HAL
open science

La recherche controversée d'énergies " propres "

Minh Ha-Duong, Dominique Finon

To cite this version:

Minh Ha-Duong, Dominique Finon. La recherche controversée d'énergies " propres ". Seconde journée de dialogue du cycle "La Transition Énergétique en France, une cartographie des enjeux et des controverses"., Oct 2013, Paris, France. hal-01025894

HAL Id: hal-01025894

https://enpc.hal.science/hal-01025894v1

Submitted on 18 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CIRED
Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement

La Transition Énergétique en France

Une cartographie des enjeux et des controverses

Cycle de journées de dialogue organisé par CIRED (ENPC-CNRS) et PACTE (U. Grenoble-CNRS) avec le soutien de l'INSHS et l'INSIS du CNRS

Actes de la deuxième journée

mardi 22 octobre 2013

La recherche controversée d'énergies « propres »

R&Dialogue
Projet européen FP7 - Research and Civil Society Dialogue towards a low-carbon society

Minh Ha-Duong et Dominique Finon (2014) *La recherche controversée d'énergies « propres » : actes électroniques de la deuxième journée de dialogue CNRS sur la transition énergétique en France*. Publié en ligne par le Cired.

Transcription : Officience.
Production : Minh Ha-Duong, Dominique Finon, Cired (CNRS), Isabelle Billy (Smash).

Table des matières

Introduction.....4

Présentation de la session 1 : La dynamique des controverses publiques.....9

Olivier Godard : Univers controversés : troubles, déplacements, pièges et enjeux.....13

Sezin Topçu : Controverses énergétiques et critique sociale : une approche sociohistorique. .39

Alain Nadaï : La démonstration du CCS dans l'Union européenne : émergence d'une politique et d'une controverse.....46

Francis Chateauraynaud : Alerter, débattre ou mobiliser. Les controverses publiques entre critique régulatrice et critique radicale.....80

Présentation de la session 2 : Fin ou retour des énergies fossiles ?.....95

Bruno Goffé : Les choix offerts par le potentiel français de gaz de schiste.....100

François Renard : Les risques de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schiste.....116

Sylvie Cornot-Gandolphe : L'effet « gaz de schiste » sur les industries et marchés gaziers : des différences marquées entre régions.....133

Minh Ha-Duong : Le CSC à grande échelle, une option réaliste ? État des lieux et des controverses.....148

Sylvie Cornot-Gandolphe : Fin ou retour des énergies fossiles ? Le charbon appuyé par CSC 163

Présentation de la session 3 : Le nucléaire controversé.....178

François Lévêque : Le risque d'accident nucléaire majeur : calcul et perception des probabilités.....184

Dominique Finon : Peut-on maîtriser les coûts privés et sociaux du nucléaire ?.....193

Laurent Joudon : Deux facteurs clés pour l'avenir économique du nucléaire : compétitivité de la filière et régulation des marchés de l'électricité.....207

Thierry Duquesnoy : L'économie des différentes options du nucléaire de long terme.....221

Présentation de la session 4 : Énergies renouvelables, les conditions de réussite d'une utopie mobilisatrice.....242

Sylvie Alexandre : Promesses de la biomasse et conditions d'une mobilisation durable.....245

Cédric Philibert : Quelles limites à l'essor des énergies renouvelables ?.....267

Jan Horst Keppler : Le coût de l'insertion d'ENR intermittentes à grande échelle dans les réseaux.....289

Alain Nadaï et Olivier Labussière : Le paysage éolien, décentralisation énergétique et paysagère.....298

Table ronde finale : Science, technologie et choix publics autour des nouvelles options énergétiques : comment peuvent se dessiner les bonnes orientations ?.....316

Programme de la journée : La recherche controversée d'énergies « propres ».....324

Introduction

Dominique Finon, Minh Ha-Duong et Jean-Charles Hourcade, directeurs de recherche CNRS au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired, UMR 8568).

Peu de voix s'élèvent pour contester que la transition énergétique est une nouvelle « ardente obligation » face aux alertes sur le changement climatique, le « pic » du pétrole, l'accident de Fukushima et les tensions géopolitiques autour de l'accès aux ressources. Mais derrière ce quasi-consensus reste l'idée que, devant l'urgence immédiate de l'emploi et du retour à la croissance, il vaut mieux profiter de « l'aubaine » des gaz de schiste, attendre d'en savoir plus sur les risques climatiques et faire que le nucléaire devienne une technologie intrinsèquement sûre. La délibération publique est rendue difficile par la mise en scène médiatique de controverses scientifiques et éthiques. Les débats tournent souvent à un affrontement répété entre alertes et utopies contradictoires.

Les débats sur les stratégies énergétiques sont largement dominés depuis quarante ans par trois thématiques : les risques de l'énergie nucléaire, l'épuisement des énergies fossiles et les promesses des énergies nouvelles. Il s'agit dans ce volume de reprendre les éléments scientifiques des controverses techniques et économiques autour de ces dossiers, et d'examiner les possibilités d'accords mobilisateurs malgré les divergences de points de vue. Il s'agit aussi de voir comment un changement de sentier technologique suppose des évolutions institutionnelles favorables aux initiatives territoriales, et la nécessité de grands réseaux de transport et de distribution.

Le présent document constitue les actes de la 2e journée de dialogue CNRS sur la transition énergétique, dont les points saillants sont les suivants :

En introduction de la journée, la première session sur la sociologie et l'économie des choix controversés a permis d'éclairer la façon dont les controverses technologiques jouent un rôle certain dans la révélation des risques et des incertitudes des choix d'options, mais sous le risque de manipulation idéologique des arguments techniques et économiques de part et d'autre. Certains y voient un élément positif inhérent aux sociétés démocratiques, d'autres en appellent à la raison dans l'idéalisation des protagonistes, de la pseudo-neutralité des expertises oppositionnelles, de la référence aveugle au principe de précaution. D'autres, enfin, qui s'appuient sur une approche sociohistorique de longues controverses, comme dans le nucléaire, soulignent le tragique de la situation des opposants qui ont choisi d'entrer dans le jeu des processus de décision plus ouverts et

d’amélioration des institutions de contrôle, alors qu’ils trouvent toujours cette technologie inacceptable, mais qu’ils ont contribué à rendre plus acceptable.

La session sur les énergies fossiles (« Fin ou retour des énergies fossiles ? ») a permis de mettre à plat les éléments du dossier des hydrocarbures de roches mères, tant sous l’angle de leur potentiel en France, en Europe et dans le monde que sous celui des risques environnementaux d’exploration et d’exploitation en dépassant l’image de l’inflammation du gaz sortant d’un robinet d’eau qui a marqué tous les esprits. On peut adopter des normes drastiques de protection des nappes phréatiques de limitation des risques de fuite de produits toxiques et les faire appliquer, ce qui n‘est pas toujours le cas aux États-Unis. Quant aux potentiels français et européen, s’il est réel, il est bien moins abondant qu’aux États-Unis et surtout plus cher à exploiter. L’effet d’un déploiement éventuel de l’extraction de gaz de schiste en France n’aura certainement pas les effets bénéfiques actuels sur l’industrie et l’économie américaines. Reste à prendre acte de l’interdiction d’exploration et d’exploitation en France pour des raisons électoralistes. Mais la méconnaissance des ressources réelles entretenues par cette interdiction a sans aucun doute un coût d’opportunité élevé.

La session sur le nucléaire controversé a traité de plusieurs questions-clés en se situant délibérément hors du dilemme éthique conduisant à rejeter le nucléaire comme inacceptable pour pouvoir débattre des risques. On a donc examiné les conditions qui le rendraient plus acceptable. Le risque d’accident nucléaire est-il mesurable après Fukushima ? Si oui, comment s’en prémunir un peu plus sur les réacteurs existants, comme sur les nouveaux réacteurs ? L’internalisation plus complète des coûts et des risques du nucléaire met-elle en question l’économicité du nucléaire ? La probabilité d’accidents nucléaires estimés à partir des accidents et incidents majeurs passés et dans des contextes de régulation de la sûreté très laxiste (Japon, URSS) doit être estimée à des niveaux bien supérieurs à ce qu’ils étaient avant Fukushima. Ceci a conduit à observer que la gouvernance du contrôle de la sûreté est le point-clé non seulement de la pérennité du nucléaire en tant que technologie acceptable, mais également de son économicité.

En effet l’apprentissage du nucléaire en matière de sûreté s’est fait à coup d’accidents majeurs qui ont entraîné sa complexification, mais cette complexification atteint une asymptote. De ce fait, les coûts très élevés actuels pour les premiers exemplaires des réacteurs Gen. III/III+ qui sont liés à cette complexification et au réapprentissage des constructeurs devraient ensuite baisser. Les coûts complets du nouveau nucléaire devraient se situer au niveau des coûts des centrales à gaz et à un niveau plus bas que celui des ENR matures, même avec une prise en compte plus large des externalités négatives (gestion des déchets, incertitude sur les coûts de démantèlement, assurance).

D’autres conditions d’économicité du nucléaire ont été soulignées : encadrement de nouveaux investissements par des contrats de long terme à prix fixes, qui conduit à une baisse du coût du capital ; stabilité règlementaire ; et, bien sûr, le renforcement des autorités de sûreté nucléaire dans tous les pays pour limiter un peu plus le risque de nouvel accident qui mettrait en cause un peu son acceptabilité. Sur le futur du nucléaire de très long terme sur lequel le débat s’est ensuite déplacé, les avis sont très partagés entre ceux qui ne voient dans le nucléaire qu’une solution au milieu de l’éventail de solutions et ceux qui conservent la croyance selon laquelle le nucléaire ne peut qu’être que la solution dominante et pérenne. En conséquence, il faudrait passer à une 4e génération de réacteurs de type surgénérateur du fait des limites des ressources d’uranium. Ceci est contesté par les premiers dès lors que l’on accepte l’idée que le développement du nucléaire ne prendra jamais une ampleur majeure au plan mondial. Pour autant, les irréversibilités du nucléaire ont été créées et il faut leur faire face. Une sortie du nucléaire de certains pays au bénéfice du tout ENR chez eux ne les défausse pas de la gestion de l’ensemble de leurs déchets, alors même que ce choix ne dissuade en rien les pays émergents d’y renoncer par son exemplarité.

Dans la session sur les « énergies renouvelables, les conditions d’une réussite d’une utopie mobilisatrice », les deux questions de fond étaient : quelles sont les limites techniques qui contraindraient l’option tout ENR ? Où se situent les limites économiques d’une telle option dans les domaines de la biomasse et des ENR électriques ? Les contraintes au développement de la ressource bois-énergie, ou celles des biocarburants, ont pu être clairement identifiées (épuisement des sols, contraintes économiques pour le premier, concurrence d’usage des cultures alimentaires, usage des sols pour les seconds). Les solutions pour faciliter le développement de la filière bois réside dans une meilleure organisation foresto-industrielle d’un côté et dans le progrès technique avec la mise au point de carburants de 3e génération de l’autre côté. Dans le domaine électrique, les débats n’ont pas pu être menés dans la sérénité tant le parti pris idéologique et les croyances de certains ont empêché une mise à plat sereine des obstacles et des coûts au développement à très grande échelle de ces énergies. Selon eux, on devrait assister à un changement naturel et indolore de paradigme énergétique. Mais les perspectives de substitution complète des ENR aux productions par combustibles fossiles ou nucléaires qui ont été tracées ne cherchaient à prendre en compte ni le coût des politiques de « demand pull » (obligation d’achat à des tarifs élevés) qui permettraient le changement de paradigme électrique, ni les coûts associés de modernisation et renforcement des réseaux électriques en transport, ni les coûts importants de système (rééquilibrage, back up, réserves de pointe) à partir d’un seuil de 20-30 % de capacité intermittente.

La table ronde finale sur « les choix de politique technologique et énergétique en contexte d’incertitude et de controverse » avait pour but de faire ressortir les critères pouvant guider les choix de politique énergétique et d’innovations dans un contexte où le futur

technologique ne se dessine pas clairement, où les options sont controversées. Certains ont rappelé les nombreux désaccords entre parties lors du DNTE, en soulignant que l'expertise de la technocratie publique en avait été exclue sous les pressions politiques alors qu'elle aurait pu amener des éléments de réflexion moins idéologisés. D'autres ont ré-évoqué le changement salvateur de paradigme dans une logique de tout ou rien où fossiles et nucléaire seraient envoyés rapidement aux oubliettes. Ceci justifierait la stabilité des politiques poussant les technologies salvatrices, quel qu'en soit l'intérêt économique. Mais d'autres ont attiré l'attention sur l'effet profondément déstabilisateur de leur développement « hors marché » à grande échelle sur les autres options sans que le bénéfice social d'un tel développement (notamment les tonnes de CO2 évitées) ne soit pas tel qu'il compense ses surcoûts.

Face à l'éventail d'options, d'autres ont considéré que l'on ne doit pas opposer telle ou telle option. Il faudrait raisonner en termes de cohabitation pour aménager des interfaces entre les systèmes nouveaux prometteurs et les systèmes anciens encore efficaces économiquement. Il faudrait se situer dans une perspective permanente d'ouverture des futurs en évitant de créer des irréversibilités comme ont pu le faire, en leur temps, les promoteurs du nucléaire. Il faut se fixer un cap en se donnant un portefeuille d'options et se définir quelques priorités qu'il faudrait ajuster régulièrement pour ne pas créer d'irréversibilité et limiter les coûts si les dépenses sont trop importantes, comme on a pu le faire pour l'option photovoltaïque.

Du point de vue de la sociologie, il faut voir les controverses comme des aiguillons pour améliorer la compréhension des enjeux des développements techniques et les aménités ou désaménités qu'ils vont entraîner (avec des temporalités très différentes), pour améliorer aussi les technologies concernées et le système de règlementations qui sont autour. La confrontation des porte-parole des parties prenantes, celle des expertises se réclamant de légitimités diverses se font sur des scènes forcément imparfaites qu'il faut aménager. Les promoteurs d'une option technologique sont alors exposés au risque que le conflit conduise, in fine, au rejet de cette option, comme on le voit en France avec le gaz de schiste (ou les OGM) et en Allemagne avec le nucléaire.

Session 1 : « La dynamique des controverses publiques »

Présentation de la session 1 : « La dynamique des controverses publiques », par Josquin Debaz, p. 9.

« Univers controversés : troubles, déplacements, pièges et enjeux », par Olivier Godard, p. 13

« Controverses énergétiques et critique sociale : une approche sociohistorique », par Sezin Topçu, p. 39.

« La démonstration du CCS dans l'Union européenne : émergence d'une politique et d'une controverse », par Alain Nadaï, p. 46.

« Alerter, débattre ou mobiliser. Les controverses publiques entre critique régulatrice et critique radicale », par Francis Chateauraynaud, p. 80.

Présentation de la session 1 : La dynamique des controverses publiques

Par Josquin Debaz.

L'intérêt d'aborder la « transition énergétique » au travers des controverses se présente sous de multiples angles. Si l'on peut débattre de la nécessité ou de l'inexorabilité de la « transition énergétique » pour elle-même, cette thématique fait converger une très large série de débats concernant les différentes formes d'énergie auxquelles nos sociétés ont recours ainsi que la répartition de leurs usages. À chacune de ces formes s'associe une ou plusieurs controverses : le nucléaire a une longue histoire d'opposition politique, la levée de bouclier contre les gaz de schiste a provoqué une forme de moratoire en France, éoliennes et hydroliennes ne s'installent pas sans heurts, le soutien au solaire est sujet à un questionnement économique, et les utilisations de la biomasse sont contestées de maintes parts… La problématique des stocks utilisables en ressources carbonées fossiles n'a de cesse de rebondir, entre ceux qui soutiennent que la ressource s'épuise ou que le coût d'accès tend à devenir prohibitif, et ceux qui promettent sans cesse de nouveaux gisements ou de nouvelles manières d'exploiter à moindre frais ce qui était jusque là hors de portée technique ou d'intérêt économique. À l'honneur des débats nationaux sur l'énergie ou des négociations internationales sur le climat, les énergies « propres » demeurent inscrites dans un jeu de forces où s'arment dans la bataille tant des intérêts financiers que des arguments scientifiques. Il était donc nécessaire de présenter durant cette journée sur la transition un point sur les controverses en général. Pour ce faire, quatre interventions ont été proposées lors de la session « La dynamique des controverses » : Olivier Godard a exposé ses réflexions autour des « univers controversés », Sezin Topçu est revenue sur son étude de sociologie historique des controverses du nucléaire civil, Alain Nadaï a présenté les travaux menés avec Rebeca Neri O'Neill sur la construction de « sites » de controverse dans le cadre du stockage de CO_2 et Francis Chateauraynaud a montré comment sa balistique sociologique permet de décrire la dynamique « rebondissante » des controverses.

Olivier Godard prend appui sur la distinction entre « univers stables » et « univers controversés » qu'il a théorisée dans les années 1990 avec Jean-Charles Hourcade et Jean-Michel Salles pour pallier les manques du modèle standard en économie de l'environnement. Depuis l'époque de cette conceptualisation, la montée en puissance des contestations remettant en cause l'expertise scientifique a progressivement constitué un nouvel habitus instituant progressivement la contre-démocratie comme un contre-pouvoir. Il devient, selon lui, difficile de distinguer ce qui relève de l'intérêt général, car la confusion des

sources des légitimités rend floue la représentativité des acteurs impliqués. Dès lors, l'importance de la décision prend le pas sur la rationalité, la constante présomption d'irréversibilité créant une atmosphère systématique d'urgence, et l'étude de l'efficacité économique des solutions n'intéresse plus guère que les économistes. De plus, plongée durablement dans un univers controversé, la perception des problèmes est constamment médiatisée, ce a qui pour effet de niveler la hiérarchie des valeurs. À ces travers s'ajoutent deux autres dérives, d'une part une présence constante de « tiers absents » dans le débat sans réel arbitrage sur qui est légitime à les représenter (les générations futures, les espèces protégées, etc.), et d'autre part, une connaissance scientifique durablement controversée et instable. On arrive en conséquence à une société qui ne sort plus de ces univers controversés : une constante imbrication des enjeux de l'action et de la connaissance, des scientifiques qui se font activistes, des stratégies qui endogénéisent l'incertitude, l'usage rhétorique de pseudo-controverses…

Face à cette continuelle compétition pour les représentations du monde, la résolution des controverses se joue sur d'autres scènes que le scientifique et revient souvent à redéfinir le problème, tout en maintenant l'argumentation à un niveau superficiel : critique des conflits d'intérêts plutôt que du fond, critique de l'expertise scientifique comme critique politique. Dès lors, les médias grands publics peuvent prétendre constituer l'arène du débat, l'indépendance est évaluée comme une compétence et l'action publique constitue une preuve *a posteriori*. Dans cette perspective qui privilégie la décision, le piège serait de viser l'acceptabilité et le consensus par le biais de l'ouverture de l'expertise aux publics. Olivier Godard rappelle que c'est parce qu'on ne peut dénier aux acteurs de mener une action stratégique qu'il faut assurer la rigueur des procédures et respecter la distinction des ordres et des règles. En conclusion, il plaide pour une approche visant à préserver la collectivité de deux types d'irréversibilité : celle des dommages sanitaires ou environnementaux qu'il oppose à celle des engagements dans des solutions technologiquement ou organisationnellement inférieures.

Dans son analyse de sociologie historique du nucléaire controversé, Sezin Topçu cherche une alternative aux approches centrées sur l'acceptabilité, et pour ce faire elle prend appui sur plusieurs partis pris méthodologiques : d'une part, il existe une périodisation historique des formes d'action, dès lors il est nécessaire de s'intéresser aux critiques dans leur pluralité et leurs trajectoires ; de l'autre, critiques et institutions ne sont pas autonomes mais se coconstruisent dans la durée. Apparu précocement dans cette histoire, le cadrage démocratique de la question du nucléaire avait généralisé les critiques dans un affrontement total dont le modèle technocratique était sorti gagnant dans les années 1970 et 1980, ramenant le cadre du débat à ses dimensions techniques. Après cette victoire de la technocratie, au cours des années 1990, certains opposants sont revenus à la critique démocratique, par exemple avec la question postcoloniale de l'exploitation de l'uranium au Niger, sans toutefois atteindre la même

visibilité que durant les années 1970. L'État s'interrogeait alors essentiellement sur les modalités de la gestion de la sûreté du nucléaire civil tandis que les opposants se concentraient sur la problématique des risques sanitaires et environnementaux, ainsi pour répondre aux demandes de transparence de ces derniers, s'expérimentaient des formes d'ouverture aux partis prenantes. Deux modèles ont alors été posés : celui d'une expertise pluraliste et celui de la coexpertise, mais ils s'adressaient à un cercle très réduit d'individus (il y eu rapidement pénurie des parties prenantes). Ils s'inscrivaient en fait dans un enjeu marginal centré sur la radioprotection, qui ne devait en aucun cas englober les questions de sûreté. Après la conférence de Rio sur le climat qui tendait à trouver une nouvelle légitimité au nucléaire, les mises en causes publiques du nucléaire civil se sont multipliées : débat avorté sur l'EPR, mise à l'écart des questions de sûreté nucléaire au Grenelle de l'environnement, mobilisation contre le transport de matières fissibles et l'enfouissement des déchets… Après la catastrophe de Fukushima, le cadrage global de la question est à nouveau effacé avec une contestation qui semble vouloir rattraper un retard sur l'Allemagne. Pour Sezin Topçu, la question rend désormais nécessaire une innovation des formes de consultation.

Alain Nadaï présente l'évolution de la gouvernance européenne du CCS (capture et de stockage du dioxyde de carbone) au travers d'une analyse de la politique de démonstration par site. Le « site », catégorie problématisée, est tout à la fois compris dans son aspect concret et comme notion textuelle. Selon la définition de Claude Rosenthal, la démonstration est une opération de construction d'un accord, souvent instable, à propos d'un objet. L'analyse portée sur ce processus social de cadrage met en évidence un « *political sight* » qui rend progressivement publics les impacts d'un projet. En poursuivant les travaux d'Andrew Barry, les auteurs montrent que la spatialité des projets de démonstrateurs CCS permettant les liaisons et les mises en réseau, l'interrelation du « *politics* » et du « *political* », c'est sur ce site qu'émerge le « *political sight* » qui met en perspective le mode de gouvernement européen. L'analyse présentée montre comment en fonction de leur histoire, les différents cas étudiés peuvent être rangés sous trois catégories, celle où domine le « *political* » (la contestation entraîne une reconsidération des politiques du CCS), celle où domine la « *policy* » (les risques ont pu être cadrés comme relevant d'un traitement par la procédure et non par le débat), enfin celle des sites « laboratoires » (qui constituent un simple référent industriel). In fine, les sites de démonstration, qui ne s'assument pas en tant que construction politique, montrent que la gouvernance technologique européenne issue du traité de Lisbonne a mis l'industrie au cœur de sa stratégie sans s'équiper des outils de réflexivité et de mise en politique à la hauteur des enjeux.

L'intervention de Francis Chateauraynaud porte tout d'abord l'attention sur la caractéristique essentiellement non linéaire des trajectoires des controverses. Celles-ci subissent de fréquents rebonds, surgissements et/ou fédérations des causes qui sont susceptibles de venir perturber

analyses, modèles et procédures chez ceux qui tentent de les saisir. Se situant entre la discussion et la dispute (Marcello Dascal), la controverse reste un processus instable par excellence par lequel les acteurs apprennent et revoient constamment leurs scénarisations du futur et modifient en conséquence les espaces de calcul dans lesquels ils les développent. Le modèle théorique dynamique proposé par les travaux de Chateauraynaud, la balistique sociologique, prend en compte cette instabilité tout autant que celle du statut changeant des objets de la controverse eux-mêmes. Elle implique de distinguer trois formes capables de produire des *tipping points* : la stratégie, l'événement de rupture non programmé et la convergence graduelle et discrète de processus dans les « milieux en interaction ». Pour passer à une analyse interne aux controverses sont ensuite décrites quatre formes d'expertise en concurrence dans les normes de gouvernance : la figure opposant expertise et contre-expertise (celle du tribunal qui tranche) ; l'expertise collective qui vise le consensus (avec le problème constant de définition de ce collectif) ; l'expertise distribuée (par une production continue et non coordonnée d'acteurs multiples qui produit standardisation et normalisation) ; et enfin l'expertise participative (qui fait le plus débat en ce moment). Enfin, selon Chateauraynaud, il n'est pas de controverse sans controverse sur le futur, ce qui l'amène à distinguer deux formes de conséquentialisme : l'un borné, capable de mettre en calcul les conséquences d'une décision ou d'une action, et l'autre ouvert et évolutif, dans lequel les acteurs découvrent les conséquences au fur et à mesure et qui rappelle qu'on ne peut jamais en clore définitivement la liste.

Au final, les débats qui prennent corps autour de la transition énergétique peuvent être compris dans une longue dynamique de dispute sur ses thématiques et plus largement sur les objets scientifiques et techniques qui interagissent avec la société, et dont l'histoire même pèse sur les cadres politiques, juridiques et épistémiques de leurs traitements, tout autant qu'elle configure les arènes de leur expression. Dans une société où l'on ne peut ignorer le dissensus et l'agir stratégique, l'enjeu est de fonder, de maintenir et de réinventer sans cesse les règles qui permettent de garder ouverte une discussion où germent et se développent les solutions.

Olivier Godard : Univers controversés : troubles, déplacements, pièges et enjeux

Olivier Godard est directeur de recherche au CNRS ; il est rattaché au Laboratoire d'économétrie de l'École Polytechnique de Paris.

Cycle "La Transition Énergétique en France, une cartographie des enjeux et des controverses"

La recherche controversée d'énergies propres

Univers controversés:

troubles, déplacements, pièges et enjeux

Olivier Godard
Cnrs et École polytechnique

Paris, CNRS, 22 octobre 2013

INTRODUCTION

- **Des univers stabilisés aux univers controversés**
- **Un couple de concepts construit il y a 2 décennies en référence aux présupposés du modèle standard de l'économie de l'environnement (J.-C. Hourcade, J.-M. Salles, O. Godard)**
- **Depuis 1990, une prolifération d'actions de contestation, voire de subversion, ayant pour arrière-fond la remise en cause de l'expertise scientifique et/ou technique organisée dans un cadre public au nom d'un savoir « autre »**
- **La contestation comme nouvel « habitus » d'une « contre-démocratie » devenant « anti-pouvoir »**

Olivier Godard

Olivier Godard : Il m'a été demandé d'introduire cette journée par une présentation qui ne serait pas centrée sur les enjeux énergétiques mais qui caractériserait ce que nous avions appelé « les univers controversés ». Ce concept se définit par opposition, terme à terme, avec « les univers stabilisés » qui forment le repère de base de l'analyse économique. Cette construction intellectuelle remonte à plus de vingt-cinq ans et fut l'œuvre d'un travail conjoint avec Jean-Michel Salles et Jean-Charles Hourcade. À mes yeux, tout ce qui s'est passé depuis lors en a accru la pertinence.

Nous avons en effet assisté à une prolifération d'actions de contestation et de subversion de l'action publique ou des institutions qui la portait, avec pour arrière-plan la remise en cause de l'expertise scientifique ou technique organisée dans un cadre public, et ce au nom d'un « autre » savoir ou d'une « indépendance » revendiquée comme un blanc-seing universel (pour la compétence, pour l'absence de conflits d'intérêts, pour la défense de l'intérêt général, etc.). Évidemment le concept « d'univers controversé » va au-delà du simple constat de l'existence de controverses, qu'il s'agisse de controverses dans le milieu scientifique ou de controverses lancées par des intellectuels sur des sujets de société. C'est bien « l'univers controversé » qui nous occupait, qu'il s'agissait de décrire et dont il s'agissait de rendre compte.

Avant d'en rendre compte, quelques mots sur le contexte contemporain de la société française. En fait, je vous propose comme fil directeur l'idée que les phénomènes de contestation sont devenus

un nouvel « habitus », au sens de Bourdieu, d'une contre-démocratie se transformant en anti-pouvoir institué. Empiriquement, à chaque fois que des initiatives publiques sont prises, une contestation se lève sans attendre, non seulement pour contester l'action ou l'initiative prise, mais aussi, plus profondément, pour contester la légitimité de celui qui prend cette action ou cette initiative au motif qu'il y aurait là un effet de domination, un effet de pouvoir.

INTRODUCTION

- **Les valeurs en souffrance:**
  - **Intérêt général**
  - **Légitimité**
  - **Représentation / adhésion**
  - **Objectivité**
  - **Hiérarchies de valeur**
  - **Efficacité économique**
- **Que reste-t-il de l'espoir de ramener les processus constitutifs de ces univers controversés dans l'espace d'une raison publique partagée ?**

Olivier Godard

Notre société a mal au pouvoir et mal à la représentation. Un certain nombre de valeurs sont désormais en souffrance, des valeurs dont des économistes élevés, comme moi il y a plus de quarante ans, dans une certaine idée de la rationalité publique, constatent avec effroi l'érosion, voire la disparition non seulement accidentelle mais de principe.

D'abord, l'intérêt général aujourd'hui ne se distingue plus nettement des intérêts privés et nombre d'intérêts privés veulent se faire prendre pour des intérêts collectifs, voire pour l'intérêt général supérieur.

À ce trouble affectant cette idée d'intérêt général s'ajoute un trouble général de la légitimité dont on ne sait plus à quelles sources valides la rapporter.

La représentation est en crise par les deux bouts, à la fois celui de la représentation scientifique et celui de la représentation politique : plus personne ne s'identifie à ses gouvernants, à ses représentants ; on vote pour eux, de moins en moins, et tout de suite après la défiance s'installe.

Et l'objectivité, qu'en reste-t-il ? C'était le cœur ou le concept-clé de la rationalité publique d'après le modèle d'État rationnel-légal de Max Weber. Pas seulement l'objectivité scientifique, mais aussi l'objectivité du bien commun que les citoyens peuvent discerner et que les dirigeants mettent en œuvre d'une façon à laquelle les citoyens adhèrent. Aujourd'hui, l'objectivité a été très largement oubliée comme repère par la théorie de la décision qui ne voit plus que la subjectivité des croyances derrière les probabilités quels que soient les contextes.

Mais elle est aussi délaissée comme référent essentiel des expertises menées dans un cadre public par nombre d’acteurs qui entendent participer ou se prononcer sur ces expertises.

