je trouve le calcul un

peu optimiste, mais il y arrive à peu près. Et Pierre Radanne, que j'ai déjà cité, se donne comme objectif un facteur quatre d'ici 2050, et il y arrive. Il y a quelques petites acrobaties, des points un peu douteux, mais on se dit « Là, la technologie peut le faire, c'est possible ». Par contre, tout ce que vous venez de dire est évident : pourquoi ne pas déjà commencer une partie des adaptations de comportements que l'on fera de toute façon, ça c'est tout à fait évident ! Mais c'est difficile d'annoncer: « Dans dix ans, le tourisme très bon marché à Bali qu'on décide pour trois jours en regardant Internet, ça sera fini, il y aura toujours Internet et vous pourrez avoir du Bali virtuel mais vous ne pourrez pas aller à Bali ». Quelle sera alors la réaction des gens ? Ce sera de dire ; « on y va tout de suite, puisque de toute façon on est sûr qu'on ne l'aura plus dans quelques années, profitons-en tant qu'il y en a !»

Existe-t-il une réflexion sérieuse et approfondie sur les moyens de réguler la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique, en particulier par l'utilisation éventuelle, pour l'instant utopique, du stockage dans les sols ?

Ceci a été évoqué plusieurs fois, parce que dans les négociations entre pays, ce type de stockage fait partie des choses que l'on peut échanger. La question est «comment vérifier ?» Comment vérifier, parce qu'au fond, vous pouvez vérifier la forêt, mais ce n'est pas suffisant. Le sol, lui, serait

suffisant, mais vous ne pouvez pas le vérifier. Vous ne pouvez pas être sûr que vous avez réellement stocké et les risques de déstockage sont encore plus importants que les possibilités de stockage. Donc le stockage biologique, la séquestration biologique du carbone, il faut la mettre plutôt au rang des inconnues, pour le moment, qu'au rang des manettes sur lesquelles on peut jouer.

On peut jouer un peu marginalement, donner des avantages à des reforestations. Mais il existe d'autres contraintes, et jusqu'ici je n'ai absolument pas parlé du problème des besoins en nourriture, et il se posera. J'ai entendu un scientifique très éloquent dire «vers 2025, on renverse tout ce qu'on a dit jusqu'ici, c'est-à-dire que tout le monde devra se mettre à produire parce qu'on n'est pas sûr de produire assez». Dans ce cas, le problème de l'équilibre de la nourriture (et l'équilibre entre acheteurs et producteurs) peut être profondément modifié. L'utilisation des sols serait donc modifiée, dans un équilibre beaucoup plus tendu qu'aujourd'hui. Toutes ces questions sont, évidemment, importantes, mais le problème qui passe avant, c'est que nous n'en savons strictement pas assez sur les sols. Or, nous savons que les sols sont dominants.

Comment sont fixés les quotas d'émission ?

Dans un système à la Kyoto, cela se passe de la façon suivante. On réunit tous

les pays, on ferme la porte et on ne sort qu'en ayant fixé une répartition de quotas, c'est-à-dire lorsque chaque pays a reçu sa feuille de route (comme on dit maintenant), en devant baisser de 4 %, 8 %, etc. Eventuellement, quand ce pays n'est pas un pays mais un bloc, comme l'Europe, une bulle, il redistribue entre pays, ce qui fait qu'à la fin, le Portugal reçoit un quota de plus 30 % et le Luxembourg de moins 20 %. Après quoi, comme les quotas n'ont pas été établis par Dieu le Père, mais par des gens qui peuvent évidemment se tromper, il faut définir un mécanisme de flexibilité. On appelle mécanique de flexibilité le fait que les gens disent « Moi je peux faire un peu plus que mon quota, un peu mieux, et je vends du quota à qui voudra », c'est comme les échanges de COS (Coefficient d'occupation des sols). Vous savez peut-être comment fonctionnent ces échanges: J'ai tant de coefficient d'occupation des sols, que je n'utilise pas, je le vends à mon voisin qui lui en a besoin d'un peu plus, etc. Et bien là, c'est la même chose si vous voulez, vous vendez du quota que vous n'utilisez pas. A ce moment-là, le prix résulte du marché. Mais vous pouvez le prévoir parce que vous pouvez faire des simulations disant « A tel prix, ça vaut le coup d'arrêter telle, telle, et telle chose et d'en utiliser telle ou telle ou telle autre ». Par exemple, dans le cas d'un producteur d'électricité multi énergie, c'est évident qu'à partir d'un certain prix du CO₂, il arrêtera et il mettra tous ses efforts sur d'autres sources. C'est comme cela que marche le système.