Les hiérarchies de valeurs sont en souffrance puisque toutes les paroles sont nivelées ou évaluées selon des critères étrangers à la sphère dont elles émanent, tout particulièrement sous l’effet du grand mélange auquel procèdent les shows médiatiques. Au nom de la symétrie des prises de parole, faussaires et authentiques scientifiques sont traités à égalité.

Enfin, l'efficacité économique, c'était un leitmotiv de mon enseignement quand j'enseignais encore, n'intéresse que les économistes, mais aucun des autres acteurs concourant à la décision publique, y compris les différents acteurs publics dans les ministères : chacun poursuit des fins plus étroites et les enjeux distributifs écrasent tout. Ce désintérêt pour l’efficacité économique des dispositifs collectifs en devient un obstacle dans la durée, lorsqu’il s'agit de promouvoir des politiques de développement durable, car l’inefficacité est mangeuse de ressources.

La question qui nous est posée est désormais de savoir si l’on peut escompter ramener les processus constitutifs des univers controversés dans l'espace d'une raison publique partagée. La question me paraît complètement ouverte. Nous testerons aujourd'hui à propos de l'énergie notre capacité à trouver des accords, mais nous sommes dans une enceinte limitée. Sur quels éléments du monde, de la réalité, pouvons-nous nous accorder ? Avons-nous en partage ce qu’on pourrait désigner comme un monde commun ? Les expériences précédentes du débat public sur l’énergie en France n'ont pas été concluantes à cet égard.

Après cette entrée en matière, la suite de mon propos sera organisée en deux temps. Le premier reviendra sur la caractérisation des univers controversés et le second évoquera les troubles, déplacements et pièges auxquels il faudrait prendre garde lorsqu’on est plongé dans ce genre de contexte.

1. Univers stabilisés et univers controversés

1.1 Quatre variables

- **Mode de perception des problèmes**: **directe par les agents vs médiatisation par des institutions et acteurs sociaux**
- **Présence des agents**: **Tous présents** sur la scène vs des **tiers absents** dont les intérêts importent.
- **État des connaissances:** suffisamment **abouties pour soutenir des conclusions et imputer des dommages vs partielles et controversées**; plusieurs théories en concurrence ➔ plusieurs mondes possibles et plusieurs « coupables » potentiels
- **La dynamique**: **réversibilité des phénomènes et actions vs présomption d'irréversibilité** ➔ sentiment d'**urgence et nécessité** d'**agir avant de (tout) savoir**

Olivier Godard

Univers stabilisés, univers controversés, ce sont deux idéaux-types qui s'opposent de manière simple sur quatre caractéristiques :

- a) Le mode de perception des problèmes, soit qu'elle est directe et exercée par les agents qui sont les mieux placés pour agir de façon appropriée (u. stabilisés), soit qu'elle est médiatisée et élaborée par un ensemble d'agents intermédiaires, avant de parvenir aux agents qui ont les plus à en connaître (u. controversés), ce qui dans ce dernier cas, relativise fortement la pertinence de la sollicitation de ces agents finaux comme source du jugement collectif. Ce premier trait s'inscrit déjà en faux contre une hypothèse commune de l'économie de l'environnement confrontée aux problèmes des externalités et des biens collectifs, hypothèse selon laquelle les agents décentralisés sont les mieux placés pour savoir que faire pour ce qui les concerne ; ce peut être vrai pour la consommation privée, ce n'est plus le cas pour les enjeux collectifs comme les enjeux environnementaux.
- b) Deuxième variable, l'identification des agents pertinents : il y a des situations où l'on suppose que tous les agents pertinents sont présents ici et maintenant, si bien que le problème peut être clôturé sur leurs interactions et leurs décisions ; dans d'autres cas, une partie au moins des intéressés se réfèrent aux intérêts de tiers absents au nom desquels il faudrait faire un certain nombre de choses ou ne

pas faire un certain nombre de choses. Cette situation soulève un problème spécifique de représentation des intérêts de ces tiers absents. Les deux situations ne sont pas assimilables.

- c) Troisième variable, l'état des connaissances : soit les connaissances sont suffisamment stabilisées pour soutenir des conclusions précises, fermes dans leurs implications opérationnelles, notamment pour imputer des dommages à leurs « auteurs » ; soit l'état des connaissances ne permet pas de faire cela du fait des incertitudes et controverses pendantes. Dans ce dernier cas, plusieurs mondes sont possibles en fonction des hypothèses qui restent en balance et pour lesquelles la science n'a pas encore pu produire d'arbitrages fiables. Qu'on pense par exemple à l'alternative entre un monde où le CO_2 accumulé engendre un changement climatique majeur pour des millénaires et un monde dans lequel le CO_2 ne joue qu'un rôle insignifiant. Dans le premier cas (u. stabilisés), il peut y avoir des controverses entre économistes sur la meilleure manière d'instrumenter l'action correctrice des externalités (marchés de quotas, taxes, réglementations, etc.), mais le problème réside dans l'instrumentation pas dans l'existence et les contours du problème de base à résoudre.
- d) La quatrième variable concerne la dynamique du problème, selon qu'on se trouve dans un monde essentiellement réversible ou bien un monde sur lequel pèsent de fortes présomptions d'irréversibilité.

1. Univers stabilisés et univers controversés

- **1.2. Univers stabilisés: le modèle économique de base**
  - **Les agents décentralisés sont les mieux informés et les meilleurs juges de ce qui les concerne**
  - **Tous les agents pertinents sont présents sur la scène (le marché) ou adéquatement représentés**
  - **Les connaissances disponibles suffisent à déterminer rationnellement l'action publique** et à **imputer des dommages**: **connaissance commune**
  - **Les phénomènes sont essentiellement réversibles; le marché comme institution de la réversibilité des possessions** et **la consommation comme répétition d'actes et de choix sans lien direct**

Olivier Godard

Dans le modèle économique de référence, on a affaire à un univers stabilisé sur ces quatre variables : a) les agents décentralisés sont les mieux informés, les meilleurs juges ; il faut donc se fier à leurs préférences et à leurs jugements ; b) tous les agents pertinents sont présents et c'est le marché qui arbitre entre leurs prétentions, ou bien ils sont tous adéquatement représentés par un principe d'identité : les générations futures, elles seront comme nous, elles auront les mêmes préférences, puisque ces préférences reflètent les invariants de la nature humaine ; donc on n'a pas à s'en soucier particulièrement ; c) les connaissances sont suffisantes pour disposer d'une représentation commune des problèmes et pour fonder rationnellement l'action publique de correction des défaillances de marché ; les économistes arrivent en aval à propos des enjeux d'instrumentation ; d) l'essentiel des phénomènes que les économistes considèrent autour de la figure du marché, ce sont des phénomènes réversibles, puisque le marché est l'institution par excellence de la réversibilité des possessions : j'ai quelque chose, ça ne m'intéresse plus, je l'échange, je le cède à quelqu'un d'autre et j'achète quelque chose d'autre ; tout se remplace, il suffit de payer le prix. Donc le marché clôt l'espace des choix de manière remarquable ; la consommation est vécue comme une succession d'actes séparés et distincts à chaque fois renouvelés et donc sans lien entre eux.

Certes, ce modèle de base n'est pas compris par les économistes comme le reflet réaliste des situations imparfaites auxquelles ils sont confrontés, mais bien comme la référence à partir de laquelle les

raisonnements de base sont construits. C’est ainsi que les recherches plus sophistiquées lèvent l’une ou l’autre de ces hypothèses pour voir ce que devient le modèle, par exemple en remplaçant des valeurs certaines en prévision parfaite par des valeurs probabilistes associées à des anticipations rationnelles. Même l’irréversibilité n’a pas d’autre effet que de moduler des profits comparables à d’autres profits.

1. Univers stabilisés et univers controversés

- **1.3. Univers controversés**
  - **La perception des problèmes est médiatisée par la science, les médias, les ONG, et la parole des gouvernants: enjeu de la crédibilité de l'information et de la confiance accordée aux locuteurs**
  - **Affirmation de l'importance de tiers absents dont les intérêts importent. Quelle représentation leur donner?**
  - **Des connaissances durablement partielles et controversées; plusieurs mondes possibles, désignant des «coupables» différents; instabilité**
  - **La dynamique? Présomption d'irréversibilité ➔ sentiment d'urgence et nécessité d'agir avant de (tout) savoir défendue par certains acteurs et combattue par d'autres.**

Olivier Godard

En univers controversés, la perception des problèmes est médiatisée par une construction scientifique, administrative, politique, médiatique préalable. Ainsi la couche d'ozone, le climat ne sont pas des choses dont les consommateurs de base ont une perception immédiate ou alors elle est complètement biaisée par un point de vue ultra-local. La perception individuelle n'est plus vraiment pertinente pour orienter l'action collective dans ce genre de contexte.

Ensuite, on doit noter la référence centrale à des tiers absents, par exemple les fameuses générations futures au nom desquelles toutes les politiques de développement durable devraient être menées, ou les intérêts des autres pays ou encore, dans une perspective plus radicale, ceux des espèces vivantes non humaines mais capables de sensibilité (ce n'est pas une affaire nouvelle, cela remonte aux fondateurs de l'utilitarisme Bentham et Stuart Mill). Tous les êtres souffrants devraient être représentés dans la fonction d'utilité collective et pas seulement les humains. Mais évidemment ces non-humains ne sont pas en état de participer directement aux débats publics. Leur prise en compte souligne un trait commun à tous les tiers absents : le besoin d'être représentés. Cela engendre une scène duale entre des agents qui parlent pour eux-mêmes et des agents qui prétendent aussi parler pour le compte d'autrui. Cet autrui n'étant pas là, il est difficile de trouver une procédure de validation de l'authenticité des rôles de porte-parole des tiers absents pour lesquels des candidats multiples opposent leurs paroles. L'interrogation pointe : ces gens parlent-ils vraiment au nom des tiers absents ou n'expriment-ils pas de façon déguisée leurs propres intérêts ?

Les connaissances sont durablement controversées. Empiriquement, c'est le cas de beaucoup des grands problèmes environnementaux, comme l’érosion de la biodiversité ou l’incidence sanitaire des facteurs environnementaux. Ainsi la question climatique fait-elle l’objet de manière récurrente depuis vingt ans d’un mix de controverses d’allure scientifique et de polémiques sociales, où la mise en cause de travaux scientifiques ne vise pas un progrès vers la vérité, mais une action de persuasion politique en vue d’obtenir un effet de délégitimation des politiques climatiques pourtant si peu ambitieuses. Les effets de miroir et d’interpénétration entre scène scientifique et scène sociopolitique engendrent à la fois une instabilité des représentations et une fuite devant l'objectivité recherchée par la science.

Enfin, s’agissant de la dynamique existe une présomption d'irréversibilité, même si l’on ne sait pas forcément où se trouve le point de basculement, le « tipping point » par exemple en matière de climat. Dans ce dernier cas, s’impose un certain sentiment d'urgence à agir avant qu'il ne soit trop tard et donc avant de tout savoir. Cette situation d’inversion (agir avant de savoir en pleine connaissance de cause) soulève la question des niveaux de savoir requis pour accepter ou ne pas accepter de s'engager dans l'action et celle de la détermination du contenu de l’action. Le principe de précaution a été inventé pour encadrer l’action dans ce contexte, mais en pratique les décideurs publics peinent à s’en tenir à la doctrine qu’ils ont eux-mêmes voulu voir se développer.

2. Troubles

- **Imbrication des enjeux de l'action et de ceux de la connaissance: des acteurs économiques, politiques ou associatifs (entreprises, gouvernements, ONG) cherchent à:**
  - **maîtriser et arranger la présentation publique des résultats scientifiques, notamment en se présentant eux-mêmes comme des porte-parole de la « vraie science »**
  - **peser sur le développement scientifique lui-même en instrumentant les financements de la recherche et le développement des controverses**
- **Tandis que des scientifiques se font acteurs socio-politiques (lanceur d'alertes, activistes)**
- **L'incertitude scientifique devient endogène aux stratégies des acteurs qui œuvrent**
  - **soit à l'engendrer et l'entretenir**
  - **soit à l'écarter**

Olivier Godard

Ces univers controversés troublent les distinctions des concepts et des ordres qui soutenaient jusqu'alors la rationalité publique. Un trouble majeur résulte de l'imbrication des enjeux de l'action et de ceux de la connaissance. Le schéma classique de la rationalité avec la connaissance d'abord, l'action ensuite, qui requiert une connaissance stabilisée et partagée, est bouleversé. Les deux scènes sont imbriquées.

D'un côté les acteurs économiques et sociaux cherchent à maîtriser et à arranger la présentation des résultats scientifiques dans le sens de leurs intérêts ou de leurs projets idéologiques en se présentant comme les porte-parole de la vraie science. Certains, parmi ceux qui ont les moyens financiers, cherchent même à peser sur le développement scientifique à travers les financements de programmes et d'organisations alibis dans le but de développer et d'entretenir des controverses. Ces processus ont été bien documentés par un certain nombre d'ouvrages récents (Michaels, 2008 ; Oreskes et Conway, 2012) centrés sur la situation des États-Unis avec la mise en évidence des stratégies d'industriels du tabac, du pétrole, de la chimie, avec notamment le rôle occulte des frères milliardaires Charles et David Koch. Un point commun : ils cherchent d'une manière systématique à peser sur le développement des connaissances et surtout sur leur perception publique et leurs effets sociopolitiques ; avec une idée directrice : diffuser le doute sur les énoncés scientifiques ayant des implications sociopolitiques, comme ce pouvait être le cas de la lutte contre la tabagie.

De l’autre côté, on voit des scientifiques se faire acteurs sociopolitiques, devenir des lanceurs d'alerte, des activistes, se lier à des ONG militantes, etc. Si bien qu’on ne sait plus trop lorsqu’on entend un scientifique s'exprimer, s'il s'exprime vraiment en tant que scientifique ou en tant que militant de quelque chose. Et symétriquement lorsqu’on entend des industriels ou des ONG parler de science et de technique, par exemple d’OGM ou de gaz de schiste, on ne sait plus s’ils parlent de façon crédible de l’état des connaissances ou si les informations présentées sont biaisées, filtrées, arrangées par une stratégie de communication ayant un but précis. Cela donne une situation de doute sur les prises de parole des acteurs de tous bords. On peine à faire la distinction entre vraies controverses scientifiques et pseudo-controverses montées de toutes pièces par des sophistes.

L'incertitude scientifique devient endogène dans un tel contexte. Le sociologue anglais Brian Wynne (1992) avait déjà soutenu cette idée il y a de nombreuses années dans ses travaux de sociologie des sciences, mais le phénomène s'est considérablement accentué. Il y a les cas où certains acteurs veulent engendrer et entretenir l'incertitude dans les perceptions de la science là où il n’y a pas d'incertitudes du point de vue des scientifiques, ou seulement des incertitudes mineures, qui sont alors exploitées pour entretenir la perception d'une incertitude radicale touchant à l’essentiel. Et puis il y a les cas où les acteurs sociaux préfèrent écarter et nier l'existence de l’incertitude attachée à l’état des connaissances pour parvenir directement à un type d'action qui a leur préférence. Selon les cas, les rôles tournent entre industriels, ONG ou gouvernants. Ainsi certains industriels vont entretenir l’incertitude sur les bases scientifiques des craintes relatives au changement climatique, mais écarteront les incertitudes sur les OGM. Les ONG considéreront que le changement climatique d’origine anthropique est scientifiquement prouvé, mais entretiendront l’idée d’une incertitude sur les incidences sanitaires des activités d’exploitation de sites nucléaires, comme à La Hague. Dans ces jeux, on ne peut pas assigner de façon stable une attitude donnée à un camp par rapport à un autre. Les jeux sont subtils et dépendent des situations et configurations.

2. Troubles

- Les polémiques à finalité idéologique ou politique s'habillent en controverses scientifiques ➔ leurre
  Le public peine à distinguer vraies et « pseudo » controverses scientifiques ➔ conforte les croyances et le scepticisme
- Une nouvelle compétition prend forme: la compétition pour les représentations du monde (cf. la montée du créationnisme)
- La résolution des vraies et fausses controverses se joue indirectement, sur le terrain de l'action publique, à travers la redéfinition des problèmes en fonction de la disponibilité de solutions technologiques ou politiques opérationnelles et soutenues par un réseau d'acteurs

Olivier Godard

Au-delà du jeu sur l'incertitude, il est frappant de voir des désaccords ou des conflits idéologiques et politiques se travestir en controverses scientifiques, au lieu de s'avouer pour ce qu'elles sont. Il y a là un hommage indirect aux distinctions et aux séparations que les univers controversés ont brouillées et qui assuraient un lien fort entre science et vérité.

Il en résulte une nouvelle compétition pour la représentation du monde. Comment se dénoue-t-elle ? Ce que l'observation nous a appris pour les enjeux ayant une dimension économique et technologique est la chose suivante : qu'elles soient vraies ou qu'elles soient fausses, la résolution des controverses et polémiques se joue de manière indirecte sur une autre scène, celle de l'action publique et d'action politique, à travers une redéfinition des problèmes reconnus en fonction de la disponibilité technique et économique des solutions.

L'histoire des pluies acides et de la « mort des forêts » en Allemagne avait une valeur démonstrative toute particulière à nos yeux. Cela remonte au début des années 1980 (cf. Roqueplo, 1988). Une prise de conscience médiatique du dépérissement accéléré des forêts du pays avait surgi, provoquant la mobilisation de centaines de milliers de personnes et appelant une réponse politique. Il y avait plusieurs explications possibles en concurrence pour expliquer ce phénomène, sans que les études scientifiques parviennent à trancher à courte échéance. Finalement la controverse a été tranchée en pratique, par l'action des gouvernements qui ont décidé par leurs actions d'imputer une causalité là où la science n'avait pas tranché. L'action publique a

en effet ciblé à la fois le SO_2 émis par les centrales à charbon et à lignite et les NOx dont la principale source était la pollution automobile. Cette action a donc écarté les autres thèses qui mettaient en avant des phénomènes biochimiques affectant les racines des arbres ou l'effet retardé de la grande sècheresse de 1976 comme facteur d'affaiblissement général des arbres, devenant vulnérables à toutes sortes d'agressions. Ces autres thèses ne se prêtaient pas à une action publique spectaculaire. Si c'était l'effet retardé d'une sècheresse passée, il n'y avait rien d'autre à faire qu'à couper les arbres morts et replanter. Ainsi les pouvoirs publics agissent en fonction de la théorie qui leur donne un espace pour agir et ils le font en fonction des solutions technologiques qui sont effectivement prêtes à être mobilisées et mises en œuvre, car le calendrier politique s'accorde mal avec une attente prolongée de solutions. Ce sont des techniques opérationnelles et soutenues par des réseaux d'acteurs économiques et sociaux, qui sont donc prêtes à la fois techniquement et socialement qui sont mobilisées. Il y a là une contribution importante à la réflexion sur les alternatives énergétiques aujourd'hui. En quoi ces alternatives sont-elles prêtes aujourd'hui, en termes d'organisation, de compétences, de marchés, d'acceptabilité sociale ?

3. Déplacements

- **La critique de l'expertise scientifique comme substitut ou comme fondement revendiqué d'une critique idéologique et politique**
- **La dénonciation des conflits d'intérêts comme substitut à l'examen du fond et à l'exigence d'argumentation sur le terrain scientifique**
- **Les médias grands publics se prenant pour une scène de construction et d'arbitrage de controverses scientifiques**
- **« L'indépendance » revendiquée de groupes autoproclamés experts, comme substitut de compétence et de sérieux scientifique**
- **L'action publique adoptée en réponse à des phénomènes d'émotion sondagière présentée comme preuve a posteriori de l'objectivité du danger et du bien-fondé des alertes**

Olivier Godard

Les univers controversés facilitent un certain nombre de déplacements. Le premier d'entre eux se présente lorsque la critique idéologique et politique prend la forme d'une critique de l'expertise scientifique. On voit également la dénonciation des conflits d'intérêts occuper l'espace critique en lieu et place d'un examen du fond et de l'exigence d'argumentation sur le terrain scientifique. Ce déplacement est coutumier chez les journalistes mais aussi chez les ONG. Comme s'il suffisait de révéler des attaches plus ou moins sérieuses ou anecdotiques avec des industriels pour disqualifier des avis scientifiques, sans avoir à argumenter. On voit encore les médias grands publics se prendre pour une scène de construction et d'arbitrage de controverses scientifiques, ce qui leur donne le beau rôle d'arbitre, occasion de prendre une revanche dans la compétition pour la hiérarchie sociale symbolique. On voit aussi « l'indépendance » revendiquée par des groupes autoproclamés experts, comme s'il s'agissait d'un substitut recevable de la compétence et du sérieux scientifiques. Et finalement l'action publique adoptée en réponse à des phénomènes d'émotion sondagière est présentée comme la preuve *a posteriori* de l'objectivité du danger et du bien-fondé des alertes et initiatives diverses prises par des activistes (fauchage volontaire et illégal de cultures, par exemple).

4. Pièges

1. L'ouverture de l'expertise aux représentants des acteurs porteurs d'intérêt :

- Supposée accroître le niveau d'information et de pertinence de l'expertise
- Supposée accroître l'acceptabilité des résultats
- Supposée favoriser l'émergence de consensus de bonne foi

MAIS: Hyp. 2 & 3 démenties par l'expérience:

- l'expertise participative de l'impact sanitaire des rejets radioactifs de la Hague (Annie Sugier): l'ACRO et la CRIIRAD se sont *in fine* désolidarisées des résultats, en dépit de l'acceptation du protocole
- Le Comité éthique, économique et social du Haut conseil des Biotechnologies: explosion en 2012 sur constat de juxtaposition de positions *a priori*, ignorant l'expertise scientifique

Olivier Godard

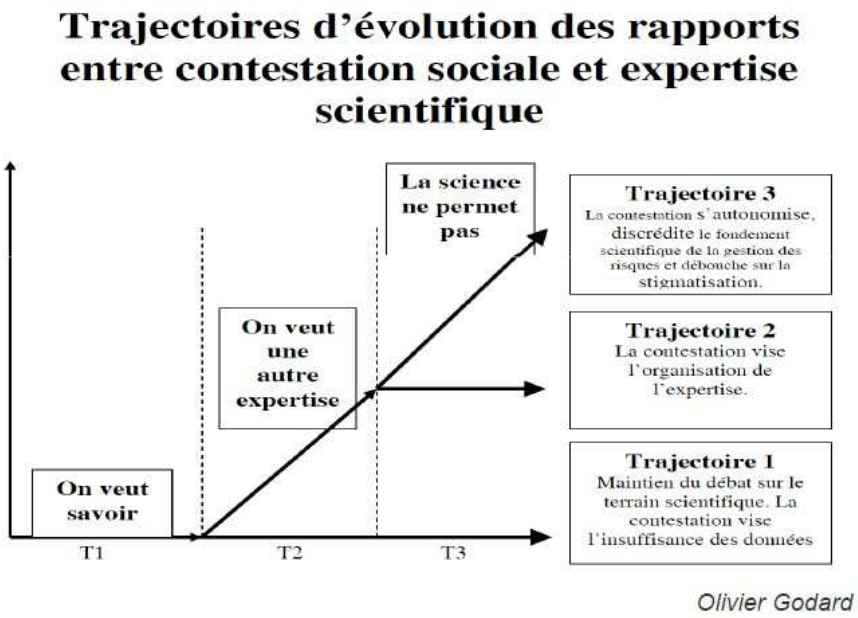
Un des thèmes à la mode est l'ouverture de l'expertise scientifique à des représentants « de la société civile », qu'il s'agisse de militants associatifs ou de représentants de l'industrie. Cette ouverture est supposée accroître le niveau d'information et de pertinence des expertises et surtout favoriser l'acceptation des résultats et l'émergence de consensus. Aux yeux de certains, il faudrait rien de moins que démocratiser l'expertise ! La réalité pratique a offert de sévères démentis. L'ouverture ne favorise pas nécessairement l'acceptabilité des résultats et elle ne favorise pas du tout le consensus. C'est qu'il faut faire preuve de réalisme quant aux intentions des différentes parties qui prétendent reconfigurer l'organisation des expertises et en particulier en assurer « l'ouverture ».

Ainsi dans le cas de l'expertise participative menée sous l'impulsion d'Annie Sugier (IRSN) sur l'impact sanitaire des rejets en mer des installations nucléaires de La Hague, les deux ONG régionale et nationale de « vigilance » nucléaire se sont *in fine* désolidarisées des résultats obtenus, qui disculpaient lesdits rejets, alors même qu'elles avaient accepté le protocole de réexamen de toutes les données. Autre cas : le Comité éthique, économique et social du Haut Conseil des biotechnologies a vu un tiers de ses membres démissionner en 2012 après avoir constaté que la majorité des membres représentant des organisations opposées par principe à la culture d'OGM n'avaient fait que réitérer leurs oppositions de principe, sans tenir compte de l'expertise scientifique précise rendue par le Comité scientifique du

HCB, c’est-à-dire sans jouer le jeu institutionnel qu’impliquait leur participation à cette nouvelle instance. Je pourrais également citer la responsabilité du Comité permanent amiante, instance de concertation multi-partite (industriels, syndicats, médecins, administrations) dans le retard important pris par l’adoption de mesures réglementaires concernant les usages de l’amiante en France : tant que les gens se parlent, pourquoi intervenir, n’est-ce pas ?

Plutôt que de prêter à chaque acteur une ingénuité d’intention, mieux vaut s’armer de lucidité et postuler que tous les intervenants ont des visées propres dont la reconfiguration de l’expertise n’est que le moyen. L’étude des phénomènes de contestation de l’expertise permet de repérer plusieurs trajectoires d’évolution selon le rapport des forces entre les parties en présence aux visées différentes. C’est ce qu’illustre le schéma suivant :

4. Pièges



Dans la dynamique représentée, une question domine au départ : on veut savoir d'où vient tel phénomène dommageable, quelle est l'étendue des risques de telle autre technologie, etc. Tel est le sens de la convocation d'une expertise scientifique collective. Après une première phase d'instruction et de cristallisation des positions apparaît une première bifurcation entre ceux qui maintiennent le traitement du problème sur le terrain de l'amélioration de la connaissance (recueil de nouvelles données, modélisation, comparaison avec des cas analogues à l'étranger…) et une partie des intervenants qui mettent en cause l'organisation même de l'expertise : le choix des experts et leur absence d'indépendance, les conflits d'intérêts, l'équilibre des disciplines représentées, les règles de fonctionnement collectif des comités d'experts, l'étendue des moyens de travail concédés à ces comités, etc. Tout cela se résume pour ces contestataires du premier type : on veut une autre expertise ! La demande d'ouverture de l'expertise permet alors à certains groupes de se remettre dans le jeu d'influence politique. Pour nombre d'ONG, la contestation de l'expertise est le moyen d'obtenir voix au chapitre dans le jeu décisionnel.

4. Pièges

- **Mieux vaut supposer que chaque acteur social se comporte de façon stratégique plus qu'ingénue et rechercher dans la rigueur des procédures le moyen d'encadrer les stratégies de chacun ou à défaut, de les mettre à nu aux yeux du public**

- **Les figures rhétoriques employées par les industriels**
  - **La rationalité (eux) contre l'émotion et l'idéologie (les contestataires)**
  - **Choix et valeurs habillés dans le langage de l'objectivité**
  - **Jeu avec l'incertitude du dossier (mobilisée, entretenue ou niée, selon les cas de figure)**
  - **Tout est sous contrôle, … mais on ne veut pas de règles de responsabilité juridique (cas des OGM)**

Olivier Godard

Il s'ensuit généralement une phase de réorganisation des dispositifs pour satisfaire cette nouvelle revendication. Vient alors une seconde bifurcation. Constatant que l'expertise ne débouche sur les conclusions voulues (mise en cause des dangers d'une technologie cible, par exemple), certains contestent l'expertise dans son principe au motif qu'elle dépend de savoirs et de modèles qui délaissent des réalités essentielles et méconnues ou qu'elle ne permet pas d'appréhender les impacts à long terme, bref que la science ne permettra pas d'apporter les réponses.

4. Pièges

- **Les figures rhétoriques des contestataires**
  - **Réclamer l'inversion de la charge de la preuve**
  - **Demander la preuve de l'innocuité à long terme**
  - **S'appuyer sur les incertitudes résiduelles pour demander un moratoire reconduit de façon indéfinie**
  - **Demander à participer à l'expertise scientifique et à sa gouvernance**
  - **Récuser les informations et positions des milieux industriels comme étant le seul fruit du lobbying et de la « Com »**
  - **Donner un sens planétaire à des évènements locaux**
  - **Contester les comités d'experts sur les thèmes de :**
    - **l'indépendance (conflits d'intérêts présumés)**
    - **l'équilibre de la composition pluridisciplinaire**
    - **l'absence de transparence**
    - **l'oubli de résultats scientifiques « incontestables »**
  - **Demander la mise en débat public comme procédure suprême**

Olivier Godard

La stratégie de certains intervenants se révèle ici : il s'agit de porter la contestation à un niveau où elle parvient à s'autonomiser par rapport à son substrat scientifique, c'est-à-dire à toute prise en compte de la réalité empirique observable par la science. Figée dans une essence idéologique (comme « productiviste » ou « libérale », par exemple) ou fantasmagorique (le maïs-Frankenstein, les Dr Folamour du nucléaire), leur cible fait l'objet d'une stigmatisation qui échappe désormais à toute argumentation scientifique sur l'étendue des dommages constatés ou des risques encourus. En France, la stigmatisation est bien avancée sur le nucléaire, encore plus pour les OGM. Il sera intéressant de suivre la trajectoire pour les éoliennes terrestres et maritimes. Pendant ce temps, d'autres parties en restent au niveau 1 : « on veut savoir », et d'autres au niveau 2 : « on veut une autre expertise. » En d'autres termes, il n'est pas possible d'adopter une réponse unique face à ces demandes et stratégies divergentes émanant des différentes parties entourant l'expertise. Si l'on donne par exemple une place éminente au sein de l'expertise à ceux dont le but est de précisément contester toute expertise pour parvenir au stade de la stigmatisation, c'est assurément le meilleur moyen de transformer le principe de précaution en principe de blocage de l'innovation par une institutionnalisation de la stigmatisation.

4. Pièges

2. La perversion du principe de précaution en norme malthusienne de refus du risque

Idée 1): Le principe de précaution demande de faire grand cas des avis minoritaires les plus alarmistes, voire d'aligner l'action sur ces avis « par précaution »

Idée 2): au nom de la démocratie on doit ouvrir l'expertise sur les non-experts (société civile, citoyens…), qui sont aussi des sachants à leur manière

Réalité 3): les plus actifs à prendre part à cette expertise sont ceux dont le seul but est de parvenir au stade de la stigmatisation d'une technologie et à la récusation des données scientifiques

Effet : le principe de précaution se transforme en outil de blocage de l'innovation technologique et d'institutionnalisation de la stigmatisation

Olivier Godard

Tel est le sort des meilleures bonnes idées lorsqu'on ne prête pas une attention suffisante aux mélanges d'idées qui ont des effets « précipitants » :

- Idée 1) : Le principe de précaution demanderait de faire grand cas des avis minoritaires les plus alarmistes, voire d'aligner l'action sur ces avis « par précaution » ;
- Idée 2) : Au nom de la démocratie, on doit ouvrir l'expertise sur les non-experts, qui sont aussi des sachants à leur manière ;
- Réalité 3) : Les plus actifs à prendre part à cette expertise sont ceux dont le seul but est de parvenir au stade de la stigmatisation d'une technologie et de la récusation des données scientifiques ;
- Effet 4) : Contrairement aux intentions et à la doctrine, le principe de précaution se transforme en outil de blocage et non d'accompagnement de la prise de risque dans l'innovation.

5. Enjeux et conclusions

1. **Promouvoir la distinction des ordres et le respect des règles du jeu qu'ils ont en propre: par exemple, il n'appartient pas à des députés de « soutenir » une étude dont les conclusions sont invalidées par les Agences compétentes**
2. **Organiser avec rigueur les expertises collectives en ouvrant leur cadrage sur les questionnements pertinents des acteurs sociaux, mais en poussant ensuite ces acteurs à argumenter leurs positions sur des bases scientifiques identifiées**
3. **Préserver la collectivité de deux risques d'irréversibilité : l'irréversibilité des dommages sanitaires ou environnementaux, vs l'irréversibilité des engagements dans des solutions technologiquement ou organisationnellement inférieures (*lock-in*)**

Olivier Godard

Vu l'ampleur des troubles associés aux univers controversés, il est de la responsabilité de tous les acteurs de reconstruire de la clarté dans les rôles et les attentes, en particulier en respectant les distinctions entre ordres élémentaires : le politique, le scientifique, l'économique répondent à des modes de fonctionnement différents, et les acteurs qui animent chacun d'eux devraient s'engager dans une auto-limitation de leur champ d'intervention. Par exemple, il n'appartient pas à des députés de soutenir une étude scientifique dont les méthodes et conclusions sont invalidées par l'agence publique compétente et d'autres organismes à vocation scientifique. Or c'est ce qu'on a observé dans la période récente où on a vu des députés soutenir une étude, je pense à l'étude de l'équipe Séralini et du CRIIGEN sur les OGM, récusée par les instances d'expertise. Les pouvoirs de la représentation politique n'autorisent pas cette immixtion.

Deuxième axe : les expertises doivent être organisées avec rigueur, car c'est la rigueur procédurale qui permettra d'encadrer les stratégies des uns et des autres et éventuellement de les révéler au grand-public pour ce qu'elles sont dans certains cas, des stratégies de manipulation. Il est légitime d'ouvrir le cadrage des expertises sur les questionnements pertinents des acteurs sociaux, mais on doit ensuite amener ces acteurs à argumenter leurs positions sur des bases scientifiques identifiées en refusant les simples positions de principe.

Troisièmement, il faudrait préserver la collectivité de deux risques d'irréversibilité. Bien entendu l'irréversibilité des dommages environnementaux et sanitaires les plus graves, mais aussi l'irréversibilité d'engagements prématurés, par précipitation dans la

volonté de répondre à l'opinion, dans des solutions technologiquement ou « organisationnellement » très inférieures à d'autres qui demandent un peu de délai pour être prêtes. Il s'agit de ne pas se laisser piéger par les phénomènes de *lock-in*. Il faut apprendre à gérer le temps de la réponse politique comme temps d'élaboration de solutions supérieures.

5. Enjeux et conclusions

1. **Soyons réalistes: la phénoménologie des univers controversés est certainement l'objet de vues contradictoires de la part des disciplines de l'économie et de la sociologie.**
2. **De façon dominante le tropisme des économistes est la recherche de l'efficacité économique et de l'innovation par la concurrence**
3. **De façon dominante le tropisme des sociologues est la déconstruction des pouvoirs et des institutions et la valorisation des conflits sociaux comme moteur du « progrès social » ou du « progrès démocratique »**

A chacun de voir si la confrontation est productive dans le domaine énergétique !

Olivier Godard

Enfin, on sait qu'entre économistes et sociologues, il y a de fortes chances que nous ne soyons pas d'accord sur la manière même de décrire les univers controversés. Le tropisme des économistes consiste de manière dominante à valoriser la concurrence comme facteur d'efficacité et d'innovation, tandis que le tropisme des sociologues c'est semble-t-il de déconstruire les pouvoirs et les institutions et de valoriser les conflits sociaux perçus sans ambivalence comme des moteurs du progrès social et du progrès démocratique. Je ne suis donc pas certain que nos collègues sociologues approuvent aujourd'hui la façon dont j'ai introduit les univers controversés.

Bibliographie

Godard (O.) et Salles (J.-M.) (1991), « Entre nature et société, les jeux de l'irréversibilité dans la construction économique et sociale du champ de l'environnement », *in* R. Boyer, B. Chavance et O. Godard (dir.), *Les figures de l'irréversibilité en économie*. Paris, Éd. de l'École des hautes études en sciences sociales, coll. « Recherches d'histoire et de sciences sociales 47 », pp. 233-272.

Godard (O.) (1993), « Stratégies industrielles et conventions d'environnement : de l'univers stabilisé aux univers controversés », *Insee Méthodes « Environnement et économie »*, (39-40), Paris, décembre, pp. 145-174.

Godard (O.) (2007), « Est-il légitime de soumettre la connaissance scientifique au débat public ? », « Réalités industrielles »*, Annales des Mines*, mai, pp. 12-18.

Godard (O.) et Hommel (T.) (2007), « Contestation sociale et organisation de l'expertise scientifique des risques environnementaux et sanitaires », *Revue Politique et sociétés*, Montréal, vol. 26, n° 2-3, décembre, pp. 27-43.

Godard (O.) (2011), « Le principe de précaution à l'épreuve des OGM », *in* A. Marciano et B. Tourrès (dir.), *Regards critiques sur le principe de précaution. Le cas des OGM*. Paris, Vrin, coll. « Pour demain », pp. 85-161.

Godard (O.) (2012), « Expertise scientifique d'enjeux collectifs et décision publique », *in* P.-A. Chardel, C. Gossart et B. Reber (dir.), *Conflits des interprétations dans la société de l'information. Éthique et politique de l'environnement*. Paris, Hermes Science Publications-Lavoisier, pp. 179-203.

Godard (O.) (2012), « Chapitre 5 : Les controverses climatiques en France. La logique du trouble », in E. Zaccai, F. Gemenne et J.-M. Decroly (dir.), *Controverses climatiques. Sciences et politiques*. Paris, Presses de Sciences Po, pp. 117-140.

Godard (O.) (2013), « Audition – Quelles conditions pour une recherche et une expertise transparentes ? », *in* B. Sido et J.-Y Le Déaut (dir.), *Tests d'intoxication des rats : un débat scientifique sur les OGM est-il possible ? – Compte rendu de l'audition publique du 19 novembre 2012 et de la présentation des conclusions le 18 décembre 2012*. Paris, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques, coll. « Les rapports de l'OPECST », février, pp. 67-71.

Hoggan (J.) and Littlemore (R.) (2009), *Climate Cover-up. The Crusade to Deny Global Warming*, Vancouver, Greystone Books.

Michaels (D.) (2008), *Doubt is Their Product. How Industry's Assault on Science Threatens Your Health*, New York, Oxford University Press.

Oreskes (N.) et Conway (E.) (2012), *Les marchands de doute*, *ou comment une poignée de scientifiques ont masqué la vérité sur des enjeux de société tels que tabagisme et le réchauffement climatique*. Paris, Le Pommier.

Roqueplo (P.) (1988), *Pluies acides : menaces pour l'Europe*. Paris, Économica.

Wynne (B.) (1992), "Uncertainty and environmental learning: reconceiving science and policy in the preventive paradigm", *Global Environmental Change*, Vol. 2, Issue 2, pp. 111-127.

Sezin Topçu : Controverses énergétiques et critique sociale : une approche sociohistorique

Sezin Topçu est chercheuse à l'Institut Marcel Mauss, au CEMS-CNRS (Centre d'étude des mouvements sociaux).

Nous le savons toutes et tous : les technologies énergétiques mises en œuvre depuis la révolution industrielle sont révélatrices à la fois de la force de nos sociétés à maîtriser la nature et conjointement de la « fragilité de nos puissances », pour reprendre les termes d'Alain Gras, face à cette entreprise de maîtrise[1]. Nous sommes face aujourd'hui à une complexité accrue d'enjeux qui se posent à l'échelle planétaire autour des choix énergétiques. Ceux-ci jouent un rôle crucial dans l'organisation technique, économique, politique voire anthropologique du corps social, en ce qu'ils apparaissent déterminants dans la définition même de nos rapports, individuels et collectifs, à la production, à la consommation, à l'environnement, au risque et à la démocratie. Les choix énergétiques sont, de ce fait, de véritables choix de société ; ils sont de véritables choix de civilisation. C'est pourquoi il importe, me semble-t-il, de multiplier les études à différentes échelles sur les catégories, les imaginaires, les instruments et les formes de gouvernement à l'œuvre dans le recours à telle ou telle technologie ou filiale énergétique, dont la plupart s'avèrent d'ailleurs controversées sur un plan écologique, sanitaire, social.

Pour aborder les controverses énergétiques dans une telle perspective large, je souhaiterais élucider d'abord une série de constats, hypothèses et partis pris scientifiques que je résumerai en trois points. Le premier est qu'au-delà du cycle de controverses qui a longtemps occupé l'agenda de recherches en sciences sociales il me semble pertinent de procéder par des périodisations capables de prendre acte des transformations plus générales des formes d'action collective et des formes d'action publique. En d'autres termes, il me semble nécessaire d'aller au-delà d'une focalisation accrue sur les moments chauds des controverses, des contestations et des conflits, pour saisir les mutations qui ont lieu, souvent de façon discrète, dans les formes d'agir politique, et ce sur divers espaces. Ce point m'emmène à un deuxième, qui consiste à s'intéresser non seulement aux critiques les plus facilement repérables, donc non seulement aux « anti », qu'il s'agisse des antinucléaires, des antigaz de schiste, des antiéoliennes, mais à s'intéresser à la pluralité des critiques, à la façon dont les réflexivités sociales évoluent, changent de forme, s'affaiblissent ou se restructurent au cours du temps. Il me semble donc important d'être

1 Gras (A.) (2003). *Fragilité de la puissance. Se libérer de l'emprise technologique,* Paris, Fayard.

attentif à la pluralité des formes d'action collective qui vont de l'opposition frontale à une technologie donnée à la contre-expertise, à la vigilance ou la surveillance citoyenne, à l'action juridique ou encore à la désobéissance civile. Le suivi des trajectoires empruntées par les contestations au cours du temps, la prise en charge de leur hétérogénéité ainsi que la multiplicité de leurs formes d'action et de leurs modes d'engagements s'avèrent dans ce cadre crucial pour comprendre les différentes « causes » à l'origine de la construction de problèmes publics. Enfin, troisième point : dans ces évolutions dynamiques, les groupes contestataires et les institutions contre lesquelles ils se mobilisent ou formulent une critique n'agissent en effet jamais de façon autonome. La critique fait souvent l'objet d'une prise en charge (contrôle, surveillance, gestion, espionnage…) institutionnelle, voire même peut progressivement devenir, dans certains cas, partie intégrale de la « gouvernance » de la technologie contestée en question. Il faut donc nous intéresser non seulement à la dynamique interne des mobilisations collectives mais aussi (et étant donné que les « armes » sont souvent inégales entre les promoteurs d'une technique et ses détracteurs) à la façon dont celles-ci se trouvent affectées, modifiées, affaiblies ou au contraire renforcées, ou du moins rendues visibles, en fonction de la façon dont les institutions réagissent à la critique, en fonction donc du travail institutionnel actif mené en vue de la contrer, du moins la contrôler. Procéder ainsi revient en fait à reconnaître, et par là à élucider la capacité de renouvellement dynamique et innovant non seulement de l'agir contestataire mais aussi de l'action publique et industrielle.

Une fois ces quelques propositions posées, je souhaiterais préciser aussi comment je vois le rôle que peut et doit jouer l'étude socio-historique des controverses dans le domaine énergétique. Bref, à quelles fins elles peuvent servir, au-delà d'une préoccupation purement scientifique et intellectuelle. La principale utilité est qu'elle permet de mettre en perspective les différentes manières de cadrer les débats, de faire en quelque sorte un inventaire « d'écosystèmes » de cadrages, de ne pas oublier le fait que maints cadrages sont ou ont été possibles autour d'une controverse donnée, même si certains d'entre eux ont pu, au cours du temps, être poussés au second plan au profit d'autres. L'approche socio-historique permet aussi de mettre à distance les évidences du présent, de décoloniser donc notre regard vis-à-vis de certaines catégories évidentes pour prendre acte du fait que de très nombreuses formes d'évaluations, de revendications et de critiques ont pu avoir lieu et peuvent (encore) avoir lieu autour des questions énergétiques. Je pense notamment au cadrage démocratique, à la question de l'évaluation démocratique des choix énergétiques dans leur globalité, qui a toute vocation de devenir un agenda privilégié des recherches en sciences sociales – ce qui se poserait en alternative aux approches trop centrées sur la question d'acceptabilité sociale des technologies à risque.

Si l'on prend le dossier nucléaire, par exemple, si l'on prête attention à l'évolution des controverses publiques dans ce domaine, on s'aperçoit que le cadrage démocratique a très tôt occupé le devant de la scène.

Je rappellerai que la critique de l'énergie nucléaire en France atteint les sommets dans les années 1970. Pilier central de l'écologisme naissant, le mouvement antinucléaire devient national à partir de 1974 ; il atteint alors une extrême richesse, une ampleur inouïe, en se généralisant rapidement auprès de différents acteurs – des milieux scientifiques, aux syndicats, aux partis politiques, aux élus locaux. Et, en France, les dénonciations s'avèrent alors de tout ordre : on refuse les risques de faibles doses ou la perspective d'un accident nucléaire, mais on rejette aussi le capitalisme ou la société de consommation ; on met en cause le gaspillage énergétique mais aussi l'autoritarisme de l'État, de ses forces de l'ordre, de sa logique hiérarchique ; on ne veut pas des déchets mais on veut aussi en finir avec les experts qui abusent de leur pouvoir. Tout est donc dit à l'époque, tout est mis sur la table ; maintes formes d'action sont mobilisées par le mouvement écologiste et antinucléaire des années 1970, pour lutter, se faire entendre, réussir. De façon réciproque, je rappellerai que le programme électronucléaire massif de 1974, aussi appelé Plan Messmer, à l'origine du parc nucléaire actuel, intervient alors en tant que rouleau compresseur absolu, voulu garant de « l'indépendance » énergétique nationale, et par là de la « grandeur nationale[2] » dans un contexte de crise pétrolière. Dans une telle configuration marquée par des enjeux et des aspirations aussi fortes, les promoteurs de l'énergie nucléaire et leurs détracteurs se trouvent dans un affrontement total assez rapidement. En effet, le rayonnement de la France est engagé sans que les oppositions puissent parvenir à contrecarrer les projets, à quelques exceptions près. Le mouvement antinucléaire est globalement refoulé des sphères décisionnelles. Le modèle technocratique, au sens de Robert Frost[3], sort triomphant. Ni la survenue de l'accident de *Three Mile Island*, ni l'arrivée du Parti socialiste au pouvoir ne change la donne. Au contraire, l'arrivée de la gauche au pouvoir va définitivement marquer la fin du mouvement antinucléaire national.

Les controverses et les contestations des années 1970 auront tout de même marqué un succès, c'est d'avoir pu poser le choix nucléaire en tant que choix de société, en publicisant l'idée qu'elle n'est pas la seule voie possible pour la France et que les alternatives existent. Mais ce cadrage global va disparaître dès le début des années 1980, au profit d'un cadrage plus technique (et modernisateur, au service de l'industrie nucléaire) centré sur la question des risques techniques, étant donné que ni la promesse pré-électorale de référendum ni même celle d'un débat national sur l'énergie ne voient le jour et que la critique se referme alors pour ne s'exprimer qu'au niveau local autour des problèmes précis posés à l'échelle locale (notamment le problème des déchets radioactifs). Même avec l'accident de Tchernobyl (26 avril 1986), donc avec la démonstration réelle de ce qui a été jugé impossible par EDF et par l'État, cette tendance ne se renverse pas. Ce que l'on constate surtout en 1986, c'est que, en l'espace de quelques

2 Hecht (G.) (2004). *Le rayonnement de la France : énergie nucléaire et identité nationale après la Seconde Guerre mondiale,* Paris, La Découverte.

3 Frost (R.) (1985), « La technocratie au pouvoir… avec le consentement des syndicats : la technologie, les syndicats et la direction à l'Électricité de France. 1946-1968 », *Mouvement social*, n° 130, pp. 81-96.

années, le refus direct et massif du choix nucléaire est pratiquement estompé. Il ne refera plus surface comme, par exemple, en Allemagne ou en Italie, alors que, comme on le sait, le gouvernement français fait alors preuve d'une des gestions les plus défaillantes de la crise de Tchernobyl. Pour les groupes contestataires donc, à partir de 1986, l'enjeu n'est plus vraiment de s'opposer à l'énergie nucléaire mais de moderniser l'État, d'améliorer la gestion du nucléaire en insistant sur deux problèmes : l'indépendance des instances de contrôle et la transparence de l'action publique. Au moment où survient l'accident de Tchernobyl, les groupes contestataires auront aussi tiré des leçons politiques majeures de l'expérience des années 1970 : pour eux, il s'agira désormais avant tout de légitimer l'action, de montrer le « sérieux » des critiques, de dépasser la posture d'opposants « idéologiques, irrationnels, irresponsables », forgée par les experts officiels pour les délégitimer. La critique se gouverne aussi désormais par du concret : il ne s'agit plus de dénoncer les risques sociétaux de l'énergie nucléaire (en dénonçant la société nucléaire en tant que « société policière, militaire »), il s'agit bien plutôt de mettre en avant les risques sanitaires et environnementaux de l'atome. Deux laboratoires associatifs de mesures de radioactivité, uniques au monde, voient le jour dans ce contexte (Criirad et Acro), pour exiger la transparence, et ce en rendant publique une série de microscandales tout au long de la décennie 1990. Mais en contrepartie du travail politique mené par les ONG pour forcer les organismes nucléaires à communiquer tout type d'informations relatives aux risques, dangers et dégâts du nucléaire, la décennie post-Tchernobyl sera aussi marquée par la montée en puissance de mots et de discours performatifs destinés à renormaliser l'énergie nucléaire, voire à la rendre à nouveau « vertueuse », y compris en tirant profit du débat alors émergent sur le changement climatique. Dans ce cadre-là, les discours identitaires autour de l'énergie nucléaire se transforment radicalement, l'accent étant rapidement mis sur l'avantage « écologique », voire « renouvelable », de la filière.

C'est pour résister à cette évolution rapide, considérée comme une récupération d'une part de l'écologie, d'autre part de l'action associative, que les groupes militants prônent, à partir du milieu des années 1990, le retour à la contestation antinucléaire nationale. L'agir expert en tant que forme d'action dominante de la décade post-Tchernobyl est poussé au second plan afin de remettre la revendication démocratique au devant de la scène. Et cette nouvelle critique antinucléaire gagne une ampleur certaine grâce aux diverses stratégies dont la transnationalisation (en même temps que se font entendre les « victimes historiques de l'atome » dans d'autres géographies, dans d'anciennes colonies, au Niger et au Gabon). Mais elle n'atteindra ni la visibilité médiatique des contestations des années 1970, ni la capacité de mobilisation qui lui a été propre. En même temps, donc parallèlement à ces développements, dans la décennie qui suit la conférence de Rio, des dispositifs institutionnels de « participation » et de « dialogue » gagnent de l'ampleur, dont deux modèles, fortement centrés sur la valorisation des compétences

techniques des acteurs dits de la société civile, prévalent – du moins jusqu'en 2005-2006 (où interviendra le modèle de « débat public »). Le premier est relatif aux dispositifs dits d'expertises pluralistes. Ceux-ci permettent une ouverture temporaire, aux « parties prenantes associatives », des lieux officiels de l'expertise, afin d'œuvrer à une évaluation pluraliste des risques (e. g. Groupe Radioécologie Nord-Cotentin [GRNC] chargé d'évaluer l'éventuelle relation de cause à effet entre le surcroît des leucémies infantiles observé et les rejets nocifs de l'usine de La Hague). Le deuxième modèle est qualifié de « co-expertise » : il y est question notamment de l'implication des « victimes » (et d'autres « parties prenantes » dont les ONG occidentales) dans la réhabilitation dite participative des territoires contaminés. Dans le premier modèle, celui d'expertise pluraliste, il s'agit de faire appel en premier lieu aux acteurs associatifs technicisés, aux contre-experts ayant adopté les pratiques institutionnelles, les manières de parler et d'agir d'experts. Mais les dispositifs dits d'expertises pluralistes mis en place dans le domaine nucléaire (qu'il s'agisse du GRNC dans le Nord-Cotentin ou du GEP dans le Limousin, autour d'anciennes mines d'uranium), malgré leur rôle modernisateur pour l'expertise, feront rapidement preuve de deux limites principales. La première vient du fait que les parties prenantes dont il est question ici concerne un cercle très réduit d'individus, les mêmes acteurs étant la plupart du temps mobilisés, étant donné que les acteurs associatifs capables de « jouer réellement le jeu » de contre-expertise au sein de telles instances sont très réduits en nombre : il faut dire donc qu'il y a une « pénurie » de parties prenantes quand on procède à l'activation de tels dispositifs. Et deuxièmement, les démarches participatives dites d'expertise pluraliste demeurent encore aujourd'hui marginales dans la mesure où elles sont loin d'avoir été pleinement adoptées par les différents organismes nucléaires (elles ont jusqu'à présent plutôt concerné le domaine de la radioprotection, et beaucoup moins celui de la sûreté). Quant au modèle dit de co-expertise, destiné à la gestion « participative » des territoires contaminés par un accident nucléaire (en Biélorussie ou au Japon), donc dans un contexte de risques et de dégâts permanents et irréversibles, ce type de démarche a en effet provoqué d'importants dilemmes d'ordre politique et moral dans l'arène contestataire. Trois enjeux majeurs provoquent un tiraillement pour les acteurs dits de la société civile : (i) le risque de normalisation ou de banalisation des conséquences catastrophiques d'un accident nucléaire (certains groupes militants considèrent que la participation aux projets dits de réhabilitation participative, ou de co-expertise, tels qu'Ethos ou Core, contribue en fait à rendre acceptable la vie parfaitement anormale donc inacceptable imposée par un accident nucléaire) ; (ii) le risque de récupération de la critique associative au service d'une telle banalisation ; (iii) et parallèlement l'urgence humanitaire ressentie pour prendre en charge, au plus vite, les besoins des victimes sur place (jusqu'alors traitées seulement de « cobayes » par les experts internationaux se rendant sur place, ou de « sujets passifs » auxquels administrer des normes et des règles par les autorités nationales) y compris en instaurant un dialogue avec elles

(et ce quels que soient les risques politiques, de normalisation ou de récupération que cela implique).

Pour ces diverses raisons, les mises en cause publiques de l'offre institutionnelle de participation et de dialogue se multiplient à partir de la fin des années 1990, d'autant plus que les rares expériences destinées à une évaluation démocratique du choix nucléaire échouent globalement dans la décade post-Rio. Je pense en particulier au débat public EPR avorté (2005-2006), suivi d'un Grenelle de l'environnement immunisant ouvertement l'énergie nucléaire vis-à-vis de toutes perspectives de délibération et de négociation. Ainsi, dans la période post-Rio, loin d'assister à une transition de la « technocratie » (« nucléocratie ») vers une « démocratie nucléaire », je dirais qu'on a affaire à la multiplication de tentatives et d'expériences partielles, destinées avant tout à améliorer le contrôle de l'énergie nucléaire et de ses risques, ce qui n'est pas une mince affaire mais s'inscrit dans une perspective plutôt gestionnaire.

La catastrophe de Fukushima survient dans un tel contexte où le cadrage démocratique, c'est-à-dire le cadrage des débats publics/médiatiques et des revendications collectives autour d'une évaluation globale des choix énergétiques, s'avère affaibli, du moins dans un premier temps, comme après Tchernobyl. Dans l'immédiat après les explosions nucléaires japonaises, le mouvement antinucléaire français peine à mobiliser alors que plus de 100 000 personnes descendent dans les rues en Allemagne à la même période. En France, il faut dire que les gaz de schiste mobilisent beaucoup plus que le nucléaire tout au long de l'année 2011, alors que la catastrophe de Fukushima crée de vraies ruptures chez certains voisins, notamment l'Allemagne, ce qui a poussé Ulrich Beck à décréter notre entrée dans une ère postnucléaire[4]. Le cadrage démocratique ou celui relatif à l'évaluation démocratique des choix énergétiques ne s'est pas non plus introduit dans la campagne présidentielle de 2012 alors qu'à la fin des années 1970, je vous le rappelle, il était omniprésent, que le mouvement antinucléaire avait pu obtenir une promesse de référendum de la part de François Mitterrand (même si cette promesse s'est avérée fausse par la suite).

Il n'en demeure pas moins qu'un certain renouveau de la critique antinucléaire s'est opéré à partir de fin 2011. En témoignent les mobilisations de Valognes contre le transport des déchets radioactifs (automne 2011), suivies par la chaîne humaine contre le nucléaire de 2012 qui a rassemblé 60 000 personnes environ. En témoigne aussi, et surtout, à mon sens, le conflit autour du projet Cigéo d'enfouissement des déchets radioactifs. À Bure, le refus du projet se fait conjointement avec le refus virulent de toutes tentatives de participation ou de dialogue institutionnalisées. Ainsi, en juillet 2013, à la suite du premier débat public qui n'a pas pu se tenir, le président de la Commission particulière du débat public (CPDP) a prononcé une phrase emblématique devant les journalistes. Il a dit, je cite : « Un débat public sans les réunions publiques, c'est inquiétant », fin de citation. On ne peut pas se contenter d'analyser cette crise démocratique qui se

4 Beck (U.), « Enfin l'ère postnucléaire », *Le Monde,* 9 juillet 2011.

pose pour l'instant au niveau local mais qui risque de se poser aussi au niveau national à travers un simple procès d'accusation à l'égard des acteurs de boycott, en les qualifiant simplement « d'ennemis de la démocratie » – un discours largement relayé par les médias. Je dirais qu'il nous faut plutôt considérer le processus historique complexe et conflictuel à travers lequel la participation du public aux choix énergétiques, et plus particulièrement nucléaires, s'est cadrée, retravaillée, reformulée par les décideurs, les promoteurs du nucléaire, mais aussi par les groupes contestataires, voire même par les sciences sociales depuis les cinq dernières décennies. Ce n'est qu'ainsi, me semble-t-il, qu'il peut être possible d'innover des formes opérantes d'évaluation et de décision démocratiques relatives aux choix énergétiques. Dans ce cadre, le contexte actuel de réflexion internationale sur la transition énergétique, qui dépasse largement nos frontières nationales, offre me semble-t-il une occasion à ne pas manquer pour faire de la question démocratique à nouveau une question prioritaire.

Alain Nadaï : La démonstration du CCS dans l'Union européenne : émergence d'une politique et d'une controverse

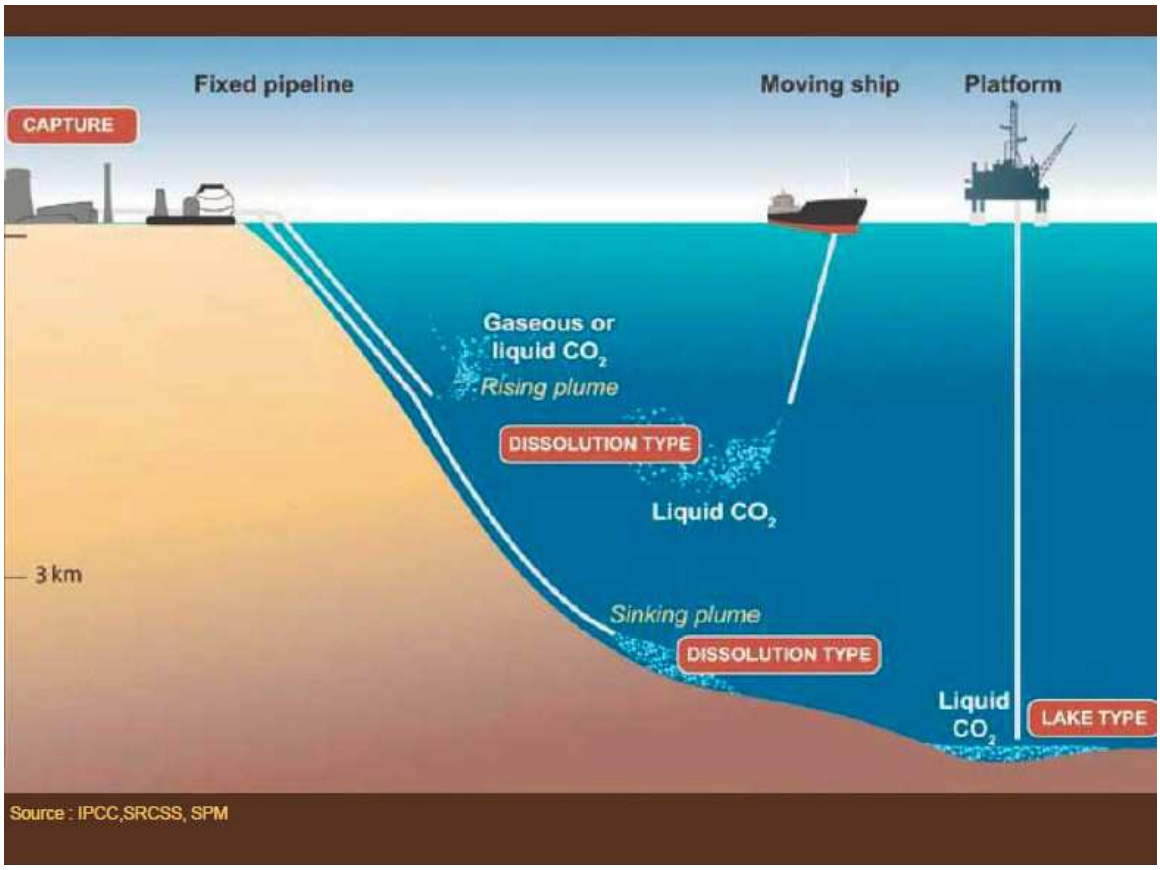
Alain Nadaï est directeur de recherche au Cired, économiste de l'environnement, ingénieur agronome, paysagiste.