Qui contrôle tout cela ?

C'est un système qui dépend du mécanisme de Kyoto, du traité lui-même. Le traité aura un bras séculier à partir du moment où il sera ratifié, ce qui n'est pas le cas pour le moment, mais le jour où il est ratifié, il aura un bras séculier. Il serait sage que le plus grand nombre de pays ait signé, même s'ils ont signé pour dire qu'ils ne veulent pas diminuer. Il y a des justifications pour que la Chine dise « Je signe mais ma diminution, c'est zéro », et de même qu'on a dit le Portugal a le droit d'augmenter, mais il signe. Et à ce moment-là, le bras séculier, il y a des chances que ce soit l'OMC, l'organisation mondiale du commerce, ou quelque chose d'assez proche. Mais c'est un grand défi de mettre sur pied une organisation mondiale tant qu'il n'y a pas unanimité mondiale dans les stratégies, les objectifs.

Or actuellement, vous avez trois stratégies qui se disputent. La première est une stratégie de conservation domination, c'est celle des Américains. Conservation des acquis, car il faut bien voir que le jour où on dit que le CO₂ coûte deux fois plus cher que le charbon, les mines de charbon ne valent rien ou à peu près plus rien. Donc l'idée, c'est de maintenir le plus longtemps possible les échanges inégaux comme on fait d'habitude, et de faire confiance au progrès technologique. Je pense que la Chine essaiera des choses un petit peu analogues pour les mêmes raisons. L'Europe a une stratégie opposée qui est - tout en essayant

de ne pas enfoncer l'Afrique tout à fait - une stratégie «facteur quatre» qu'elle a annoncé beaucoup trop vite, beaucoup trop refermée sur elle-même et sans y réfléchir. Mais en en supprimant les défauts de la stratégie annoncée, on a quelque chose qui est assez raisonnable. Et puis vous avez la stratégie qui a été poursuivie par les négociateurs, à La Haye, qui était une stratégie « pousse au crime » qui consistait à montrer sa vertu plutôt qu'à résoudre le problème. Vous pouvez toujours utiliser la menace du CO₂, en y ajoutant l'interdiction du nucléaire, et des freins sur les échanges, et vous allez fabriquer un système auquel aucun négociateur ne croira. Le résultat, c'est qu'on n'a rien signé et qu'il ne s'est rien fait. Donc quand vous avez ces trois schémas complètement incompatibles, fabriquer un système mondial devient du travail d'orfèvre.

Est-ce que le projet ITER¹⁰ est un espoir ?

Pas pour moi. Pour m'en tenir à mon schéma de raisonnement, il faut évaluer quand vous voyez arriver un résultat, et quels seront les problèmes à ce moment-là. Autrement dit, il est à mon avis trop tôt pour savoir si c'est vraiment un espoir pour résoudre les questions dont nous débattons. Quel cahier des charges la société, voire l'humanité donnerait à ITER, quel niveau de prix, etc ? Pour le moment, on ne le sait pas. Parce qu'on ne sait pas ce qui se passera en 2100. Nous avons tout le

¹⁰ ITER. Machine de démonstration de la faisabilité d'un générateur utilisant l'énergie de fusion nucléaire.

XXI^e siècle à traverser et nous le traverserons sans ITER. Et nous le traverserons jusqu'en 2070 sans avoir besoin de la quatrième génération nucléaire. La quatrième génération, si elle intervient, interviendra dans le dernier quart, et en attendant il faut vivre.

Ce que je viens de dire n'empêche rien quant à la recherche. Que ce soit la quatrième génération ou que ce soit ITER, - on y croit ou on n'y croit pas, ça, c'est autre

chose -, on doit l'étudier au niveau mondial et non pas au niveau d'un pays et en sachant qu'on a cinquante ans ou soixante ans devant soi. Ce n'est pas une course, on peut prendre les choses calmement. Pour ne l'avoir pas fait, on a raté un certain nombre de projets : il est certain que Super Phénix est un raté parce qu'on a essayé de le faire dans un seul pays et à toute vitesse, donc trop tôt. Il faut maintenant prévoir les choses à un niveau mondial et en se donnant du temps.

46

L'énergie
au XXI^{ème}
siècle :
trois
transitions
majeures