Alain Nadaï : La capture et le stockage du CO_2 combine des technologies afin de capturer le dioxyde de carbone émis par des installations industrielles ou des centrales électriques, de le transporter et de le stocker sur le long terme dans des réservoirs géologiques pour contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le concept de CCS a été imaginé par des chercheurs dans les années 1970. Il a recueilli l'attention au niveau international depuis le début des années 1990. Il y a aujourd'hui des projets d'échelle industrielle dans plusieurs pays, la plupart d'entre eux sont associés à des installations de récupération assistée de gaz ou de pétrole.

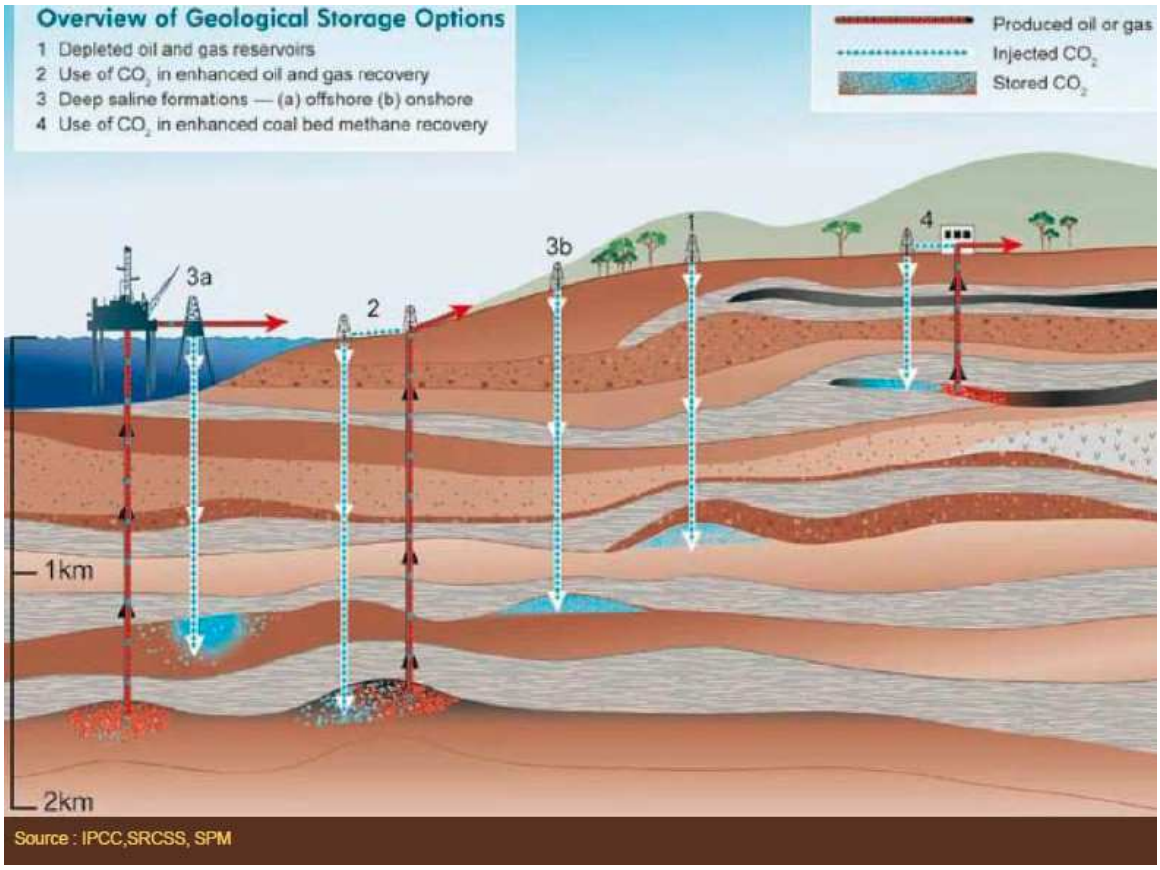
L'Union européenne s'est engagée depuis le milieu des années 2000 dans une politique de « démonstration » du CCS visant au développement, d'ici à 2015, de 12 démonstrateurs d'échelle industrielle sur site. L'émergence de cette politique a été marquée d'intenses débats au sujet du degré de maturité des technologies CCS, de leurs coûts et des risques qui leur sont associés ainsi que de la pertinence de l'option CCS comme réponse à l'enjeu climat-énergie. Ce processus a aussi été marqué par d'intenses conflits autour du développement de projet sur site.

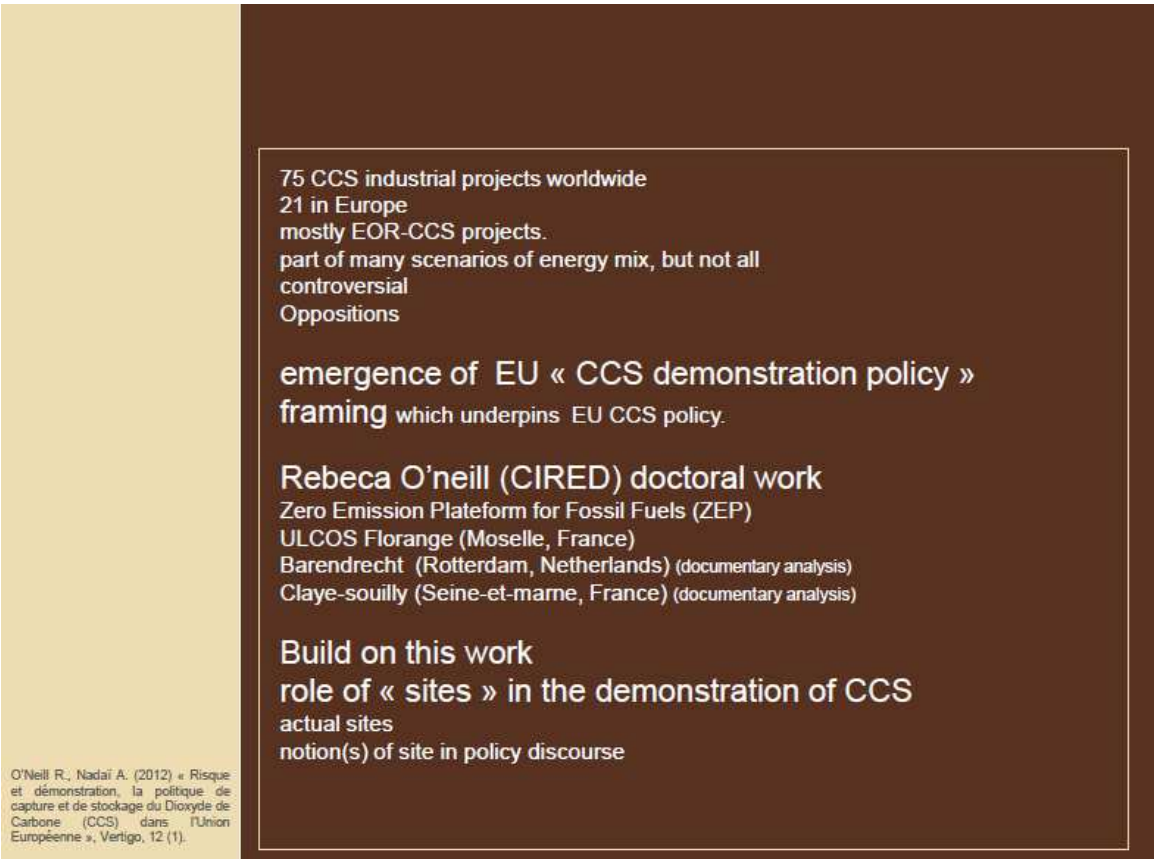
1 Introduction

Cette présentation analysera l'émergence et le développement de la politique européenne de démonstration du CCS, en pointant le rôle de différentes parties prenantes (arènes climatiques, chercheurs, experts, associations…) et des processus locaux dans son évolution.



La capture et le stockage du CO_2 combine diverses technologies afin de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Elle consiste à capturer le dioxyde de carbone émis par des installations industrielles ou des centrales électriques, à le transporter vers des puits d'injection dans le sous-sol de manière à le stocker sur le long terme dans des réservoirs géologiques.


Overview of Geological Storage Options
1 Depleted oil and gas reservoirs
2 Use of CO_2 in enhanced oil and gas recovery
3 Deep saline formations — (a) offshore (b) onshore
4 Use of CO_2 in enhanced coal bed methane recovery
Produced oil or gas
Injected CO_2
Stored CO_2
3a
2
3b
1
4
1km
2km
Source : IPCC,SRCSS, SPM



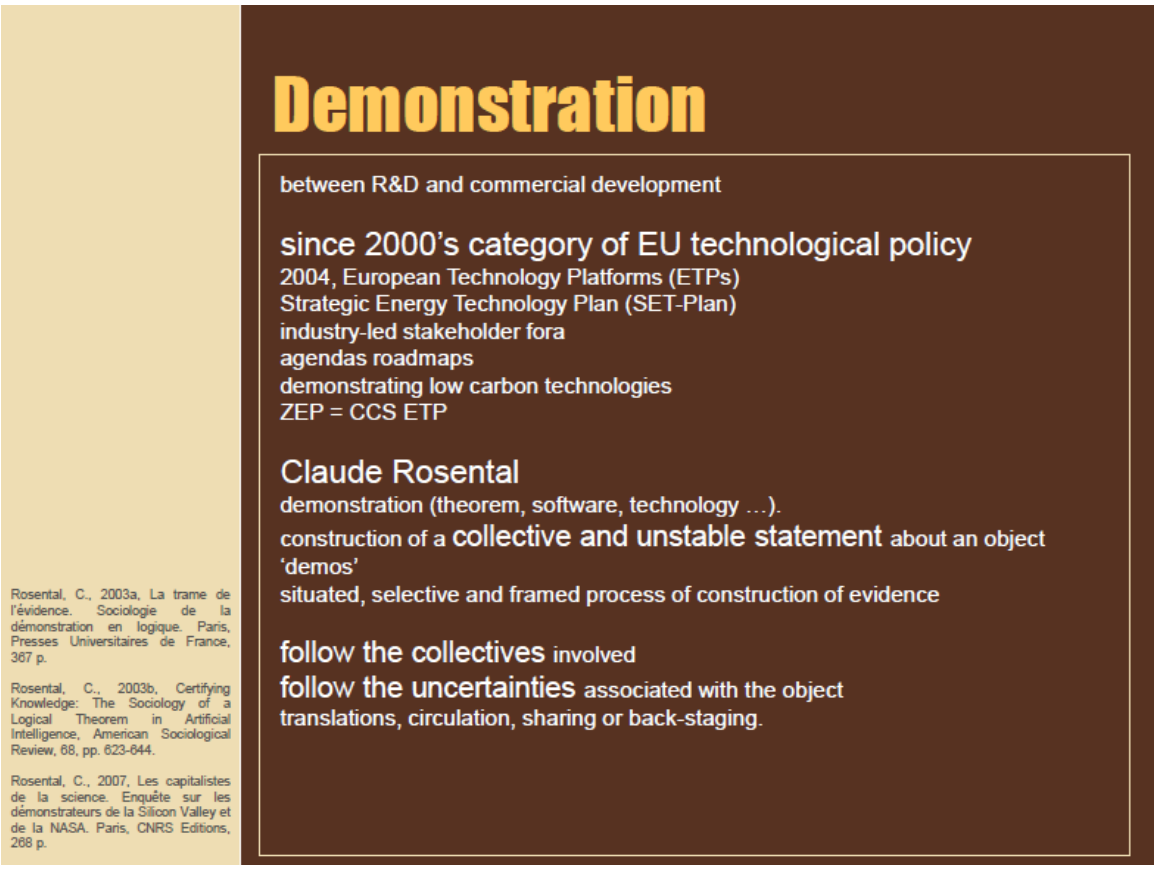
Environ 75 projets d'échelle industrielle sont aujourd'hui en place ou en développement au niveau mondial, notamment aux États-Unis, au Canada, en Chine et en Australie. 21 d'entre eux sont localisés en Europe, notamment en France, Norvège, au Royaume-Uni et aux Pays-Bas. La plupart de ces projets sont associés à des installations de récupération assistée de gaz ou de pétrole (RAP), consistant à injecter le dioxyde de carbone dans des puits de pétrole ou de gaz naturel en fin de production afin d'en améliorer le rendement.

Le CCS fait partie de certains scénarios énergétiques du futur, mais pas tous. C'est une technologie controversée.

Ma présentation porte sur l'émergence de ce qui est appelé « politique de démonstration » du CCS dans l'UE. Elle repose sur le travail de Doctorat de Rebeca O'neill. Rebeca a analysé ce processus au moyen d'outils de la sociologie argumentative et de la démonstration, en s'appuyant sur plusieurs terrains dont la plate-forme technologique européenne sur le CCS : la « Zero Emission Plateform for Fossil Fuels » ou ZEP. Ma tentative est ici de prolonger ce travail en m'interrogeant sur les figures et le rôle du « *site* » de démonstration dans ce processus. Le site désigne ici à la fois des sites concrets comme Barendrecht ou Clayes-Souilly, et les notions de sites qui sont utilisées dans les textes de politique publique.

2 Demonstration, site

Afin d'opérer ce prolongement, je m'appuie sur deux notions qui désignent à la fois des entités dans le processus étudié et des catégories problématisées et instrumentalisées au cours de ce dernier : la démonstration et le site.

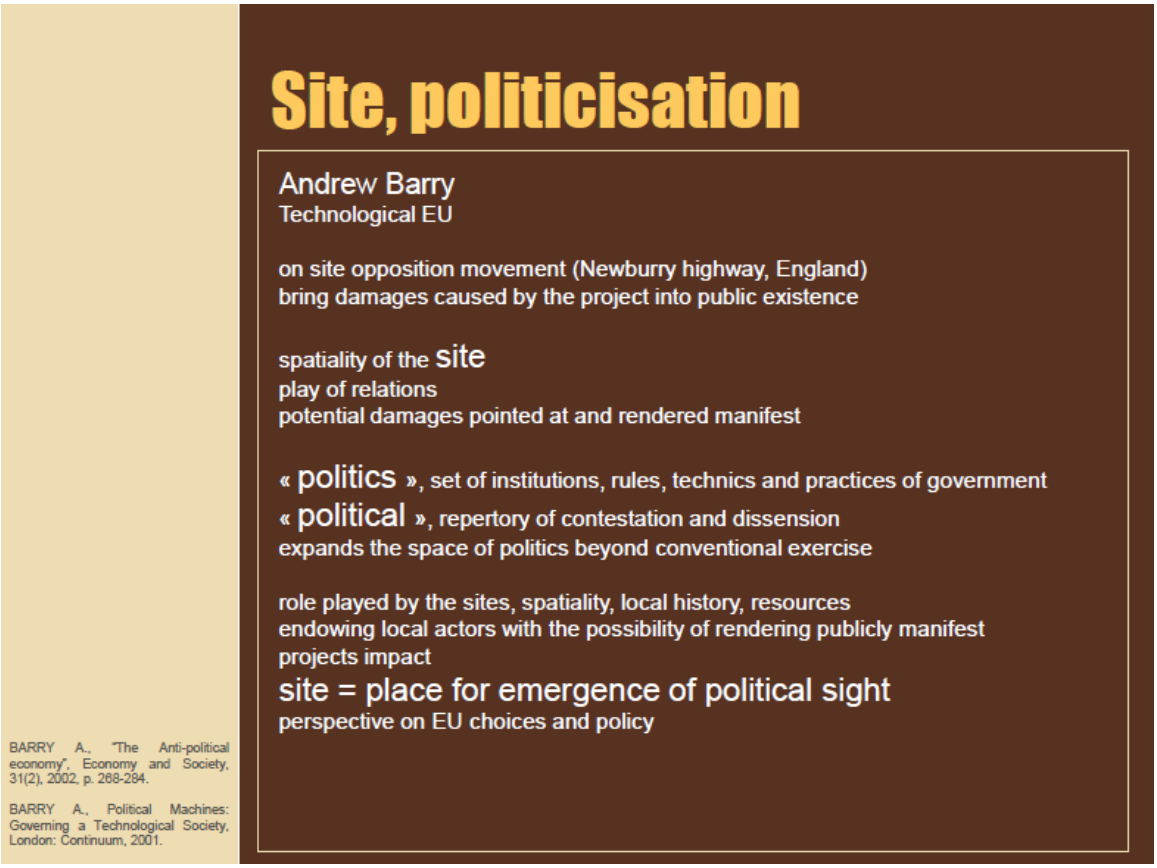


Le terme est familier en mathématiques. Il l'est aussi chez les ingénieurs technologues pour qui il désigne un stade du développement technologique qui prend en charge le passage entre la R&D et le développement commercial. Ce terme est devenu depuis le milieu des années 2000 – à l'occasion du développement de l'Europe de la Recherche, dans le sillage du Traité de Lisbonne – une catégorie de la politique technologique européenne. À partir de 2004, l'UE s'est dotée de « plates-formes technologiques » afin de déployer un Plan stratégique de développement des technologies bas carbone (SET Plan). Ces plates-formes ont pour objectif de rapprocher la politique de recherche de l'industrie, de manière à contribuer à la croissance et à l'emploi. Elles sont composées majoritairement d'acteurs industriels et de quelques ONG. Elles ont pour mission d'établir des agendas stratégiques et de définir des « projets phares » visant la « démonstration » de ces technologies bas carbone. La ZEP est la plate-forme qui a été en charge de l'élaboration d'un programme démonstrateur européen de la technologie CCS.

Le sociologue Claude Rosental s'est intéressé aux processus de démonstration en mathématique et dans les programmes spatiaux de la NASA – les démos de simulateurs de trajectoire spatiale. Il définit la démonstration comme l'opération de construction d'un accord, souvent instable, à propos d'un objet : un théorème, un logiciel, une technologie.

La démonstration passe par des opérations dédiées. Elles usent de procédés matériels et discursifs (l'« arsenal ») déployés dans des arènes de démonstration spécifiques à l'objet : un huis-clos, un face-à-face, un séminaire, une conférence, une foire… Elles construisent les cadres qui permettent de jouer d'ostentation et de preuve concernant l'objet démontré, d'éventuellement mettre au second plan des incertitudes qui lui sont associées. D'où le terme de démonstration, proposé par Rosental.

L'analyse de Rosental, en dissociant la démonstration de son association à un régime stabilisé de preuve formelle, nous invite à analyser la démonstration comme processus social, comme dispositif de cadrage d'évidence, de construction d'accord, d'accès sélectif et de collectifs qui les portent. Elle invite à suivre les collectifs engagés dans la démonstration du CCS, leur périmètre, intérêts et positions, ainsi que les incertitudes associées à l'objet démontré, leurs traductions successives, notamment en risques probabilisables et gérables, leur mise en avant ou en retrait.



Andrew Barry a aussi exploré certaines formes de démonstration dans son analyse de l'Europe technologique (Barry, 2001). Afin de pointer l'insuffisante mise en politique des choix technologiques européens, Andrew Barry s'intéresse à la démonstration comme procédé permettant de pointer, de rendre manifeste et publique une perspective politique : une « *political sight* ». La consonance avec le « *site* », le site en anglais, n'est pas un hasard. Andrew Barry s'appuie sur l'analyse d'un mouvement d'opposition sur site afin de développer son propos : l'opposition au projet de déviation autoroutière de Newbury en Angleterre dans les années 1990. Une « *demonstration* » en anglais ; une « manifestation » en français. Barry montre comment ce mouvement d'opposition rend progressivement publics les impacts de ce projet, en les traduisant en mots, en associant leur récit à une chaîne référentielle (qui permet d'articuler l'objet) ainsi qu'à des réseaux artistiques, d'opposants, de presse... qui constituent un espace public dans lequel la robustesse et la pertinence de la démonstration peuvent être éprouvées (Callon, 2001, p. 209). L'enjeu reçoit une couverture nationale.

Ce qui nous semble particulièrement intéressant dans l'analyse d'Andrew Barry est la manière dont la spatialité même du site permet

un jeu de relations entre les opposants, les forces de l'ordre et les médias, au travers duquel les impacts potentiels du projet peuvent être mis en scène et rendus manifestes – en utilisant, par exemple, la présence des médias comme témoins de mises en scène dramatiques entre opposants et forces de l'ordre sur des arbres condamnés par le projet. Le site offre donc ici par sa spatialité même une ressource à la démonstration et à l'émergence d'une perspective politique sur un projet d'aménagement public.

Andrew Barry utilise le cas de Newbury pour distinguer deux formes de politique, distinction qu'il développe et précise ultérieurement. La « *politics* » se définit de manière générique comme l'ensemble des institutions, organisations, techniques et pratiques de gouvernement – à l'échelle internationale, nationale et locale. Le « *political* » est au contraire conçu comme un répertoire de contestation et de dissensus : il étend l'espace de la politique (« *politics* ») au-delà de ses modalités conventionnelles d'exercice (et d'intelligibilité).

Le « *site* » est donc envisagé ici comme un espace – à la fois ressource et construit – d'émergence d'un désaccord et d'une perspective politique (le « *political* »). En qualifiant l'UE de « zone technologique », Andrew Barry contraste ce site de politisation avec le mode de gouvernement technologique de l'UE, caractérisé par l'absence de débat public et la faible mise en politique des enjeux.

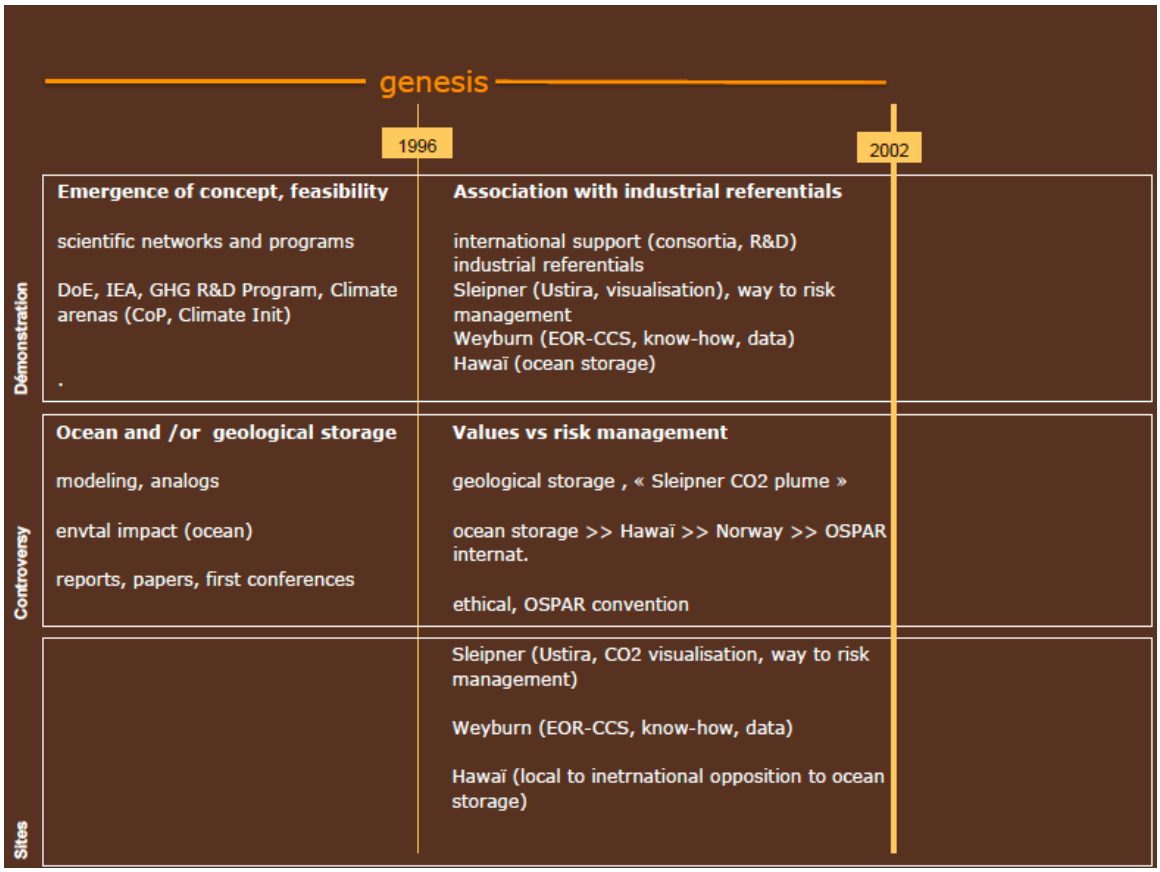
L'analyse d'Andrew Barry suggère de porter dans l'analyse de l'émergence de la démonstration européenne du CCS une attention toute particulière au rôle des sites, de leur spatialité, de leur histoire locale, des réseaux dont ils sont porteurs et des constructions que ces derniers soutiennent. Elle suggère de suivre l'activité des collectifs locaux et de décrire la manière dont les ressources offertes par des sites et des situations locales leur permettent de rendre manifestes les impacts potentiels des projets CCS ainsi que leur propre perspective politique sur le choix du CSC comme option européenne.

3 A chronology of EU CCS demonstration

	genesis		regime		politicisation	
	1996	2002	2005		2008	2010
Démonstration	**Emergence of concept, feasibility** scientific networks and programs DoE, IEA, GHG R&D Program, Climate arenas (CoP, Climate Init)	**Association with industrial referentials** international support (consortia, R&D) industrial referentials Sleipner (Ustira, visualisation), way to risk management Weyburn (EOR-CCS, know-how, data) Hawaï (ocean storage)	**Political legitimacy** SRCCS (IPCC Special report) translating science into politics potential solution feasibility need for on-site demonstration geological storage low-risk sites = cost benefit promise	**Assemblage of demonstration programme** ZEP/SRA, « demonstration programme » aligning interests MS / Commission / industry potential demonstration projects and sites	**Regulatory framework** 3rd climate energy package CCS geological storage Directive (demonstration sites, proced. control) NER300 (devising, lobbying ...)	**Demonstration projects development** Adoption of NER 300 (tender, project selection ...)
Controversy	**Ocean and /or geological storage** modeling, analogs envtal impact (ocean) reports, papers, first conferences	**Values vs risk management** geological storage , « Sleipner CO2 plume » ocean storage >> Hawaï >> Norway >> OSPAR internat. ethical, OSPAR convention	**Technological potential, need for CCS** lock-in, alternative path to CCS technological maturity of CCS possibility of managing risks	**Technological potential, need for CCS** anti-CCS NGO collective (2007) WWF pro CCS (2007) Greenpeace-EREC, « Energy Revolution »	**Vested interests** Financing (ZEP) Greenpeace "False Hope" EOR (ZEP, EU parliament), a CCS captured by industrial interests	**Local oppositions** Expertise, environmental justice, need for CCS Risk managment, Utsira leaks (GreenPeace « Reality Check »)
Sites		Sleipner (Ustira, CO2 visualisation, way to risk management) Weyburn (EOR-CCS, know-how, data) Hawaï (local to inetrnational opposition to ocean storage)	The « low-risk site » (risk management , cost-benefit optimisation, socially optimal leakage rate ....) The « demonstration site » (telling set of demonstrators, aligning interests, knowlegde sharing, control over project / site selection ...)			Claye Souilly, Barendrecht, Florange ... projects abandoned Sleipner (leaks)

Le rôle des sites dans la démonstration du CCS en UE peut être analysé en suivant une périodisation du développement de cette démonstration.

Cette présentation s'inspire du travail de Rebeca O'neill. Le développement de la démonstration du CCS dans l'UE est divisé en trois périodes : « genèse », « régime », « politisation ».



La période de « genèse » débute en 1972, année de l'émergence du concept, et va jusqu'en 2002, lorsque le GIEC décide de lancer un processus de cadrage pour la production d'un rapport spécial sur le CCS.

Dans l'ensemble, cette période est celle de l'émergence et de la structuration des réseaux scientifiques et institutionnels, en relation avec le DoE américain, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) – et notamment le « Greenhouse Gas R&D Programme », mis en place en 1991 – et les arènes climatiques (COP, « Climate Technology Initiative » [CTI]). Ces réseaux visent à explorer la faisabilité du concept CCS : des rapports, des premières publications et conférences scientifiques permettent aux chercheurs de partager les résultats issus de modélisations hybrides (physico-chimie de l'underground), de la connaissance d'analogues (naturel gaz, eau gazeuse naturelle) ou encore des milieux de stockage (biologie marine, notamment). Le stockage océanique, en dépit de son fort potentiel, finit par être disqualifié en raison de ses risques pour l'environnement marin. Le stockage géologique, en dépit de ses impacts potentiels (migration, fuite, impact sur les écosystèmes de surface...) et d'un potentiel plus limité, est considéré comme une option gérable.

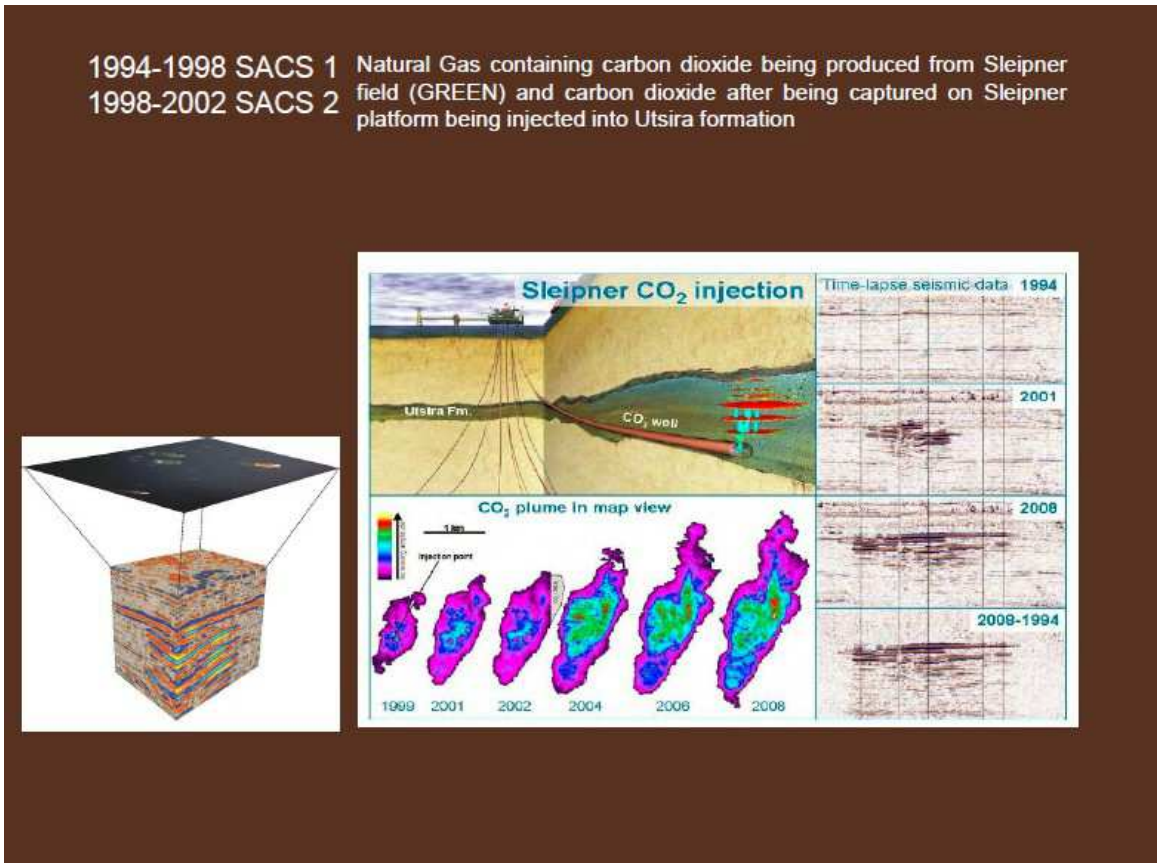
Dans l'UE, les premiers programmes de recherche sur le CSC sont soutenus par les programmes-cadres au début des années 1990 (FP4

programme Joule, FP4 Joule 2). Ils concluent à la faisabilité du concept CCS sous condition d’une réduction de ses coûts technologiques.

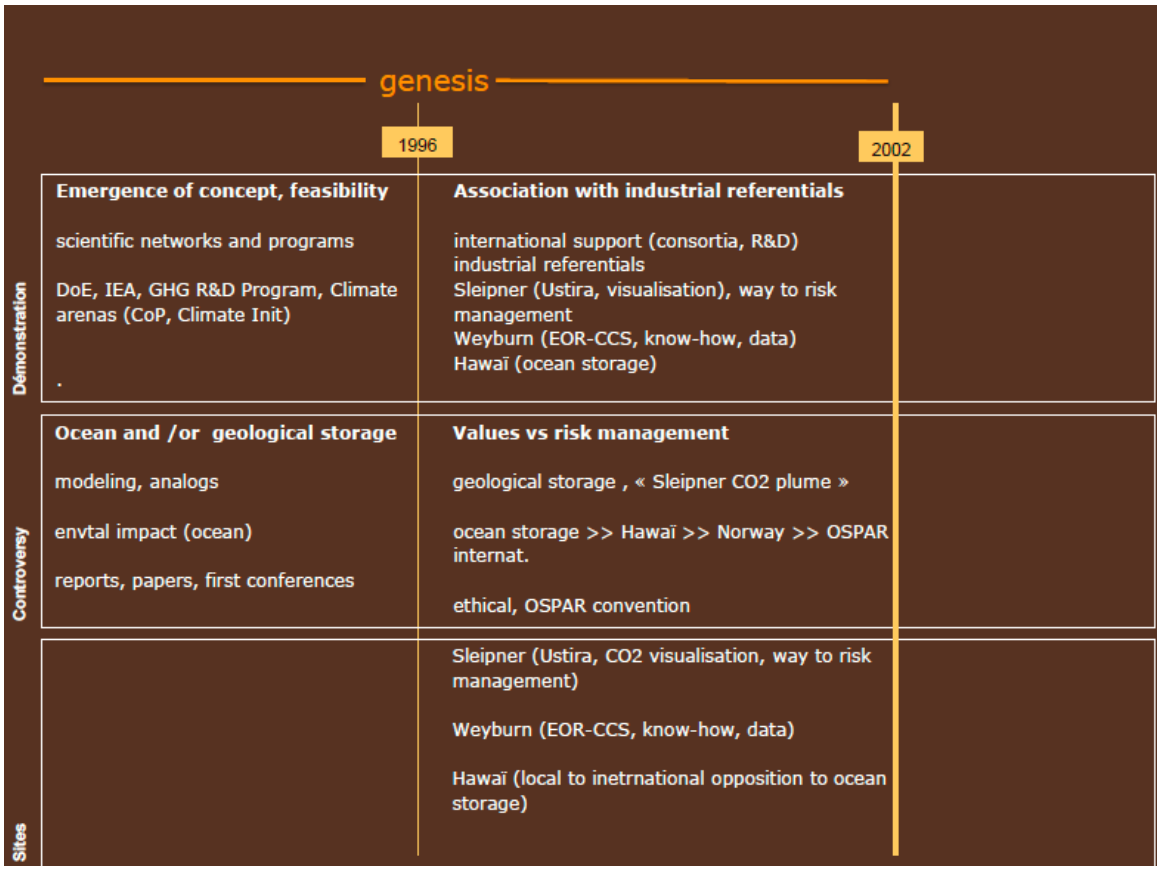
Trois processus sur sites sont déterminants pour le cours de cette phase.

Sleipner/SACS, en Norvège, est le premier d’entre eux.

En 1992, lors de la première conférence du « Greenhouse Gas R&D Programme », le producteur norvégien de gaz Statoil et la compagnie Gas annoncent le développement futur d'un projet de CSC sur la plate-forme de Sleipner, à 240 km au large des côtes de la mer du Nord.

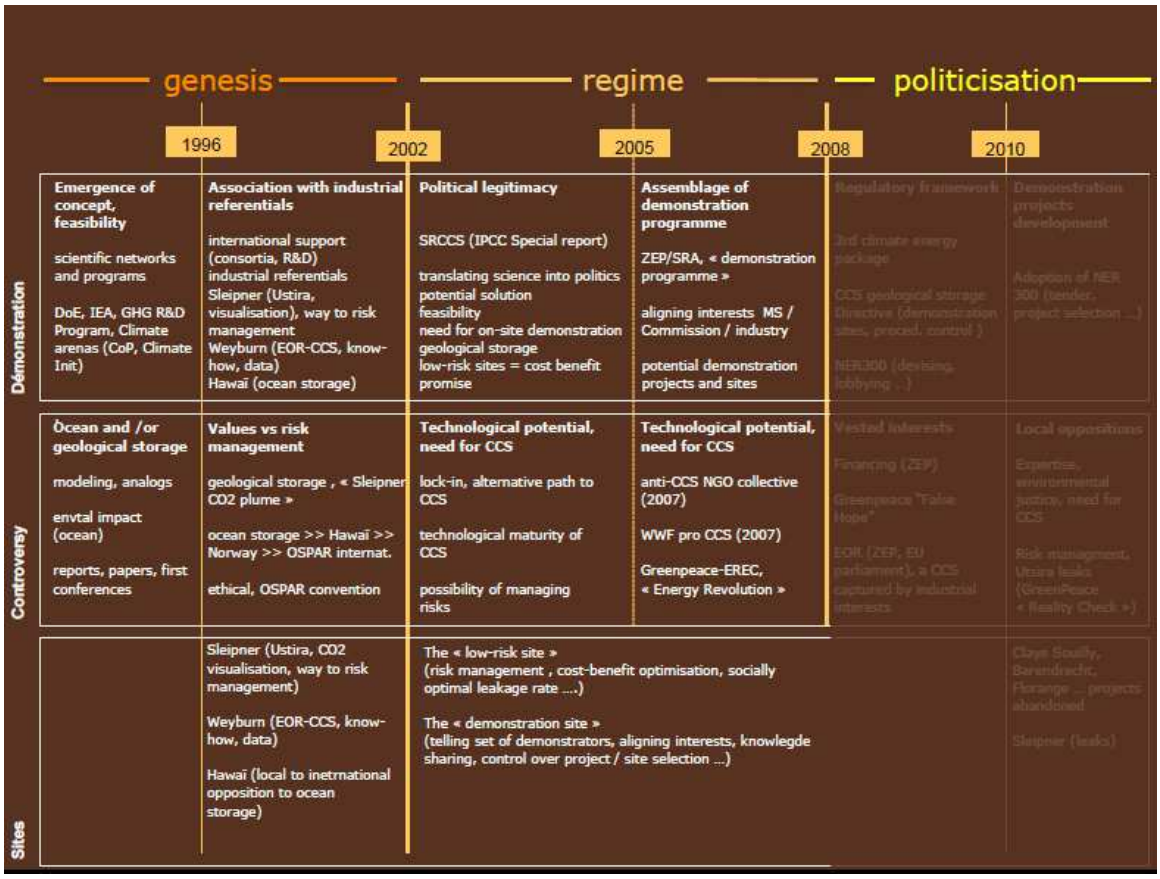


À partir de 1996, le CO_2 capté à partir du gaz naturel, afin de purifier ce dernier, est stocké sous la mer du Nord, dans la formation saline profonde appelée Utsira.



Un financement de l'UE (4e PCRD 1994-1998 ; 5e PCRD 1998-2002) aide le consortium industriel à mettre en place deux projets de recherche successifs en associant avec cette installation CCS. Les projets SACS (« Saline Aquifer CO_2 Storage ») et SACS II ont pour objectif de suivre et de visualiser, au moyen de techniques sismographiques, le dioxyde de carbone capté sur la plate-forme de gaz et injecté en formation profonde dans la couche Utsira.

Les premiers résultats et les images de la plume de CO_2, suivi dans le temps sur trois ans (1999-2002), marquent un tournant. Les résultats sont publiés dans *Science*, présentés dans des conférences internationales. Les images sont relayées dans la presse et deviennent un symbole du succès industriel et scientifique du CCS. Non seulement le projet Sleipner fournit une preuve que le captage et le stockage du CO_2 peuvent être développés à échelle industrielle, mais le suivi des mouvements souterrains du gaz ouvrent la voie à la validation des modélisations : il marque l'entrée du CCS et du stockage géologique dans la gestion de risque. Utsira étant une formation géologique importante au niveau mondial – on la retrouve par exemple dans le champ d'In Salah en Algérie –, la répercussion de ce projet est globale. Sleipner devient un véritable « symbole industriel » en matière de CSC – expression qui sera reprise quelques années plus tard par Greenpeace à propos de cette expérience.

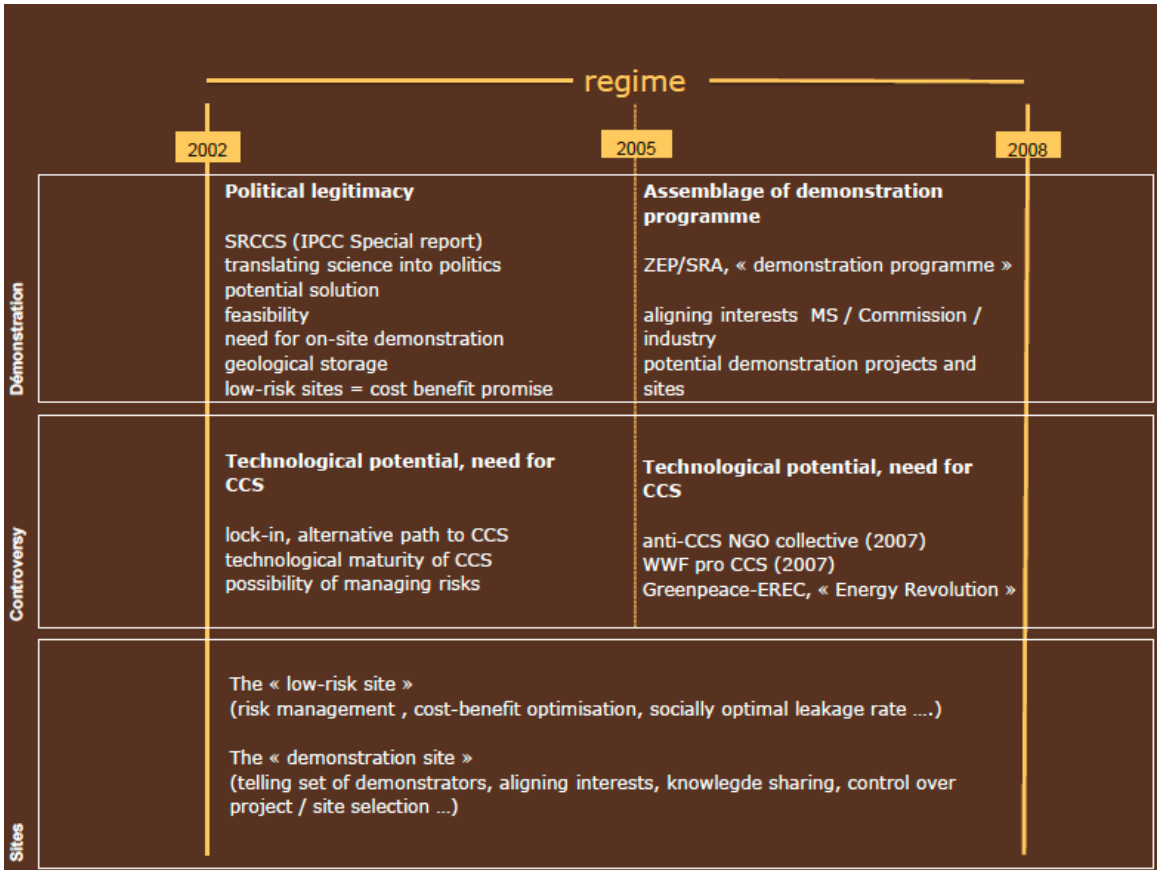


Weyburn (Canada/USA-2000), le second site important, est un projet CCS-RAP à cheval sur la frontière canado-américaine. Le savoir-faire et les données RAP – par exemple, les données cartographiques de la région de l'Alberta riche en champs de pétrole et de gaz – sont communiquées au « Greenhouse Gas R&D Programme » qui les analyse pour conclure à la transférabilité de CCS à la technologie RAP et à la faisabilité de projets RAP-CCS. Un projet de recherche conjoint est également soutenu par l'UE dans le cadre du 5e PCRD, afin d'acquérir des connaissances sur la transférabilité du savoir-faire RAP vers le CCS et au couplage de ces technologies. De manière analogue à Sleipner, Weyburn devient un symbole du CCS industriel.

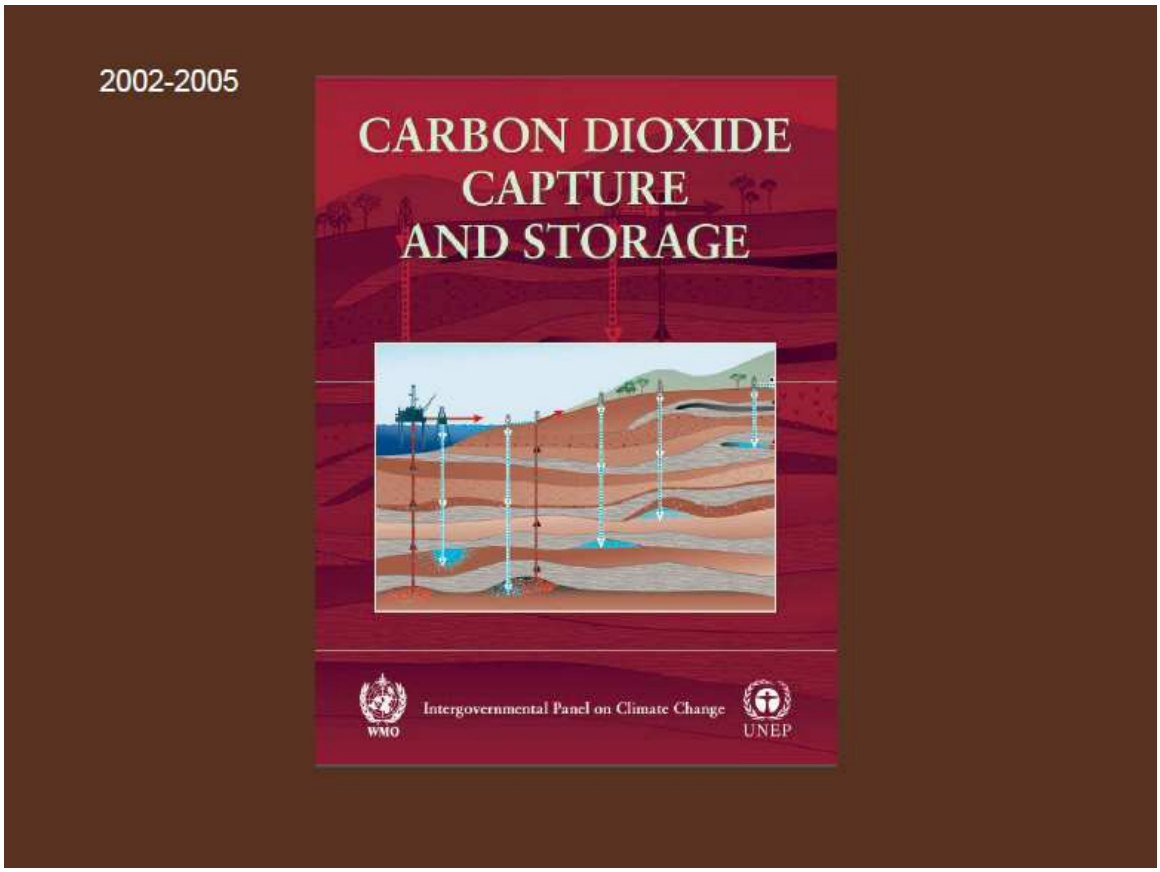
Hawaï est le troisième site important au cours de cette période. Le projet d'Hawaï est réputé pour avoir été le premier essai et échec dans le domaine du CCS. Il est moins connu quant à son histoire locale et son implication décisive pour le devenir du stockage océanique. Ce cas a été bien analysé et nous ne ferons qu'en rappeler des éléments de processus. En 1997, au cours de la conférence de Kyoto, un consortium industrialo-étatique s'accorde sur le développement d'un projet de stockage de CO_2 au large des côtes d'Hawaï. Le DoE est derrière l'initiative, qui regroupe des entités américaine, norvégienne, japonaise, suisse et australienne – des domaines de la recherche et de l'industrie. Hawaï est retenue pour l'expérimentation du fait des

grandes profondeurs océaniques. Le Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority (NELHA), une institution quasi gouvernementale gérant un corridor de recherche océanique, est associé au projet afin de lui conférer une légitimité et de faciliter l'obtention des autorisations administratives. L'objectif est d'étudier la dispersion et la physique du CO_2 dans l'océan profond. Une opposition au stockage océanique du CO_2 va se développer. D'abord locale, elle suit le projet en Norvège où il est transféré avant d'essuyer un refus d'autorisation par le ministère de l'Environnement, puis se développe au niveau international, soutenue par Greenpeace et une coalition de biologistes marins qui appuient leur argumentation sur la Convention internationale pour la protection du milieu marin (OSPAR). À la fin de cette période, le stockage océanique du CO_2 n'est pratiquement plus une option pour le CCS.

Fait intéressant, à Hawaï, des caractéristiques et des événements spécifiques au site semblent soutenir et permettre la politisation du stockage océanique, tels que la présence du Hawaï Islands Humpback Whale National Marine Sanctuary où les deux tiers de la population mondiale des baleines à bosse viennent se reproduire ; des controverses au cours des années 1980 sur la gestion de son corridor de recherche par le NELHA se trouvent réactualisées par un déversement accidentel de dichlorofluoroéthane dans ce corridor alors que le projet de CSC est en cours de discussion ; la présence de défenseurs des droits des peuples autochtones qui mettront progressivement en place un collectif d'opposition au stockage océanique : la « Coalition Against CO_2 Dumping ». Ce collectif devient très actif dans l'argumentation d'une controverse sur le projet de stockage de CO_2, en utilisant notamment les médias locaux, jusqu'à ce que le NELAH se retire du projet, déplacé dans un premier temps plus loin de la côte, puis vers un autre archipel où il est à nouveau confronté à une opposition soutenue par cette coalition, puis enfin en Norvège où le refus ministériel signe son arrêt définitif. Au cours de ce processus, le stockage océanique n'est pas contesté uniquement sur le plan local à Hawaï. Les prises de position de Greenpeace ou de la Coalition sont formulées dans un registre éthique, pointant vers les conséquences potentielles de cette option pour les générations futures, rendant ainsi public un point de vue politique sur le CSC.



La période de « régime » va du lancement du processus d'élaboration d'un rapport spécial sur le CCS (SRCCS) par le GIEC – c'est-à-dire des premiers séminaires de cadrage de ce rapport par le GIEC, dans l'Alberta – jusqu'à l'adoption de la directive européenne sur le stockage géologique du CO_2, dans le cadre du troisième paquet énergie-climat.



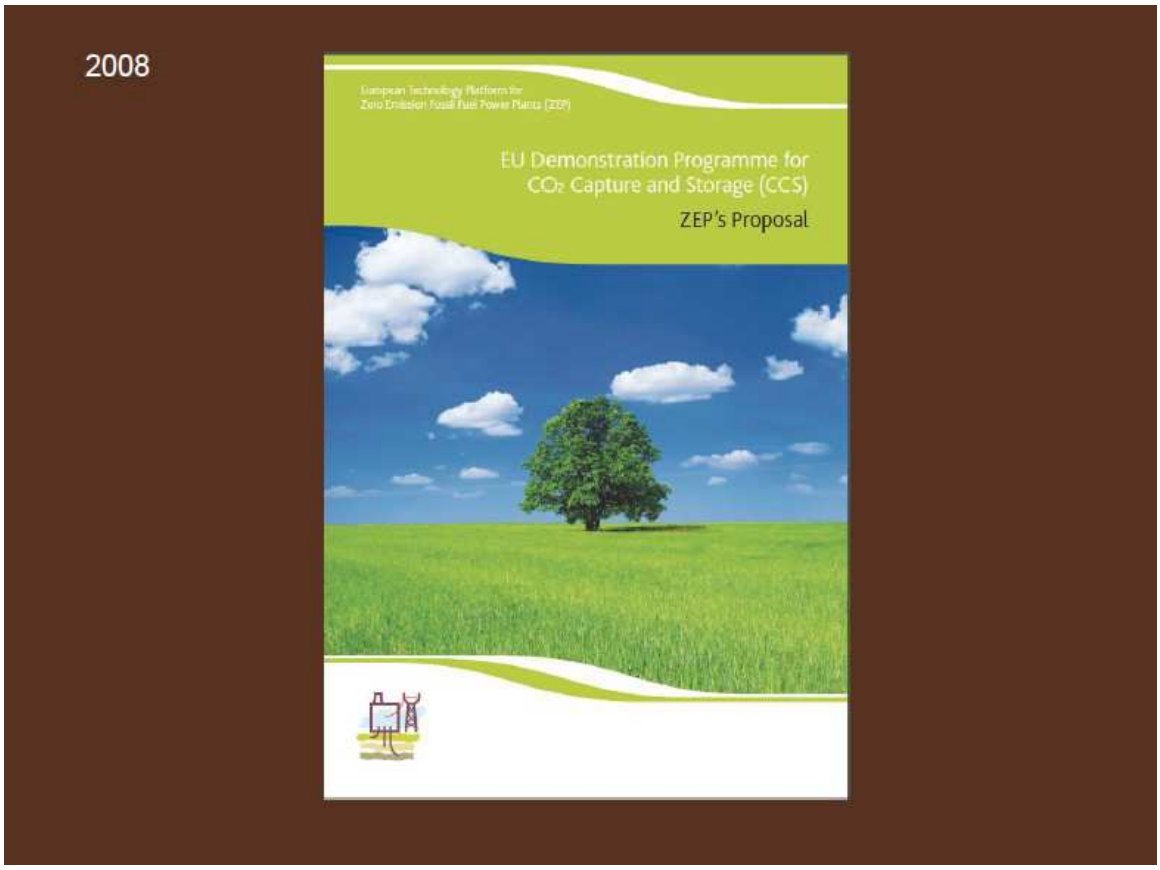
La publication du rapport SRCSS en 2005 est une étape décisive. Le rapport conclut au potentiel des technologies de CSC pour la réduction des émissions de GES ainsi qu'à l'urgente nécessité de démontrer la technologie grâce à des projets de démonstration du site.

Surtout, la justification du soutien du GIEC au CSC comme option d'atténuation est le *lock-in* institutionnel sur les énergies fossiles. En clair, seul le CSC peut combler le fossé entre l'économie carbonée actuelle et une future économie non carbonée. Le point est énoncé comme un état de fait. Greenpeace n'a de cesse d'en rouvrir les fondements pour en faire un enjeu et ouvrir un débat sur le choix de l'option CCS par l'Union européenne. En 2005, lors de la publication du SRCCS, Greenpeace, qui a collaboré au rapport, propose un contre-lecture de ses conclusions de SRCSS. Si l'association partage le constat du manque de maturité de la technologie CCS, elle conclut, pour cette même raison, à l'urgence de développer les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Pour l'association, les *lock-in* sur l'économie carbonée justifient des politiques audacieuses dans ces deux domaines plutôt que de miser nos moyens sur une technologie aux résultats et aux impacts encore incertains.

En 2007, Greenpeace publie en collaboration avec l'EREC – le Conseil européen des énergies renouvelables – un scénario sans CCS ni nucléaire pour l'Union européenne : *La Révolution énergétique.* Un an plus tard, ce dernier est suivi d'un rapport intitulé *False Hope,* pointant les risques et les incertitudes du CSC en tant qu'option pour répondre à l'enjeu climat-énergie. Un collectif d'ONG se joint progressivement à Greenpeace. Il va croître au cours de cette période, sans qu'aucune arène ne soit offerte au niveau européen afin de discuter de cet enjeu d'instruire ce qui se structure bel et bien comme une controverse.

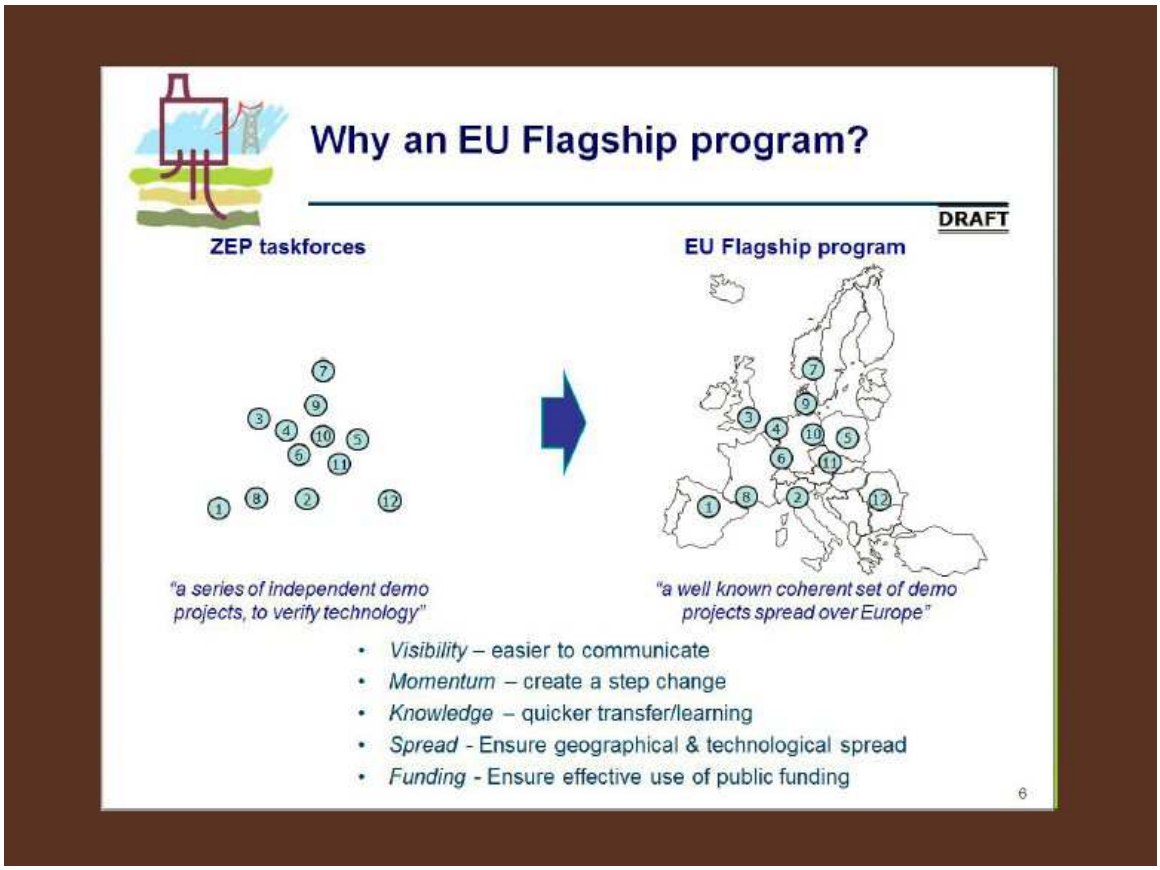
Bien au contraire, le Conseil européen s'appuie sur la rationalité et l'argumentation du SRCSS afin de justifier l'investissement de l'UE dans une politique et un programme de démonstration du CCS. La Commission prend le relais du Conseil.

La plate-forme ZEP, mise en place en 2005, joue un rôle clé dans la promotion du CCS sur l'agenda européen ainsi que dans l'opérationnalisation d'un cadre européen de démonstration.



Elle élabore un programme de démonstration européen – composé de 12 projets de démonstrateurs –, conçoit et défend la constitution de la « New Entrant Reserve » – le NER 300 – comme moyen de financement de ce programme. Le NER 300 consiste à collectiviser ce coût au sein des industriels émetteurs de CO_2 en provisionnant 300 millions de droits au moment de la création du marché européen de droits d'émissions de CO_2 (ETS). Au cours de cette période, en dépit d'une controverse structurée, la démonstration du CSC devient un pan à part entière de la politique énergie-climat de l'UE.

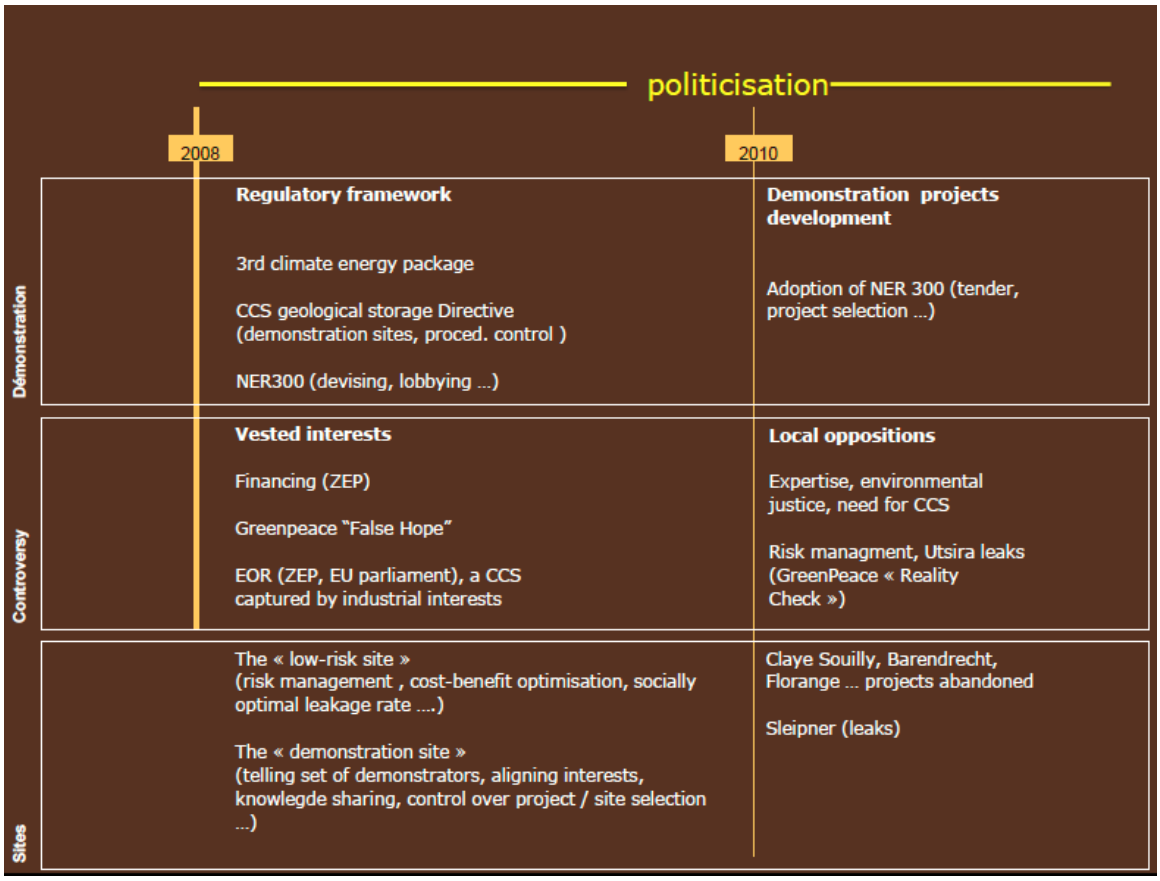
Dans ce processus, le site est une catégorie politique décisive, argumentée et débattue dans plusieurs circonstances et documents de politique publique. Par exemple, dans le SRCSS et la directive CSC, il est affirmé que la réduction de l'impact du CCS et l'amélioration de sa balance coûts/bénéfices peuvent être atteints par le choix de sites à faible risque pour développer les projets CCS. Le site à faible risque est un site qui, du fait de ses caractéristiques géophysiques, minimise par exemple les risques de fuite ou d'impact sur l'environnement. Ce choix requiert la mise en place de bonnes procédures de sélection des sites de projets. Au cours de l'élaboration de la directive CSC, la Commission propose d'orienter directement cette sélection. Elle est confrontée au refus des États membres pour des raisons de subsidiarité et n'obtient qu'un droit de regard.



Enfin, autre arène de discussion de ce site, la ZEP : les discussions internes qui accompagnent l'élaboration du programme démonstrateur portent sur la manière d'orienter les États membres dans leurs choix de projets et de sites démonstrateurs, de manière à obtenir un programme de démonstration. La démonstration requiert une catégorisation permettant de réduire et d'ordonner une multiplicité technologique pour la rendre lisible. Le CCS doit devenir « un », non plus seulement dans son concept qui ne lui confère qu'une légitimité conditionnelle, mais au travers d'une unité recomposée qui embarque les singularités des sites, des déclinaisons technologiques, des intérêts industriels et étatiques qui le composent.

Ainsi ce site, que nous pourrions appeler le « *policy-site* », le site de la politique publique, est stratégiquement convoqué dans l'élaboration de la politique CCS. Il est invoqué comme une entité sujette à codification et à évaluation de risques, potentiellement contrôlable à distance et capable d'embarquer une diversité de situations afin d'assembler une technologie CSC encore hétérogène en une démonstration unifiée. Ainsi défini, il porte une promesse – celle d'un CCS socialement bénéfique – tout en reportant la charge de la preuve vers le site et le niveau local, au moment de la concrétisation des projets. Ce faisant, il exempte l'arène européenne d'une politisation, en reportant dans le futur et vers le niveau local le débat sur le bien-fondé de l'option CCS.

	genesis		regime		politicisation	
	1996	2002		2005	2008	2010
Démonstration	**Emergence of concept, feasibility** scientific networks and programs DoE, IEA, GHG R&D Program, Climate arenas (CoP, Climate Init)	**Association with industrial referentials** international support (consortia, R&D) industrial referentials Sleipner (Ustira, visualisation), way to risk management Weyburn (EOR-CCS, know-how, data) Hawaï (ocean storage)	**Political legitimacy** SRCCS (IPCC Special report) translating science into politics potential solution feasibility need for on-site demonstration geological storage low-risk sites = cost benefit promise	**Assemblage of demonstration programme** ZEP/SRA, « demonstration programme » aligning interests MS / Commission / industry potential demonstration projects and sites	**Regulatory framework** 3rd climate energy package CCS geological storage Directive (demonstration sites, proced. control) NER300 (devising, lobbying ...)	**Demonstration projects development** Adoption of NER 300 (tender, project selection ...)
Controversy	**Ocean and /or geological storage** modeling, analogs envtal impact (ocean) reports, papers, first conferences	**Values vs risk management** geological storage , « Sleipner CO2 plume » ocean storage >> Hawaï >> Norway >> OSPAR internat. ethical, OSPAR convention	**Technological potential, need for CCS** lock-in, alternative path to CCS technological maturity of CCS possibility of managing risks	**Technological potential, need for CCS** anti-CCS NGO collective (2007) WWF pro CCS (2007) Greenpeace-EREC, « Energy Revolution »	**Vested interests** Financing (ZEP) Greenpeace "False Hope" EOR (ZEP, EU parliament), a CCS captured by industrial interests	**Local oppositions** Expertise, environmental justice, need for CCS Risk managment, Utsira leaks (GreenPeace « Reality Check »)
Sites		Sleipner (Ustira, CO2 visualisation, way to risk management) Weyburn (EOR-CCS, know-how, data) Hawaï (local to inetrnational opposition to ocean storage)	The « low-risk site » (risk management , cost-benefit optimisation, socially optimal leakage rate ....) The « demonstration site » (telling set of demonstrators, aligning interests, knowlegde sharing, control over project / site selection ...)			Claye Souilly, Barendrecht, Florange ... projects abandoned Sleipner (leaks)



Cette période avec l'adoption de la directive CSC, en décembre 2009, jusqu'à la fin de l'année 2012, clôture notre analyse et le travail de terrain.

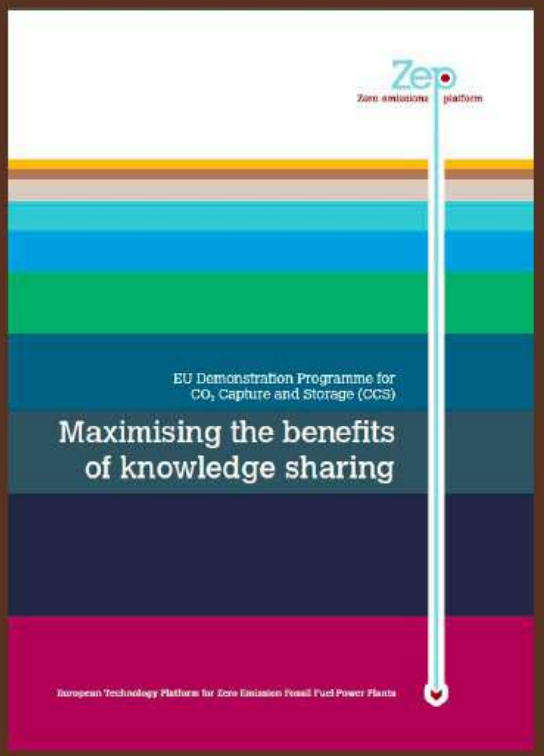
Je n'ai pas la place ici de détailler cette phase. Sur le fond, alors que le financement du projet de démonstration de l'UE trouve une solution avec le NER 300 (2011), les oppositions locales aux premiers projets CSC sur site se renforcent[5]. Plusieurs projets en cours de développement pendant cette période font face à une forte opposition locale, plusieurs d'entre eux sont arrêtés, certains de grande taille, tels que : Claye-Soully (France, 2009) ; Barendrecht (Pays-Bas, 2010) ; ULCOS Florange (France, 2012). Alors que le retrait de projet Barendrecht est une étape importante, propulsant l'enjeu dit d'« acceptabilité sociale » sur l'agenda de la politique CCS, chacun de ces cas présente des processus de politisation intimement articulé à des configurations et des ressources locales. Le mode expert, les enjeux de justice environnementale et la politique des choix énergétiques européens y sont des enjeux récurrents. Ces sites peuvent être considérés comme des sites de politisation, au sens

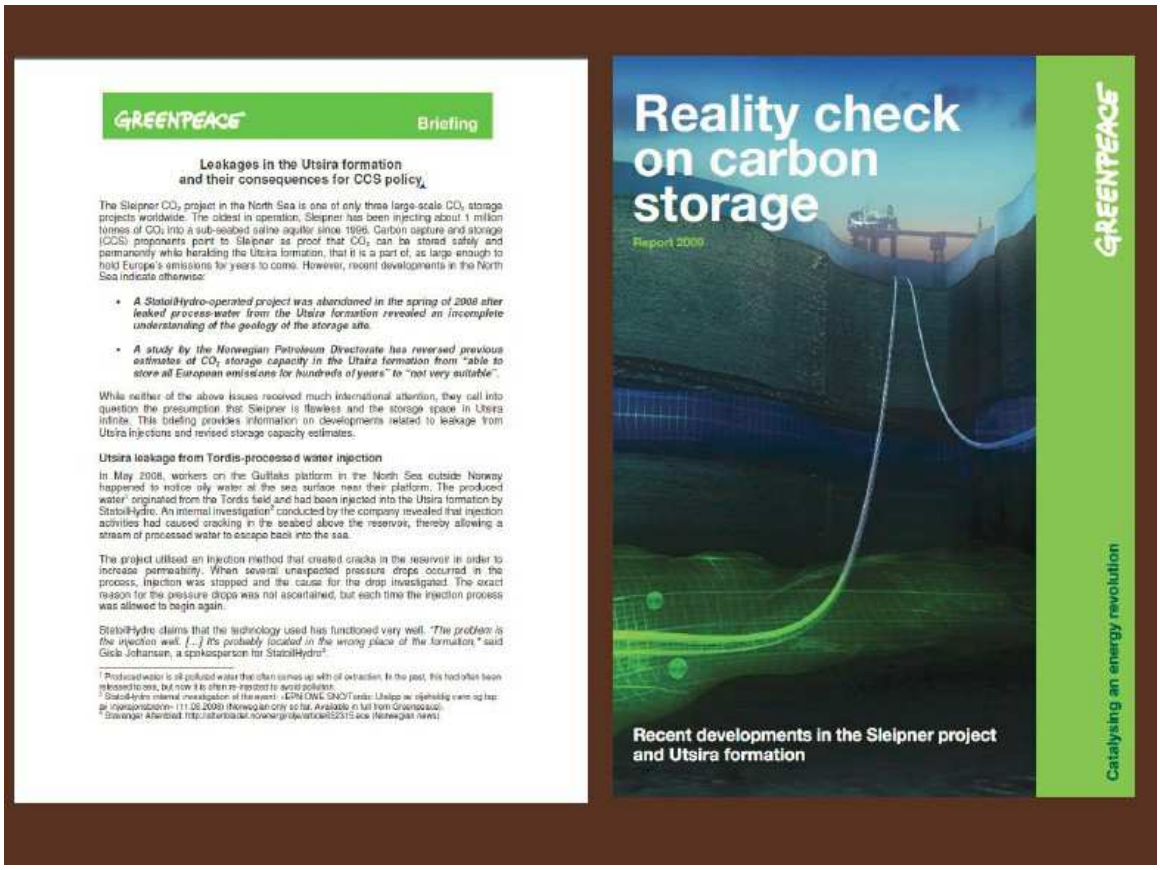
5 In 2012, 75 CCS industrial projects ser in place worldwide, incl. 21 in Europe (e.g. Norvège, Royaume-Uni, Pays-Bas). The reminder being located in the US, Canada, China and Australie. Only 16 of them are at the stage of exploitation (« activation ») incl. 10 EOR projects, the rest of the projects being under development. In the US, Canada and China CCS projects are mostly coupled with EOR.

proposé par Andrew Barry et esquissés dans ce qui précède à partir du cas d'Hawaï, c'est-à-dire de l'émergence d'une perspective politique sur l'option CCS.

2009

Zep
Zero emissions platform
Implementation of
New Entrant Reserve Funding
Zep recommendations
European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants


Zep
Zero emissions platform
EU Demonstration Programme for CO_2 Capture and Storage (CCS)
Maximising the benefits of knowledge sharing
European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants



GREENPEACE Briefing

Leakages in the Utsira formation and their consequences for CCS policy

The Sleipner CO_2 project in the North Sea is one of only three large-scale CO_2 storage projects worldwide. The oldest in operation, Sleipner has been injecting about 1 million tonnes of CO_2 into a sub-seabed saline aquifer since 1996. Carbon capture and storage (CCS) proponents point to Sleipner as proof that CO_2 can be stored safely and permanently while heralding the Utsira formation, that it is a part of, as large enough to hold Europe's emissions for years to come. However, recent developments in the North Sea indicate otherwise:

- ***A StatoilHydro-operated project was abandoned in the spring of 2008 after leaked process-water from the Utsira formation revealed an incomplete understanding of the geology of the storage site.***
- ***A study by the Norwegian Petroleum Directorate has reversed previous estimates of CO_2 storage capacity in the Utsira formation from "able to store all European emissions for hundreds of years" to "not very suitable".***

While neither of the above issues received much international attention, they call into question the presumption that Sleipner is flawless and the storage space in Utsira infinite. This briefing provides information on developments related to leakage from Utsira injections and revised storage capacity estimates.

Utsira leakage from Tordis-processed water injection

In May 2008, workers on the Gullfaks platform in the North Sea outside Norway happened to notice oily water at the sea surface near their platform. The produced water[1] originated from the Tordis field and had been injected into the Utsira formation by StatoilHydro. An internal investigation[2] conducted by the company revealed that injection activities had caused cracking in the seabed above the reservoir, thereby allowing a stream of processed water to escape back into the sea.

The project utilised an injection method that created cracks in the reservoir in order to increase permeability. When several unexpected pressure drops occurred in the process, injection was stopped and the cause for the drop investigated. The exact reason for the pressure drops was not ascertained, but each time the injection process was allowed to begin again.

StatoilHydro claims that the technology used has functioned very well. *"The problem is the injection well. [...] It's probably located in the wrong place of the formation,"* said Gisle Johansen, a spokesperson for StatoilHydro[3].

[1] Produced water is oil polluted water that often comes up with oil extraction. In the past, this had often been released to sea, but now it is often re-injected to avoid pollution.
[2] Statoil-Hydro internal investigation of the event: «EPN OWE SNO/Tordis: Utslipp av oljeholdig vann og tap av injeksjonstrykk» (11.06.2008) (Norwegian only so far. Available in full from Greenpeace).
[3] Stavanger Aftenblad: http://aftenbladet.no/energi/oje/article652315.ece (Norwegian news)

4 Conclusion

Je conclurai avec quelques considérations sur le rôle du « site » dans le processus de démonstration du CSC dans l'Union européenne.

CCS demonstration policy developed in spite of voices calling for concerns
controversy never been properly staged

the figures of the « site » have played an important role
three sites emerge from our exploration

the « political site »
site of politicisation
ocal process opens up a new political perspective on CCS
Hawaï and Barendrecht

the site of the policy [« policised » site]
"low risk" site, "demonstration" site
procedural and risk management category
a promise
anti-political character
allows postponing the debate, while keeping up the demonstration process

the site as an industrial referential
Sleipner akin to a laboratory
Weyburn and other RAP-CCS sites, more stabilised, less innovative referentials

sites role point to the fragility of this demonstration policy, as it bets on a site to which it denies a political construction.

CCs case points to issues associated with EU post-Lisbon technological governance

O'Neill R., Nadaï A. (2012) « Risque et démonstration, la politique de capture et de stockage du Dioxyde de Carbone (CCS) dans l'Union Européenne », Vertigo, 12 (1).

Dans l'Union européenne, la politique de démonstration du CSC a été développée en dépit des voix qui appelaient à mettre cette option en débat. Dans ce processus, les figures du « site » – sur lequel les projets CSC devront un jour ou l'autre être développés, si le CCS devient l'option européenne – ont joué un rôle décisif. Trois sites se dégagent de notre analyse.

Le premier est le site de politisation au sens du « *political site* », au travers duquel des ressources locales soutiennent l'émergence d'une vision politique qui dépasse ce site et ouvre une nouvelle perspective politique en matière de CSC. Hawaï et Barendrecht en sont sans aucun doute de bons exemples.

Le second est le site de la politique publique, le « *policised* » site, qui, dans ce processus, s'apparente à une catégorie procédurale et de gestion de risques. Ce site est une promesse, qui sert le cadrage politique en cours de développement. Il a un caractère anti-politique – « *anti-political* » – en ce qu'il autorise un report du débat sur le CCS, tout en maintenant le développement de la démonstration européenne.

Le troisième site est incarné par Sleipner, Weyburn et d'autres projets sur site de RAP-CSC. Ces sites font fonction de référentiels industriels. Ce sont des sites dans lesquels des expérimentations singulières peuvent être développées en situation pour être traduites, codifiées et

diffusées au sein de réseaux scientifiques et institutionnels afin de gagner en généralité. Ils servent tous deux de référence et de symbole, attestant du potentiel industriel de la technologie CSC. Pour autant, alors que Sleipner-SACS s'apparente par bien des aspects à un laboratoire et se revendique en tant que référence scientifique – à savoir une expérimentation contrôlée et une traçabilité des résultats –, Weyburn ou les autres sites RAP-CSC correspondent à des référentiels plus stabilisés et moins innovants.

Ces trois sites jouent un rôle décisif dans le développement et le cours pris par la démonstration CCS UE. Ils soulignent également la fragilité de cette politique de démonstration, en ce qu'au travers du « *policised site* », elle parie sur un site codifiable, encore virtuel mais a-politique, auquel elle n'accorde quasiment aucune construction politique.

Au-delà du CCS, ce cas d'étude pointe vers un enjeu d'analyse décisif en ce qui concerne la transition énergétique.

Il s'agit de la gouvernance technologique européenne qui a émergé depuis le sommet de Lisbonne en 2000. Cette gouvernance s'articule aujourd'hui autour d'une quarantaine de plates-formes technologiques dont l'activité se trouve consacrée, en tant qu'entité habilitée à produire des visions, des agendas et des cadres d'investissement, dans les récents textes sur l'Europe de l'innovation et les partenariats public-privés. Comme le montre le cas CCS et les déplacements du rôle de la ZEP au cours des années étudiées ici, cette gouvernance s'invente chemin faisant : par volonté de croissance et par besoin de financement, elle met l'industrie au cœur de sa stratégie sans forcément s'équiper des organes de réflexivité et de mise en politique qu'appellent les enjeux qui sont au cœur de la transition énergétique.

Francis Chateauraynaud : Alerter, débattre ou mobiliser. Les controverses publiques entre critique régulatrice et critique radicale

Francis Chateauraynaud, Groupe de Sociologie Pragmatique et Réflexive, EHESS.

Afin de rebondir sur ce qui a déjà été dit, je propose de commencer par évoquer un des maîtres de la balistique, Lazzaro Spallanzani, bien connu des historiens des sciences. Auteur d'expérimentations assez incroyables à la fin du XVIIIe siècle, notamment sur les grenouilles, il incarne typiquement une forme d'érudition scientifique prisée à l'époque, et a fait des choses assez étonnantes. En particulier, il a commis un traité du ricochet, intitulé plus précisément *Lancers et rebonds de pierre sur l'eau* (1765), qui n'a été traduit que récemment en français. À cette occasion, j'ai découvert qu'il existait une Fédération mondiale des ricochets. Or la figure du ricochet est intéressante à plus d'un titre, car le geste du lanceur se prolonge sous la forme d'une série d'interactions successives entre le galet et la surface de l'eau, jusqu'à sa disparition finale. C'est bien sûr une image, mais il en va ainsi de bien des causes et des controverses publiques. D'ailleurs, à bien écouter les échanges, le mot « rebond » sort régulièrement dès qu'on parle de la dynamique des affaires ou des controverses. Rebondir, c'est aussi et surtout ressurgir selon une trajectoire qui n'est pas linéaire mais dont on peut prendre une vue d'ensemble, *ex ante* comme *ex post,* sous la forme d'une courbe plus ou moins chaotique.

J'abuse parfois de cette notion de surgissement mais dans les controverses qui nous intéressent, il n'y a pas toujours deux camps face à face, et de multiples acteurs surgissent et viennent peser plus ou moins fortement sur la trajectoire des dossiers. Les exemples sont nombreux. On peut penser au cas des brasseurs de bière qui, en Allemagne et en Pologne, viennent se mêler des projets d'exploration et d'exploitation des gaz de schiste, ou, dans le dossier des OGM, aux apiculteurs qui ont surgi en tête des cortèges en mettant en avant les risques non seulement pour les abeilles mais pour la biodiversité en général – ce qui d'ailleurs avait mis en colère des chercheurs de l'Inra dénonçant ce qui était à leurs yeux de véritables « amalgames ». L'entrée en lice d'un nouvel acteur fait souvent l'objet de disputes dans la dispute, et on peut analyser ces phénomènes pour eux-mêmes, mais ce qui est intéressant c'est ce que cela révèle sur les milieux en cause, dont la mobilisation ou l'interpellation traduisent le concernement – au sens ici de la notion consacrée par de multiples textes internationaux, celle du public concerné (*public concerned*). Les publics ne sont pas

définis par avance et les surgissements au fil des événements ou des épreuves doivent faire l'objet de toute notre attention. La notion de milieu est très générale et ne vise pas seulement des opposants. Par exemple, des « rationalistes indignés » peuvent intervenir dans un débat, comme on l'a vu à l'occasion de l'affaire Séralini. Il suffit d'aller sur le site de l'AFIS – Association française pour l'information scientifique – pour voir comment s'organise une ré-action, un milieu, dont les intérêts et les représentations s'affirment du même coup, se sentant dans la nécessité de réagir à ce qui est dit publiquement, notamment dans les médias. Mais quand on parle de milieux, dans la sociologie contemporaine, il s'agit de toutes sortes de milieux, humains ou non humains pour parler comme Bruno Latour ou Philippe Descola. C'est ainsi que j'ai particulièrement regardé le cas du surgissement d'algues ou de méduses dans les tambours de réacteurs nucléaires en zone côtière…

Bref, des éléments surgissent et viennent déranger les procédures, les scénarisations, les arguments qui s'étaient à peu près stabilisés publiquement et qui permettaient de décrire tranquillement des jeux d'acteurs sur de longues périodes, avec des promoteurs et des contestataires bien identifiés. Pour reprendre le cas développé précédemment, on peut certes parler d'un agir contestataire dans le champ du nucléaire, mais les porteurs de la critique et les acteurs de la protestation ne sont pas toujours les mêmes, leurs alliances et leurs coalitions, leurs appuis et leurs prises collectives varient : et d'ailleurs, le Réseau Sortir du nucléaire et Greenpeace entretiennent des rapports très compliqués, l'ennemi commun ne suffisant pas toujours à fonder des accords durables. Dans le cas d'espèce, il s'agit de logiques d'action et d'agendas très différents, avec une hiérarchisation des problèmes parfois antagonique, et surtout des modes d'intervention distincts. D'ailleurs, Greenpeace joue beaucoup les surgissements, par exemple en organisant des intrusions sur des sites de centrales nucléaires. Sous la notion de controverse, nous n'avons donc pas affaire à des espaces plans sur lesquels se projettent simplement des jeux d'acteurs et d'arguments, mais bien à des processus de surgissement, de déplacement et de rebondissement.

Autre exemple marquant de la période récente, celui des « singes du futur » : ils surgissent au milieu d'un forum consacré à la biologie de synthèse. La scène a eu lieu au Cnam en avril 2013, mais elle est bien sûr filmée et disponible en ligne, ce qui renvoie à l'organisation de la portée des prises de parole ou des actions collectives qui peuvent s'inscrire dans la durée. Et donc, au cours d'une discussion publique autour de la biologie de synthèse, on voit surgir des gens portant un masque visant à incarner les générations futures : c'est une allusion à une polémique sur le transhumanisme, selon lequel ceux qui n'auront pas accepté les nouvelles technologies, restant simplement humains, seront les singes du futur – quand la biologie de synthèse aura réalisé les anticipations, plus ou moins fantastiques, imaginées par Craig Venter à partir de ses expérimentations sur les cellules artificielles. L'action engage ainsi, outre la critique de la procédure de discussion publique conçue comme un dispositif d'acceptabilité, les générations

futures. Mais elle procède aussi par association de causes, car les intrus portaient un masque ressemblant à celui des Anonymous. La question de la fédération des causes est importante dans l'analyse des controverses, car, on le voit à l'évidence dans le cas de l'énergie, les dossiers et les processus critiques qu'ils traversent ne sont pas indépendants et donnent lieu à des transpositions ou des convergences, ce qui nourrit en retour les controverses sur les objets en cause.

Il faut donc constamment se placer en amont des opérations de cadrage (*framing*) par lesquelles se fixent, mais aussi se déplacent ou se déforment les objets de controverse. Pour répondre à l'exposé d'Olivier Godard, dont je connais bien les travaux puisque cela fait des années que nous nous croisons, notamment autour des questions de risque, d'incertitude et de principe de précaution, il y a évidemment une partie avec laquelle je suis parfaitement d'accord et pas mal de points de désaccords. La formule concernant les tropismes est assez juste mais je pense qu'il faut aller plus loin, en commençant par remonter à la philosophie de la controverse. Je vais m'appuyer ici sur un philosophe qui n'est pas beaucoup lu en France, Marcelo Dascal, et qui a proposé sur ce point une distinction analytique fort utile. Selon lui, au fond, il y a trois processus différents :

- Il y a d'abord la discussion. Les participants visent ici la coopération. Ce qui ne veut pas dire que c'est simple et monotone : car cela peut prendre du temps une discussion. Par exemple sur l'Iran : ce pays peut-il développer du nucléaire civil sans faire l'objet de soupçons sur ses intentions géopolitiques ? La discussion peut être interrompue par des moments de tension, par des crises, mais, comme on dit, on peut « reprendre la discussion » – et sous-entendu, c'est déjà là quelque chose d'essentiel. Dans la discussion, les échanges d'arguments sont marqués par une activité collaborative visant la clarification, la sélection et la coordination des arguments en vue d'une décision coordonnée. Une école d'argumentation, longtemps dirigée par Frans van Eemeren aux Pays-Bas, a particulièrement développé des outils d'analyse des processus par lesquels les protagonistes visent la résolution des tensions ou des contradictions en entrant dans un processus argumentatif de nature coopérative.

- A l'opposé, il y a la dispute. La vaisselle commence à voler et, à la limite, tous les coups sont permis. La loi du plus fort est l'horizon de développement de toute dispute et cela n'avait pas échappé à Schopenhauer dans son traité d'éristique, ou l'art d'avoir toujours raison, dont un des ultimes conseils revient en gros à dire : « À la fin, si vous ne parvenez pas à faire changer d'avis votre interlocuteur et à le faire taire, collez lui une claque ! » Avec la dispute, on ouvre une épreuve de force dont on ne connaît pas vraiment le terme, et dans le meilleur des cas, on s'en tient au constat d'un profond désaccord – *deep disagreement*.

- Et Marcello Dascal loge la controverse précisément comme une figure instable entre les deux précédentes. La controverse peut ainsi conduire vers la coopération, l'accord ou le consensus, ou, au contraire,

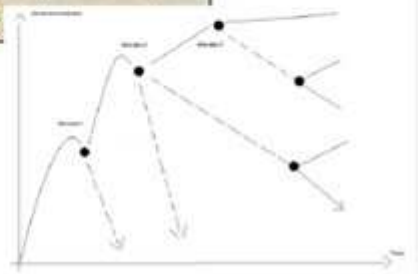
vers le dissensus, le désaccord, le différend. Dans ce contexte, l'argumentation joue un rôle essentiel de distributeur des points de convergence et de divergence, même si le plus souvent les acteurs argumentent en faveur de leurs causes sans intention de changer de position, ils sont conduits à faire des concessions, à laisser tomber des pans entiers d'arguments, à reprendre au moins partiellement le point de vue des autres. Et si l'argumentation va plutôt vers la séparation des points de vue que vers leur conciliation, la controverse a pour vertu de clarifier les attachements, les valeurs, les formes de raisonnement. C'est ce qui permet de voir dans certaines controverses des conflits réussis.

Donc c'est en se plaçant à ce point d'observation des différents processus possibles que, me semble-t-il, la sociologie peut contribuer à l'intelligibilité des dossiers et de leurs trajectoires essentiellement non linéaires. En partant d'emblée d'une balistique, fondée sur l'idée de trajectoires non linéaires et de constants rebondissements, on ouvre de nouveaux chantiers et on les met en partage. Il ne s'agit pas simplement de collectionner des « *case studies* » en mettant côte à côte les OGM, le nucléaire, les gaz de schiste, les pesticides, le climat, les nanotechnologies, etc. Il s'agit de comprendre ce qui, dans un contexte historique donné, fait argument et ce qui, comme dirait Pierre Livet, un autre philosophe que j'invite à lire, peut faire basculer ou bouger un ensemble de croyances. Car si les controverses de longue portée rendent visibles des positions arrêtées, comme figées dans le temps, elles rendent aussi manifestes des processus de révision et des modifications parfois profondes des dispositifs d'action et de décision – la doctrine de sûreté a été complètement revue après Fukushima, les modèles agricoles n'ont plus la même distribution dans l'espace des possibles après les mobilisations anti-OGM et la fracturation hydraulique fait désormais l'objet de contraintes fortes, certes variables selon les pays et les configurations politiques, mais qui ne peuvent plus être ignorées par les acteurs économiques.

Précisément, pour les économistes, on touche ici un point fondamental : car on n'est pas en présence de tables de préférences stabilisées et on a des acteurs qui tout à coup n'y croient plus ou changent leurs préférences. Je prenais souvent le cas de Nicolas Hulot sur le nucléaire, bien que ce soit un peu facile : après Fukushima, il ne croit plus au nucléaire ou plus du tout comme avant ; d'aucuns y ont vu surtout une opération d'adaptation au jeu politique liée à la primaire des écologistes, mais il appartient à la série des exemples de révision des croyances. En tout cas, face à l'hypothèse pas assez discutée selon laquelle les débats publics ne servent à rien sinon à cristalliser des positions déjà faites, en suivant l'évolution des confrontations au fil du temps, on observe des déplacements qui ont de sérieuses conséquences pratiques, en premier lieu sur ceux qu'on appelle les « décideurs ».

Bref, plein de choses surgissent qui n'étaient pas dans l'agenda politique, ni dans l'espace de calcul des acteurs, pour utiliser un jargon que je partage avec Michel Callon et quelques autres. Des éléments

sont acheminés, des événements se produisent, des voix se font entendre qui vont contraindre à revoir les manières de raisonner, de calculer, de scénariser, etc. Cela engage des notions d'apprentissage, à travers lesquelles les acteurs se nourrissent de tout ce qui se trame entre les deux figures, celle de la discussion et celle du désaccord total qui ne bouge pas. Dès qu'on remet les choses en histoire à partir d'une pluralité de sites ou de sources et qu'on descend à un certain niveau de profondeur, on voit que des objets changent de statut, que se modifient des représentations et que se redistribuent les cartes entre les acteurs. Et donc, au total, cette notion de controverse est à prendre dans une dynamique – dont le premier modèle de balistique sociologique proposé n'est qu'une esquisse mais que cette planche tirée de Gaston Lagaffe résume assez bien.



La balistique de Gaston Lagaffe et de son chat / Rebondissements et points de bifurcation

Les points de bifurcation, autour desquels se jouent des trajectoires différentes, chaque acteur cherchant à donner une direction déterminée au processus sans y parvenir, à moins de prendre complètement le contrôle de la balle, c'est finalement une représentation graphique assez juste de ce qu'essayent de décrire les modèles sociologiques des controverses. Pour en saisir les transformations et en représenter les enjeux, on ne peut pas se contenter de parler de « cartographie » – au sens du courant « *mapping controversies* ». Il nous faut des modèles dynamiques parce qu'effectivement ça se déplace, ça rebondit, ça repart et on n'a pas du tout les mêmes phénomènes (de réception, d'interprétation, de rétroaction) selon les milieux et les échelles que l'on prend en compte.

Mais au-delà de la métaphore et de son caractère heuristique, qu'est-ce qui produit un rebondissement ? Il me faut revenir ici aux sources identifiées de relance des épreuves ou de génération de bifurcation ou de points de basculement. Pour qu'un processus rebondisse et que la controverse soit rouverte ou relancée, il y a trois phénomènes qu'il est

important de distinguer : la rupture du fait des choses (catastrophe, accident) ; le coup intentionnel (attaque, mise en cause, décision) ; la convergence, souvent lente et peu perceptible par la plupart des protagonistes, de processus jusqu'alors dissociés, et que personne, à l'exception de visionnaires rarement pris au sérieux, n'a pensé à rapprocher – comme on dit on ne faisait pas le rapport ou on en minorait la pertinence (entre l'augmentation de cancers et l'exposition à un toxique à faible dose…).

Les rapprochements prennent du temps pour être rendus saillants et intelligibles et produire leurs effets. Prenons le cas du nucléaire et du climat. L'argument du nucléaire qui sauve le climat présente une trajectoire intéressante, rendue visible notamment après Kyoto. Dans un article, j'ai regardé comment s'est formé et a cheminé ce nouvel argument, qui naturellement, a aussitôt mis en colère un nombre d'antinucléaires. Mais ce qui est notable, c'est qu'il leur a fallu du temps pour élaborer des contre-arguments crédibles – car cela prend du temps de construire des arguments, ils ne surgissent pas *ex nihilo* par le simple jeu de la confrontation, à l'image des joutes oratoires longtemps privilégiées par la tradition rhétorique. Déconstruire l'argument du nucléaire sauveur de la planète face au processus de réchauffement annoncé par le GIEC a notamment consisté à mettre en série des événements extrêmes et différents stress environnementaux ou technologiques liés précisément au changement climatique : problèmes d'eau, du débit des cours d'eau et des sources de refroidissement, montée des eaux et tempêtes extrêmes en zones côtières, incendies, épisodes de froid intempestifs, etc. Face au réchauffement, le nucléaire va lui-même être pris dans des turbulences, et de fait la multiplication des événements, de la tempête de 1999 à Sandy aux États-Unis en 2012, en passant par la canicule de 2003 ou les incendies russes de 2010, ont fourni de la matière à ce contre-argument. Et, encore une fois, un contre-argument ça se fabrique dans le temps, et ça passe par un travail cognitif et politique qui engage les acteurs qui le portent.

Mais revenons sur les trois manières de faire rebondir et de produire ces *turning point,* ou *tipping points,* c'est-à-dire éventuellement de l'irréversibilité, au moins sous la forme du précédent, de l'avant et de l'après. C'est le cas, par exemple, de l'affaire Séralini : il y a un avant et un après, et on ne discute plus des OGM de la même manière, pas seulement en France, mais aussi en Europe, à l'EFSA, dans les agences internationales, etc.

- Le coup stratégique

Le premier modèle est celui qui intéresse beaucoup les sociologues classiques puisqu'il tombe sous le concept de stratégie, ou pour le moins d'acteur stratégique. Le rebondissement est le produit d'un coup – au sens de coup de théâtre, mais aussi de coup dans un jeu. Des acteurs peuvent calculer leur coup, en essayant d'intervenir, notamment en anticipant l'agenda politique : car, très souvent, les périodes électorales ouvrent des fenêtres d'opportunité, comme on dit en science politique. On peut aussi anticiper la date de remise d'un

rapport ou d’un processus parlementaire, quelque chose qui est attendu. Plus le coup incorpore les attentes collectives et plus il a de chances de réussir – mais il arrive aussi qu’un coup bénéficie du vide relatif ou d’espaces laissés vacants par l’espace politico-médiatique.

Dans sa forme pure, le coup qui réussit, c'est de la balistique à l’ancienne : on a un tireur, une cible et un processus d’ajustement du tir – même si sur le terrain, le tireur a intérêt à être mobile et à se préparer à des contrecoups. Parfois, ça échoue : le coup rate sa cible, tombe dans une sorte de no man’s land ou atteint des entités non visées – selon la figure des dommages collatéraux. La sociologie des causes et des controverses doit traiter tous les cas de figure, en essayant de comprendre ce qui a marché et ce qui n’a pas marché. Il n'y a pas de raison de rejeter les causes perdues, un peu comme dans l’exigence de symétrie de la bonne vieille sociologie des sciences. On travaille aussi sur les échecs, pourquoi ça n’a pas mobilisé. Pourquoi, par exemple, la cause des particules fines n’est toujours pas en haut de l’agenda des politiques alors qu’il y a à l’évidence de multiples alertes et des acteurs plus que concernés, comme les cyclistes, dont je suis… Depuis 2012, l’OMS a requalifié le Diesel comme cancérigène certain et pourtant ça ne bouge pas. Il y avait quinze personnes en juin 2013 devant la préfecture, malgré le recours aux réseaux sociaux. Vélorution et d’autres acteurs ont du mal à enrôler autour de cette cause. Il faut de grands pics de pollution, et encore, ça ne prend pas vraiment. Cela eut basculé si un coup avait été lancé, par exemple une plainte tombant en période électorale… Mais peu importe ici, ce qu’il faut retenir, c’est qu’il y a des causes qui prennent, d'autres qui ne prennent pas. Le coup de Vélorution en juin, il a fait flop. Quand ça tombe à l’eau, il ne se passe rien, le ricochet raté. Je note pour l’anecdote que le record du monde enregistré est de 58 ricochets. C’est un Américain, assez spécial comme gars, mais cela indique aussi que, dans nos affaires, il y a des performers, des spécialistes de la performance, capables de donner une portée à une cause ou de la faire rebondir.

- La rupture catastrophique

Le deuxième modèle, c’est l'événement de rupture que personne n'a programmé. Il n’y pas de coup, il n'y a personne derrière Fukushima à ma connaissance ou d'autres événements catastrophiques comme Xynthia, Deepwater Horizon ou Lac-Mégantic. Des forces subitement se déchaînent. Ça peut être un plafond qui tombe sur des gens, à Roissy ou n'importe où, ça se produit constamment. L’enjeu est ici dans la préparation et le dispositif de vigilance et d’alerte en amont.

L’événement est suffisamment marquant pour créer une rupture dans la chaîne des acteurs et des arguments, des dispositifs et des dispositions. Dans un site industriel, une explosion, un risque mal calculé, un dispositif de sécurité défaillant… La logique d’enquête va bien sûr chercher des causes et des responsabilités dans la manière dont était conçu et piloté le dispositif mais tout le monde est pris de court – et sauf révélation qui renverse l’interprétation, en faisant basculer dans le premier modèle (on se souvient de la controverse sur

AZF, accident ou acte de terrorisme), la catastrophe a surtout pour vertu de faire remonter des choses enfouies, oubliés, méprisées comme négligeables : le détail est l'epsilon du calcul de risques, et il peut tout faire basculer – d'où la formule magique : « le risque zéro n'existe pas ».

Olivier Godard a fait allusion à la montée d'affaires qui auraient pu rester confidentielles, comme certaines affaires d'expulsions de sans-papiers – bien que, dans ce cas, la cause ait déjà été construite, qu'il y ait des précédents, des acteurs concernés, des controverses sur les dispositifs de régularisation, etc. Cela ne part pas de rien comme certaines « affaires people ». Il est vrai qu'il y a parfois des choses qui montent et dont on se demande bien comment elles ont pu mobiliser, alors que d'autres ne sont pas du tout relayées. Il reste que l'opposition bien travaillée par les philosophes de l'intentionnel et de l'inintentionnel – Events and Actions chez Davidson – est au cœur des processus et qu'il est décisif de regarder comment les rebondissements sont saisis et interprétés sous ce rapport. Comparé au coup stratégique, la rupture catastrophique n'obéit pas du tout à la même logique et le renversement produit n'a pas les mêmes conséquences. L'essentiel est de saisir les deux processus dans le même cadre d'analyse et de ne pas tout rabattre sur un seul modèle.

- La convergence graduelle

Entre l'événement et l'action, il y a place pour un troisième modèle, lequel a été particulièrement travaillé depuis les recherches consacrées aux lanceurs d'alertes : c'est la convergence progressive, souvent invisible, de causes qui se fédèrent graduellement, ou par à-coups, en circulant des espaces que Claude Gilbert qualifierait de « discrets » : processus silencieux, arènes discrètes ou peu visibles, on est ici face à des causes qui n'ont pas encore trouvé leur espace d'expression. Quand on évoque la question, les gens ne comprennent pas de quoi il s'agit et ne voient absolument pas le problème. Prenons l'exemple des perturbateurs endocriniens. Il y a encore trois ans, seule une poignée d'acteurs concernés savaient de quoi il retourne – et pourtant ils ont déjà une longue histoire. Dans les médias, à part Stéphane Foucart, toujours en avance sur ce genre de dossier, peu de journalistes ont vu venir le problème. Cette problématique n'était pas très française, et il a fallu le bisphénol A, enfin plus exactement la figure du biberon. Un cas d'usage du principe de précaution, qui évoque le rapport de l'Agence européenne pour l'environnement : Late Lessons from Early Warnings ! Il est sans doute déjà trop tard, mais il me semble qu'on est face à un cas d'usage pertinent du principe de précaution, controversé dans d'autres dossiers comme on sait – dont les ondes électromagnétiques. En tout état de cause, on découvre un peu tard que les produits chimiques sont partout. En fait le processus a cheminé sous les radars. Des chercheurs, des groupes comme le Réseau Environnement Santé, des agences sanitaires, œuvraient depuis des années à faire bouger les lignes de la toxicologie et de l'endocrinologie. Les éléments acheminés, épars, forment progressivement système et, avec le bisphénol A, apparaissent en bloc,

obligeant du même coup certains acteurs à bouger, notamment les industriels. À partir de là, plusieurs niveaux de controverses se mêlent, les activistes vont chercher les conflits d'intérêts, les journalistes relayent toutes sortes d'alertes, par exemple sur les cosmétiques. Ça bascule tous azimuts dans le dévoilement et la dénonciation, mais on a, au final, un bloc interprétatif collectif qui s'est imposé.

Cette convergence lente, graduelle, que peu d'acteurs voient venir, n'est ni intentionnelle ni non intentionnelle. Elle procède par rapprochements de visions hétérogènes et par la création de possibilités qui n'étaient pas entrevus antérieurement – et donc non calculables –, certains acteurs s'efforçant de tirer au clair les choses là où d'autres ne comprennent pas de quoi il s'agit ou n'y croient pas. Si l'on revient sur le cas des gaz de schiste en France, peu d'acteurs voyaient de quoi il s'agissait fin 2010 et dans les administrations concernées, ce n'était pas constitué clairement comme un problème, d'où l'affaire des permis délivrés. Lors d'interviews avec des régulateurs, des chercheurs et des ONG aux États-Unis en septembre 2010, à propos d'autres objets de controverse, il nous avait été indiqué que des controverses avaient émergé autour du « *fracking* » (terme dont on ne saisissait pas la signification sur le coup). La plupart des interlocuteurs pensaient qu'il y aurait essentiellement des problèmes locaux, avec quelques querelles plus générales sur la maîtrise des technologies par les industriels et des conséquences sur les ressources en eau, mais il faut attendre la convergence de plusieurs sources critiques pour voir se former un front antifracturation hydraulique, puis plus largement antigaz de schiste. Pouvoirs publics et industriels n'avaient pas du tout anticipé les controverses et les conflits – les Canadiens les premiers avec la montée en puissance des protestations au Québec, puis en France avec la réactivation de réseaux, liés notamment aux luttes anti-OGM – entre nous, quelle idée de projeter des explorations sur le Larzac à deux pas de chez des « activistes » célèbres !

Bien sûr, on peut se demander s'il n'y a pas un plan, et dans les opérations de dévoilement critique, d'aucuns pensent qu'il y avait une stratégie orchestrée par les pétroliers, ce qui n'est visiblement pas le cas en France. Dans ce cas, on revient vers la figure 1. C'est la figure des coups stratégiques qui est utilisée lorsqu'on parle de production du doute ou de l'ignorance, figure interprétative selon laquelle certains acteurs favoriseraient la multiplication des controverses, ce qui permettrait de faire d'autres coups en douce… Quoi qu'il en soit, les processus controversés sont à saisir dans leur dynamique complexe, sans figer *a priori* le cadre interprétatif et en les remettant dans leur histoire politique sur la longue durée, permettant de comprendre les points d'irréversibilité franchis par certaines causes ou certains projets.

Dans tous ces processus, il y a bien évidemment la question des formes d'expertise et de leurs confrontations. Au fil des alertes et des controverses, quatre formes d'expertise se sont imposées comme incontournables. Ces différents modèles ont en commun de briser le monopole de l'expertise et les asymétries de pouvoirs et de savoirs qui

l’accompagnent, pour introduire de plus en plus de contradictoire. C’est un point sur lequel insiste depuis longtemps Marie-Angèle Hermitte et qu’elle redéploie dans son dernier livre *Le droit saisi au vif*. À ce propos, il serait intéressant de faire entrer des juristes dans la discussion sur les questions énergétiques. La prose de décision fondée sur le contradictoire, c’est l’apanage du tribunal ou de l’instance de recours fondée sur le contentieux, ce qui a été longtemps jugé inopérant ou problématique dans l’évaluation et la gestion des risques, comme une sorte d’aveu d’échec. Or, aujourd'hui, la pluralité des expertises et la nécessité de leur confrontation se sont imposées, et on aura du mal à faire machine arrière, d’autant que cette contrainte de mise en débat des expertises s'est imposée comme norme de gouvernance. Mais, celle-ci recouvre quatre modalités assez différentes, qui ne sont pas forcément en concurrence et peuvent se superposer.

1. La première figure est celle de l’expertise/contre-expertise. Elle concerne surtout des arènes dans lesquelles des groupes entrent en lice avec des expertises constituées. C’est le cas lorsqu’une ONG qui évalue un projet technologique ou, par exemple, lorsqu’un groupe comme négaWatt propose des scénarios alternatifs rendus visibles à l’occasion du débat sur la transition énergétique. La balistique du modèle négaWatt est très intéressante à retracer, car elle ne va pas de soi au début, donnant l’impression de procéder d’acteurs quelque peu marginaux et finalement elle parvient à structurer pas mal de scènes de discussion. En pratique, la confrontation directe entre expertise et contre-expertise peut se déployer sur des scènes multiples mais le tribunal reste une des arènes dominantes. Pour le décideur, c'est assez pratique finalement. Il y a un conflit, il faut le trancher. La figure du juge s’impose et sa décision motivée oriente vers une solution – même si celle-ci est de nouveau contestée.
2. La deuxième forme qui s’est imposée est celle de l’expertise collective. Elle s’est beaucoup développée dans les agences, notamment autour des questions sanitaires et environnementales. On réunit les meilleurs experts en s’efforçant d’assurer une dimension interdisciplinaire. Bien sûr, il y a toujours des exclusions, soit pour cause de conflits d’intérêts trop visibles, soit du fait de lignes de forces qui créent des positions marginales ou dissidentes. Donc il y a des problèmes de définition du collectif des experts pertinents et légitimes. Il y a des fragilités mais la collectivisation des expertises a surtout pour effet de contraindre à la quête d’un consensus – ce qui n’est pas la même chose que l’obligation de trancher issue de la première figure. On a en quelque sorte changé de régime épistémique et de contrainte axiologique pour employer quelques mots grossiers, puisqu’on n’a pas du tout les mêmes objectifs. Il ne s'agit pas de trancher mais d’exprimer un état de connaissances faisant consensus. À un second niveau, comme dans le cas du Haut Conseil des biotechnologies (HCB), on peut

faire valoir les avis minoritaires, les points de désaccords. Il y a tout un ensemble de stratégies possibles. De ce point de vue, le GIEC est un modèle beaucoup utilisé, et qui a lui-même pas mal évolué, on le sait. Il y en a d'autres. Récemment, il y a eu l'expertise collective sur les pesticides, qui a produit une reconfiguration de ce lourd dossier qui n'est pas nouveau loin de là et qui ne va pas cesser de rebondir. Il y a bien sûr des acteurs que ça fâche, mais en tout cas, l'expertise collective est une forme normalisée de production de l'expertise aujourd'hui.

3. La troisième forme qui n'a pas été clairement identifiée par la littérature et pourtant elle produit de multiples effets de structuration : c'est l'expertise distribuée. Elle renvoie à un processus moins formalisé de production continue d'expertises par des acteurs distribués dans des champs, des réseaux ou des instances non coordonnés. Il suffit de regarder la production des études, des rapports, des avis qui finissent par saturer l'espace des possibles et servir d'appuis aussi bien aux décideurs qu'aux groupes contestataires. C'est tantôt une agence européenne ou une institution internationale – EFSA, UNEP, OMS –, tantôt une ONG ou un bureau d'étude, tantôt une publication fondée sur une méta-analyse dans une revue, etc., un rapport parlementaire, dans le style de ce que produit l'OPECST, etc. On a ainsi une forme d'expertise distribuée qui en fait n'appartient à personne mais qui produit l'air de rien des standards, des références, des lieux communs, bref de la normalisation – ce qui très souvent ne se voit pas mais se manifeste sous forme de clôture de luttes définitionnelles. Ça correspond assez bien au processus de convergence dont j'ai parlé tout à l'heure. L'air de rien, les manières de penser et les outils se sont déplacés vers une forme de dispositif cognitif collectif sans véritable auteur-acteur.

4. Il reste la quatrième, celle qui crée le plus de tension et de polémique. Et même au CNRS, ici même, elle a provoqué quelques tiraillements : appelons-la l'expertise participative, ou expertise dialogique, en écho aux forums hybrides des auteurs d'*Agir dans un monde incertain* – enfin dans un monde plus ou moins incertain, parce que tant que la vie quotidienne est possible, c'est bien qu'il reste quelque certitude comme dirait Wittgenstein… Dans cette forme d'expertise, on rapproche des gens qui n'ont rien à faire ensemble. Il faut lire sur ce point ce que dit Marie-Angèle sur les conférences de citoyens – et c'est un secret de polichinelle mais il va y avoir une conférence de citoyens sur les déchets radioactifs dont elle présidera vraisemblablement le comité de pilotage. À suivre… En tout cas, cette conférence est déjà annoncée et a pour fonction de sauver le débat public sur les déchets nucléaires. Ce qui implique déjà des tiraillements sur ce qui est demandé aux citoyens tirés au sort. Évidemment, ce minipublic, comme on dit chez les spécialistes de la démocratie participative, n'a pas vocation à être représentatif, mais doit permettre de reposer autrement

certaines questions, de déplacer les termes d'un débat, de contraindre les acteurs concernés à expliciter ou réexpliciter leurs appuis cognitifs et normatifs, leurs motifs et leurs visions du futur, etc. Les discussions sur le tirage au sort sont très intéressantes, et Yves Sintomer a particulièrement bien analysé la forme de citoyenneté que cela implique, en partant bien sûr du modèle de la Grèce ancienne et en regardant les dispositifs à l'œuvre dans nos démocraties complexes. Dans certains cas, selon les catégories sociales qui fondent le tirage, puisqu'il faut bien entendu une diversité maximale au sein de ce minipublic, cela peut donner quelques catastrophes. Si vous tirez au sort aujourd'hui sur un électorat qui est en train de partir à l'extrême droite… Enfin, c'est là un autre sujet. En tout cas, la question des formes de participation citoyenne et des définitions de la citoyenneté qu'elles impliquent sont en jeu dans l'intervention des citoyens dans la production de l'expertise. Donc, ces formes-là font évidemment partie des objets de controverse ou plutôt des controverses sur les controverses.

Pour terminer ce tableau très rapide, je voudrais réaffirmer la pertinence d'une relecture de l'œuvre de John Dewey, un des maîtres de la démocratie, et qui est beaucoup utilisé par ceux qui entendent limiter les impacts ou surmonter les impasses de la critique radicale, de la contestation ou de l'agit-prop comme on disait dans les années 1970. En gros l'argument consiste à dire : « La critique, la dénonciation, le rapport de forces, c'est bien jusqu'à un certain point mais, à un moment donné, il faut faire travailler ensemble des publics qui n'ont pas forcément vocation à s'accorder. » Et les faire entrer dans un processus d'enquête et de délibération collective – occasion de revisiter ce que peuvent être les valeurs et les biens communs. John Dewey, dont la controverse avec Walter Lippmann sur l'opinion, le public et la démocratie est célèbre, a fourni le concept de l'entrée en lice de publics dans la formation de nouveaux objets d'enquêtes et de débats publics. Ce qui est sûr, c'est qu'il est préférable qu'à un moment donné, même dans les cas les plus controversés, le processus de discussion puisse trouver sa place – et l'on retrouve d'ailleurs ici un horizon normatif longtemps exprimé par Jürgen Habermas. Quelle leçon en tirer ? D'abord, qu'il nous faut apprendre à vivre avec les tensions propres de l'argumentation dans les arènes publiques, toujours remplies d'acteurs orientés vers le dissensus et le désaccord, et du même coup à travailler l'argumentation comme une sorte d'aïkido collectif. On retrouve ici l'art du mouvement qui est consubstantiel à la pragmatique du rebondissement : au fond, il s'agit en chaque cas, non pas de congeler des savoirs et de figer des pouvoirs, mais de créer de nouvelles prises, d'inventer des appuis et des formules pour faire entrer dans le débat ceux qui veulent en sortir et faire sortir ceux qui ne laissent aucune place à l'altérité des points de vue, étant dans l'incapacité d'écouter les autres – ce qui est souvent le cas des gouvernements et de leurs administrations… Le problème de l'écoute et de la distribution de la parole est un enjeu

continu de tous ces dispositifs. Et cela m’incite d’ailleurs à m’arrêter, car j’ai déjà trop parlé.

Il y a quand même un dernier point que je souhaite verser dans les discussions. Il n’y a pas de controverses sans controverses sur le futur. La question du futur, même si chez lui c’est un futur proche, celui de la décision pour l’action immédiate, est constitutive pour Aristote de l’art délibératif. Le genre délibératif engage les visions du futur et de ce qu’il convient de faire selon la vision que l’on adopte. Ce qui nous renvoie à la question du conséquentialisme dans ses rapports avec la décision et l’action. Je renvoie au livre collectif dirigé par Dominique Bourg qui propose un retour critique assez polyphonique sur la société du risque de Beck – c’était un colloque de Cerisy, en septembre 2011. J’y avais proposé de clairement distinguer deux types de conséquentialisme :

- Un conséquentialisme borné, dans lequel on est capable d’établir la liste des conséquences, comme lorsqu’on peut calculer des probabilités, en tout cas mettre en calcul ce qui peut survenir à la suite d'une décision ou d’une action ;

- Un conséquentialisme ouvert et évolutif dans lequel les acteurs découvrent les conséquences au fur et à mesure des épreuves dans lesquelles ils s’engagent, ce qui comprend aussi les enquêtes et les controverses qui font surgir, de manière abductive, par un jeu de nouvelles questions et d’hypothèses inédites, de nouvelles conséquences – et partant de nouveaux milieux concernés.

Les cas de Tchernobyl et de Fukushima, et je finirai là-dessus, fournissent des leçons majeures sur ce point. La liste des conséquences ne cesse de se redéfinir, de se déplacer, de se nourrir de nouveaux événements. Et c’est bien la difficulté propre du nucléaire, dont l’acceptabilité a longtemps été fondée sur l’idée d’une faible probabilité des accidents et de la maîtrise de leurs conséquences. Or, ces deux accidents suffisent à montrer que ce type d’énergie engage les acteurs dans un conséquentialisme ouvert et qu’il est donc vain, et même sans doute dangereux, de vouloir clore les controverses, puisqu’il faut sans cesse examiner de nouveaux faits, entendre de nouveaux acteurs, de nouvelles voix. Mettre le nucléaire, comme d’autres technosciences, en démocratie implique d’ouvrir la porte au surgissement parce qu’on ne pourra jamais clore la liste des conséquences face à des enjeux qui dépassent les dispositifs provisoires et fragiles sur lesquels reposent nos capacités collectives de contrôle.

Bibliographie

Abbott (A.) (2001). *Time Matters. On Theory and Methods,* Chicago, The University of Chicago Press.

Angenot (M.) (2008). *Dialogues de sourd. Traité de rhétorique antilogique,* Fayard/Mille et une nuits.

Bessy (C.), Chateauraynaud (F.) (2014). *Experts et faussaires. Pour une sociologie de la perception,* Paris, Métailié, deuxième édition.

Bourg (D.) et *alii* (2013). *Du risque à la menace. Penser la catastrophe,* Paris, PUF.

Céfaï (D.) (2007), *Pourquoi se mobilise-t-on ? Les théories de l'action collective,* Paris, La Découverte, coll. « Bibliothèque du Mauss ».

Callon (M.), Lascoumes (P.), Barthe (Y.) (2001), *Agir dans un monde incertain,* Paris, Le Seuil.

Chateauraynaud (F.) & Debaz (J.) avec la collaboration de Cézanne-Bert (P.) (2011), « L'affaire des gaz de schiste. Anatomie d'une mobilisation fulgurante », *Socio-informatique et argumentation,* 19 décembre 2011. http://socioargu.hypotheses.org/3262

Chateauraynaud (F.) (2011). *Argumenter dans un champ de forces. Essai de balistique sociologique,* Paris, éditions Pétra.

Chateauraynaud (F.) (2013), « De la formation des publics à la rébellion des milieux », *Portée de la concertation,* octobre.

Chateauraynaud (F.) (2010), "Argumentative Convergence as a Reconfigurator in the Trajectories of Risks. A Comparison of Low-Dose and CMR Arguments in Controversies on Health and Environment", Workshop *Carcinogens, Mutagens, Reproductive Toxicants: the Politics of Limit Values and Low Doses in the twentieth and twenty-first centuries,* Strasbourg, mars 2010.

Dascal (M.), 2010, "Types of polemics and types of polemical moves" in : Capone (A.) (dir.), *Perspectives on Language Use and Pragmatics: A Volume in Memory of Sorin Stati,* Münich, Lincom, pp. 77-97.

Fischer (F.) (2000). *Citizens, Experts, and the Environment. The politics of Local Knowledge,* London, Duke University Press.

Hermitte (M.-A.) (2013). *Le droit saisi au vif. Sciences, Technologies, Formes de vie,* Paris, éditions Pétra.

Jasper (J. M.) (1997). *The Art of Moral Protest: Culture, Biography, and Creativity in Social Movements.* Chicago, University of Chicago Press.
Rosanvallon (P.) (2006). *La contre-démocratie. La politique à l'âge de la défiance,* Paris, Le Seuil.

Tsing (A. L.) (2005). *Friction. An Ethnography of Global Connection,* Princeton University Press.

Zask (J.) (2011). *Participer. Essai sur les formes démocratiques de la participation,* Paris, Le Bord de l'eau.

Session 2 : « Fin ou retour des énergies fossiles ? »

Présentation de la session 2 : « Fin ou retour des énergies fossiles ? », par Florian Leblanc, p. 95

« Les choix offerts par le potentiel français de gaz de schiste »,par Bruno Goffé, p. 100.

« Les risques de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schiste », par François Renard, p. 116.

« L'effet “gaz de schiste” sur les industries et marchés gaziers : des différences marquées entre régions », par Sylvie Cornot-Gandolphe, p. 133.

« Le CSC à grande échelle, une option réaliste ? Etat des lieux et des controverses », par Minh Ha-Duong, p. 148.

« Fin ou retour des énergies fossiles ? Le charbon appuyé par CSC », par Sylvie Cornot-Gandolphe, p. 163.

Présentation de la session 2 : Fin ou retour des énergies fossiles ?

Par Florian Leblanc.

Impossible d'aborder la question de la transition énergétique sans discuter de la place des énergies fossiles dans le futur mix énergétique français. En effet, comme l'a rappelé Patrice Geoffron en début de session, l'une des perspectives dans laquelle se situe le débat sur la transition est celle des tensions à venir sur les prix de l'énergie dues à une raréfaction progressive des énergies fossiles, et penser cette transition ne peut justement se faire en dehors du contexte actuel de perception de retour à l'abondance de ces mêmes énergies fossiles.

De toute évidence, celles-ci continueront à constituer une grande part du mix énergétique mondiale. Même les scénarios bas carbone de l'Agence internationale de l'énergie prévoient que cette part ne descendra pas en dessous des 63 % à horizon 2035[6]. Dans ce contexte, la question est de savoir si la transition énergétique se doit d'amorcer et d'accompagner le déclin de l'utilisation des énergies fossiles dès à présent, et comment cela s'articulerait avec un nouveau souffle qu'offriraient les hydrocarbures non conventionnels.

Cette session se concentre donc, d'une part, sur le potentiel des gaz de schiste[7] en France, avec une description de l'état des ressources (Bruno Goffé), des risques associés (François Renard), ainsi que des enjeux présentés par le renouveau des cartes des réserves et sur la géopolitique mondiale, et notamment la production avérée de gaz de schiste aux États-Unis (Sylvie Cornot-Gandolphe). Dans un second temps, la question du CSC (Captage et Stockage du CO_2) est abordée à travers son réalisme controversé (Minh Ha-Duong) ainsi que la possibilité qu'offre cette technologie pour faire du charbon une énergie quasiment propre (Sylvie Cornot-Gandolphe).

La question du gaz de schiste semble ne plus devoir se poser en France, au vu de la loi du 13 juillet 2011 interdisant l'utilisation de la fracturation hydraulique pour l'exploration et la production de gaz de schiste. C'est dans ce contexte que Bruno Goffé présente la nature de ces ressources. La formation des hydrocarbures s'effectue dans les bassins sédimentaires à des profondeurs allant de 1 000 à 6 000 m. Ce sont les conditions de température et de pression qui permirent la production de gaz, de pétrole, ou l'association des deux, au sein de la roche mère. Ces hydrocarbures peuvent ensuite avoir la possibilité de

6 Part relative de la demande totale en énergie primaire, table 2.1, p. 51, WEO 2012.

7 Il a été rappelé au cours de la session que l'expression « hydrocarbures de roches mères » était la plus appropriée pour désigner cette ressource. Par convenance et en accord avec les usages courants, nous continuerons néanmoins à utiliser les expressions « gaz et pétroles de schiste » tout au long de cette note.

migrer à travers la roche jusqu'à rencontrer des roches imperméables pour former des réservoirs conventionnels ou bien rejoindre la surface le cas échéant. Le gaz de schiste est, par opposition, celui resté piégé dans la roche mère, de faible perméabilité donc, formant ainsi un continuum de réserves étendues et piégées. Selon les premières études de l'Energy Information Administration[8], les ressources techniquement récupérables en Europe sont les plus élevées en France et en Pologne (respectivement 180 et 187 Trillion cubic feet). Cependant, nous rappelle Bruno Goffé, l'évaluation des ressources en gaz de schiste possèdent de fortes incertitudes, comme viennent le nuancer les récentes explorations en Pologne et en Grande-Bretagne, venant pour l'une revoir d'un facteur 10 à la baisse ces estimations, et d'un facteur 5 à la hausse pour cette dernière. Ce passage de l'estimation à la pratique n'est pas sans rappeler la distinction entre ressource et réserve prouvée. Cette distinction prend toute son importance à l'interface entre les conditions géologiques et les conditions technico-économiques et institutionnelles en place. Elle se concrétise dans le cas des gaz de schiste à travers le processus suivant : 1/ la cartographie de la ressource, qui demande de forts investissements ; 2/ la connaissance fine des propriétés de la roche comme la porosité ; 3/ les premiers retours d'expérience sur les premiers puits exploratoires ; 4/ la possibilité d'exploiter de manière rentable. Ce dernier point inclut la réglementation mise en place autour des habitations. À titre d'exemple, des simulations effectuées pour la Seine-et-Marne montrent qu'un périmètre de protection de 400 m permettrait tout au plus la mise en place de neuf plates-formes de forage, tandis qu'au-delà d'un périmètre de protection de 1 000 m aucun forage ne serait possible.

À cela, il faut ajouter les différents risques et nuisances que présentent l'exploration et l'exploitation du gaz de schiste. François Renard souligne que les impacts environnementaux sont passés de la notion de craintes à celle de risques, le retour d'expérience des États-Unis étant suffisant pour clairement identifier ces derniers. Dans un premier temps, la microsismicité induite ne semble pas plus importante que dans le cas d'exploitation d'hydrocarbures conventionnels ou de ressources géothermiques. Restent alors les nuisances paysagères notamment dues aux nombreux passages de camions, la question du traitement des effluents de forage, ainsi que le risque de pollution des nappes phréatiques. Pour ce dernier cas, deux études récentes[9] ont montré que les traces de méthane relevées dans des nappes à proximité de puits de gaz de schiste étaient bien du méthane

8 EIA (2011). *World Shale Gas Resources : an Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States*. U. S. Energy Information Administration.

9 Osborn (S. G.), Vengosh (A.), Warner (N. R.), Jackson (J. B.) (2011). "Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing". In: *Proceedings of the National Academy of Sciences.* Vol. 108, pp. 8172.
Jackson (R. B.), Vengosh (A.), Darrah (T. H.), Warner (N. R.), Down (A.), Poreda (R. J.) et *al.* (2013). "Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction". *Proceedings of the National Academy of Sciences,* Vol. 110, pp. 11250-11255.

provenant des profondeurs. Ceci pourrait être dû plus à un mauvais tubage des têtes de puits au niveau de l'aquifère qu'à une remontée du gaz par des failles géologiques existantes ou par les fractures artificielles occasionnées, n'atteignant jamais la surface. Cependant, l'étude ne permet pas non plus de savoir si des fissures au niveau de la tête de puits seraient dues à une mauvaise pratique des premiers puits, à un endommagement lié au passage du fluide de fracturation sous pression ou encore à un mauvais vieillissement du tubage de tête sur la durée de vie du puits. Pour pouvoir tirer de rigoureuses conclusions, de futures études devraient effectuer des mesures avant l'exploitation pour servir de point de comparaison. Le retour d'expérience n'est donc pas encore complet. Quoi qu'il en soit, la différence majeure entre les gisements conventionnels et non conventionnels réside dans le nombre conséquent de forages, ce qui augmente la probabilité d'occurrence des risques associés.

C'est en partant de ces aspects géologiques et techniques que Sylvie Cornot-Gandolphe vient apporter un éclairage sur les impacts macroéconomiques de la production de gaz de schiste des États-Unis. En effet, cette montée en puissance marque un véritable tournant dans la production de gaz aux État-Unis qui a augmenté d'environ 30 % au total depuis 2005, les gaz de schiste passant de rien à 35 % de la production totale de gaz. Malgré le récent déclin de production de certains des premiers bassins mis en exploitation et un ralentissement de l'activité de forage, la production de gaz de schiste reste pour l'instant dans une phase de croissance, production notamment compensée par de récentes mises en exploitation tel le bassin de Marcellus. C'est ce rapide essor des capacités de production de gaz de schiste qui a entraîné une forte chute sur le prix du gaz aux États-Unis, qui a eu pour première conséquence un décrochage des prix du gaz avec ceux du marché européen et du LNG[10] japonais (le prix étant environ trois fois plus cher en Europe et quatre fois plus qu'au Japon). Cette baisse du prix du gaz a entraîné de nombreux investissements dans l'industrie, et notamment dans le secteur de la chimie sur le sol américain, ainsi qu'une réduction des dépenses des consommateurs. Cette forte activité a bien évidemment des retombées conséquentes en termes de PIB, de recettes fiscales et d'emplois directs et indirects, ainsi qu'un prix de l'électricité qui reste deux fois moins élevé aux États-Unis qu'en Europe, de par la substitution des centrales au charbon aux centrales à gaz. À noter, cependant, que le cas américain, de par sa géologie, son système de droit de propriété privée sur le sous-sol, sa densité de population peu élevée, la culture et la pratique de l'exploitation d'hydrocarbures, reste unique et est difficilement reproductible ailleurs, dès que les caractéritiques s'éloignent de celles des États-Unis. Cependant, même sans exploitation à grande échelle, le gaz de schiste américain a un impact fort en Europe, avec, d'une part, un déversement des exportations de LNG initialement destinées aux États-Unis et donc une pression sur les prix spot du marché européen, ainsi qu'un déplacement des centrales à gaz par les centrales à charbon existantes alimentées au charbon américain bon

10 Liquefied Natural Gas.

marché et, d’autre part, plus indirectement avec la perte de compétitivité dans les secteurs intensifs en énergie telle la pétrochimie. En l'état actuel des connaissances, il reste difficile de prévoir les impacts qu'aurait une production de gaz non conventionnel massive ailleurs qu'aux États-Unis.

Concernant à présent les présentations sur la technologie CSC, laquelle couplée à l’usage renouvelé du charbon offrirait une énergie en compétition avec les autres hydrocarbures pour un prix du carbone élevé. Minh Ha-Duong commence par noter que le CSC connaît un développement lent, avec très peu de projets opérationnels et en construction en comparaison aux projets planifiés (seuls 44 en 2013, un chiffre en baisse, dont 28 concernent des projets de centrale électrique). On note aussi un intéressement plus grand pour le stockage dédié (soit pour des poches géologiques déjà prêtes à recevoir du gaz) au détriment de la récupération assistée d'hydrocarbures. Les risques que présente la CSC sont de deux natures, les risques environnementaux et le risque que le projet soit rejeté. Le refus d'un projet peut même entraîner le rejet d'une filière technologique toute entière, comme le montre le cas d'Hawaï pour l'injection en mer. Les critiques aux projets sont très diverses, allant du déni technologique en termes d’efficacité énergétique, de la faible disponibilité à court terme et de sûreté vis-à-vis des risques, à l'opposition dirigée directement contre l'industriel portant le projet qu'à la technologie même. Cependant, la CSC reste aussi une option pour des ONG environnementales pour lesquelles celui-ci va de pair avec toute centrale à charbon. L'EPA (Environmental Protection Agency) va imposer des émissions de l'ordre de celles des centrales à gaz pour la production d'électricité. Le CSC apparaît encore une option réaliste en France et en Europe en accompagnement de politiques climatiques, quelques industrielles étant encore en course pour le CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage).

Sylvie Cornot-Gandolphe considère le CSC comme une option de long terme crédible qui serait basée sur le charbon qui constitue encore 30 % du bilan énergétique mondial, part qui n'a jamais diminué. Ceci est dû à d'abondantes réserves réparties sur l'ensemble du globe et à un prix compétitif par rapport à ses substituts et leur localisation dans de grands pays émergents (Chine, etc.). La forte hausse de la demande des pays émergents est accompagnée d'un retour du charbon en Europe, favorisée par le prix bas du charbon US et un marché du carbone défaillant (le prix du carbone conduisant au passage du charbon au gaz étant d'environ 32 € la tonne de CO_2).

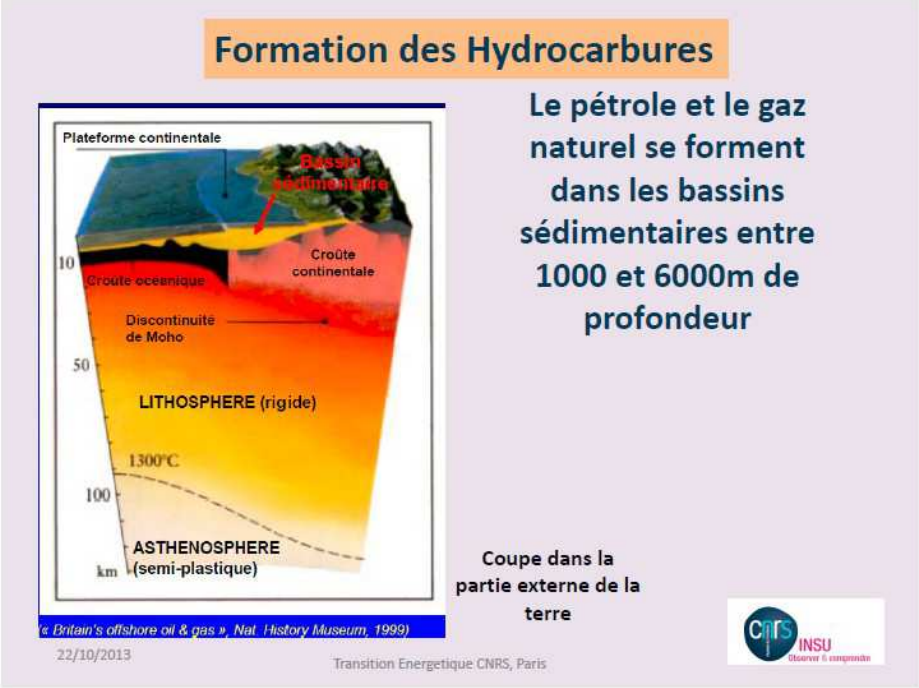
Même bloquée au stade de la R&D, la progression des technologies de captage de CO_2 par des projets de démonstration constitue un accompagnement pertinent de politiques climatiques s'il est considéré parmi un ensemble d'options technologiques (comme la recherche en efficacité énergétique qui pourrait permettre d'obtenir des rendements énergétiques supérieurs au demi pour les centrales à charbon), même si le retour du charbon ne suffira pas à faire décoller le CSC sans un prix du carbone relativement élevé.

Enfin, comme le rappelait Patrice Geoffron dans son introduction, la disponibilité de ressources potentielles en gaz et pétrole de roches mères dans les sous-sols européens mène à considérer une transition énergétique dans un contexte de profusion des énergies fossiles de deux manières très différentes. La première est de ne pas considérer ces nouvelles ressources et de tendre sans leur appui vers un modèle bas carbone. La deuxième est de poser la question de la possibilité d'une exploitation vertueuse de ces ressources carbonées dans un espace comme l'Europe où le marché des permis CO_2 serait supposé bien fonctionner, et où la manne de leur attribution par enchères permettrait de dégager des ressources financières nécessaires au financement de la transition, en réduisant parallèlement les tensions de court terme sur les marchés énergétiques.

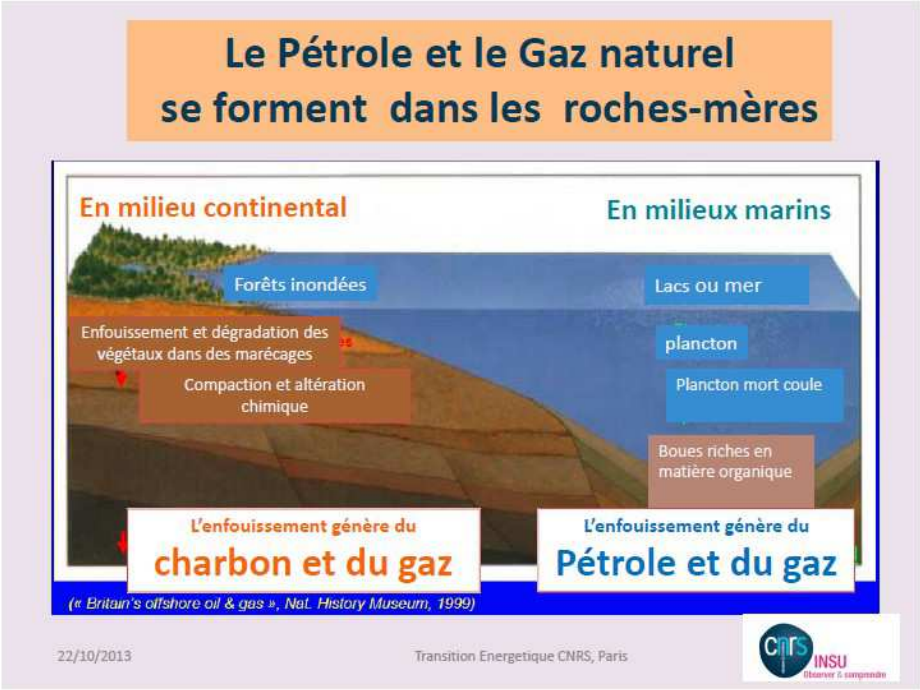
Bruno Goffé : Les choix offerts par le potentiel français de gaz de schiste

Bruno Goffé est directeur de recherche au CNRS et chercheur au CEREGE.

Je vais vous parler d'une question controversée : « Les choix offerts par le potentiel français du gaz de schiste. » Ces trois images vous montrent à gauche des schistes. Ce sont des roches qui peuvent contenir du gaz et que j'appellerais « schiste à gaz ». Et, à droite, une source naturelle de méthane dans des schistes à gaz à côté de Grenoble, la Fontaine Ardente de Gua dans le Dauphiné qui coule depuis au moins Saint-Augustin, c'est-à-dire au moins depuis 1 600 ans. Vous voyez, c'est quelque chose qui est très durable.



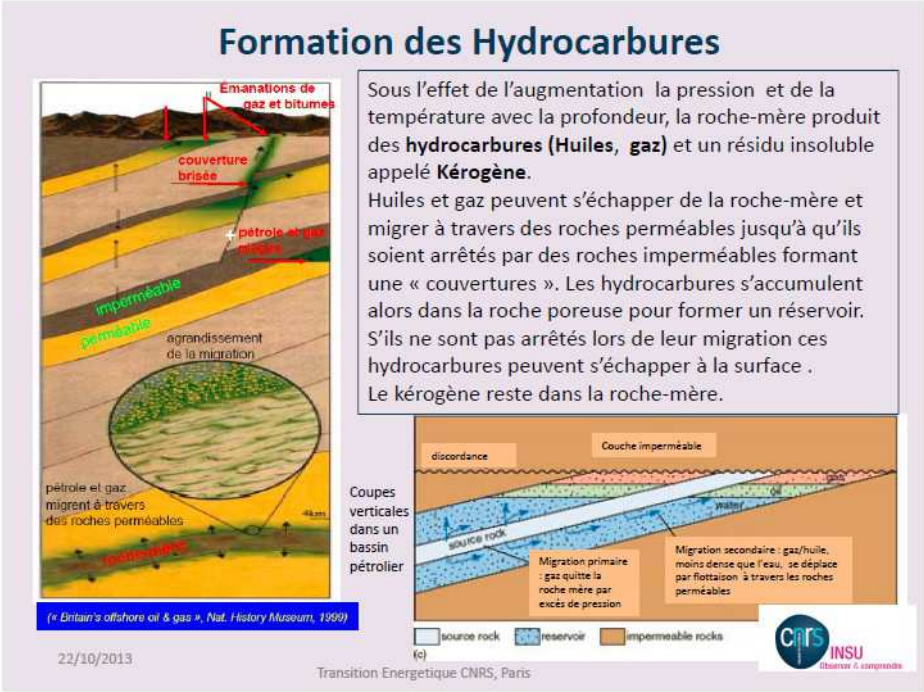
Les hydrocarbures se forment dans des bassins sédimentaires. Ils sont souvent localisés sur la transition entre la croûte continentale et la croûte océanique. Ils ont des profondeurs qui varient entre 1 000 mètres et 6 000 mètres de profondeur, parfois plus.



Le pétrole et le gaz naturel se forment dans des roches qu'on appelle « roches mères ». C'est là que se dépose la matière organique.

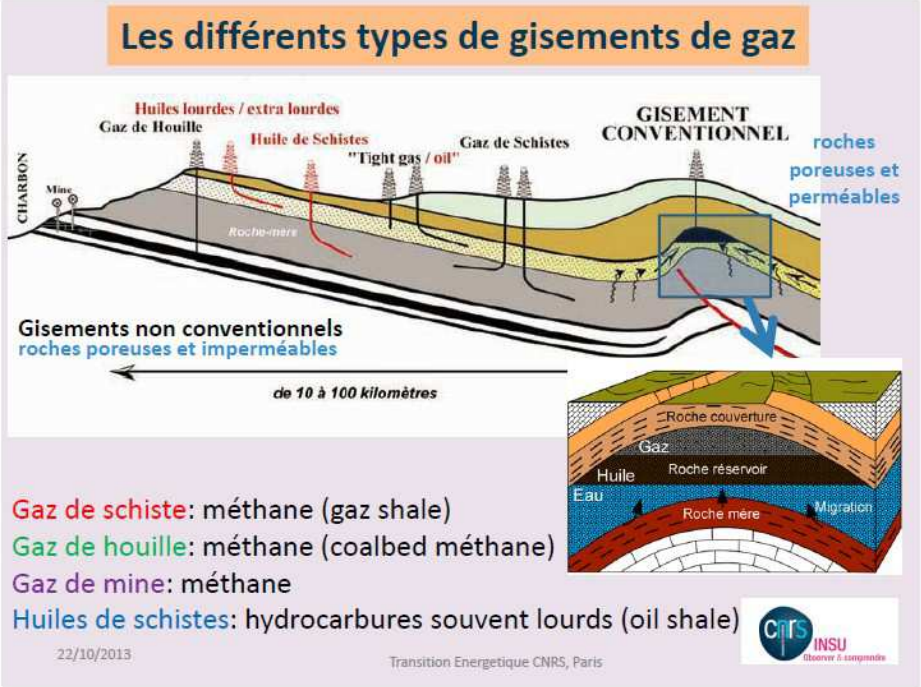
- Si l'on est en milieu continental, c'est de la matière végétale supérieure terrestre qui s'enfouit progressivement dans le bassin et qui va fabriquer du charbon et du gaz. C'est un premier type de roche mère.
- Le deuxième type se situe en milieu marin ou lacustre dans lequel les planctons vivent. Ce plancton meurt et s'enfouit dans le sédiment au fond du bassin. Avec l'enfouissement se fabrique le pétrole et le gaz.

Donc deux types en gros de roches mères, des roches mères à charbon-gaz et des roches mères à pétrole-gaz.



Cette matière organique initiale va « maturer ». Elle va « cuire » progressivement dans la roche avec l'augmentation de la profondeur, la compaction de la roche et l'augmentation de la température. Elle va se séparer en hydrocarbure, huile, gaz et un solide qu'on appelle le « kérogène ».

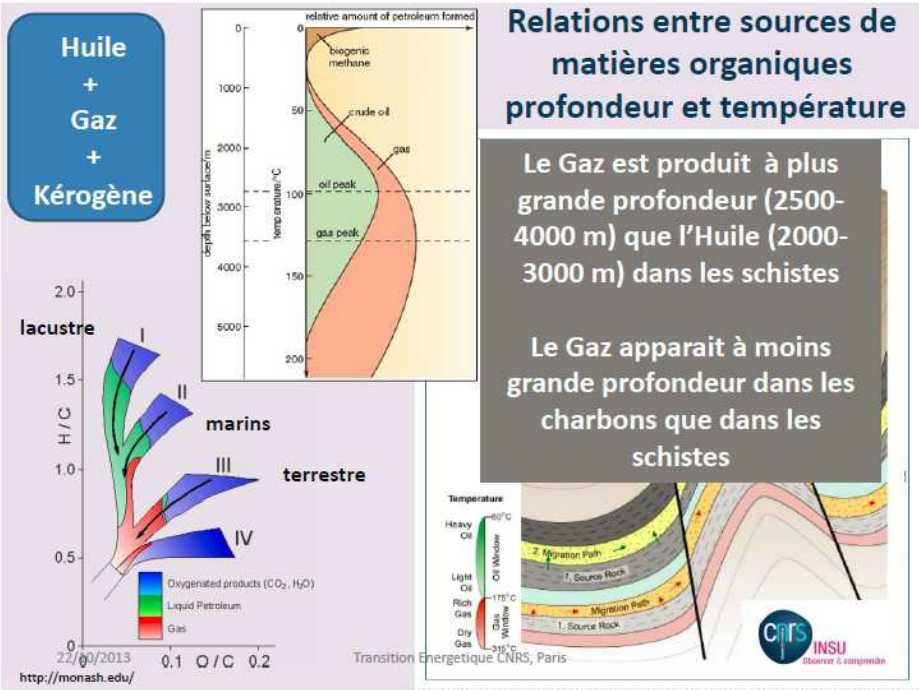
On voit ici un schéma de la roche mère. L'huile et le gaz vont pouvoir s'échapper par surpression et migrer dans des roches poreuses en dessous ou au-dessus, jusqu'à être bloqués par une couche imperméable qui va former un réservoir. Parfois il n'y a pas de blocage. Les fluides peuvent monter et ressortir naturellement à la surface. C'est la situation connue de fuite naturelle d'hydrocarbures.



Il y a différents types de gisements. Prenons d'abord un gisement dans un réservoir classique, un gisement conventionnel. Le gaz est piégé dans une espèce de poche avec une stratification, le gaz en haut, l'huile en dessous, l'eau encore plus bas, à cause des densités. Si l'on fait un trou dans ce réservoir, comme c'est une roche poreuse et perméable, les fluides sortent tout seul. C'est un gisement classique.

La roche mère est ici représentée en gris pour les roches d'origine marine et en noir pour les charbons, les roches mères de type continental. La roche est imperméable et très peu poreuse. Il faut donc utiliser des technologies différentes pour extraire les hydrocarbures : le forage horizontal pour augmenter le drainage dans la roche et les fracturations hydrauliques pour augmenter la perméabilité.

Sur la figure, vous pouvez observer que les gaz de schiste se situe à plus grande profondeur que les huiles. Les réservoirs étanches à gaz et huiles (tight gas/oil) sont des réservoirs compacts, peu perméables. Les gaz de houille se localisent dans les charbons. Un puits dans le charbon permet de l'exploiter souvent sans fracturation hydraulique. Si vous faites une mine, donc une fracturation mécanique, vous allez aussi sortir du gaz de mine encore appelé « grisou ».

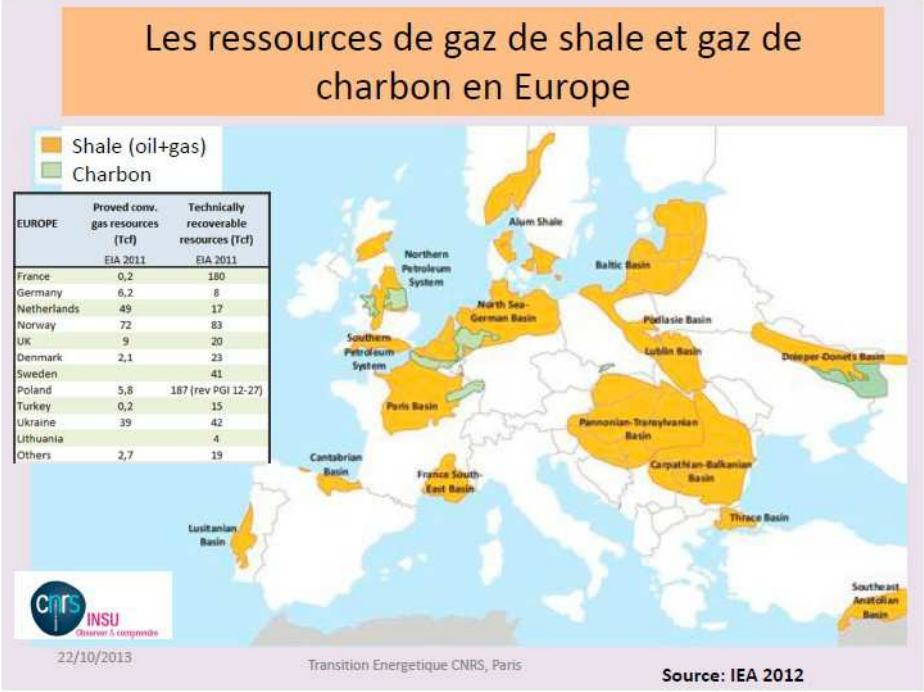


Pourquoi les gaz sont-ils à plus grande profondeur que les huiles ?

Ce schéma montre les quantités d'hydrocarbure produites en fonction de la profondeur et de la température. Vous voyez le pic de production des huiles est à plus basse température et donc à plus basse profondeur, ici autour de 2 500 mètres à 3 000 mètres. Alors que les gaz sont produits à plus haute température et à plus grande profondeur, ici autour de 3 500 mètres-4 000 mètres pour la plus grande production de gaz.

Ensuite, vous allez avoir des différences selon que la matière organique est d'origine lacustre ou marine. Voici un diagramme (en bas à gauche de la figure) qui représente les rapports oxygène/carbone et hydrogène/carbone. Ce rapport dépend du type de matières organiques initiales. Les matières organiques marines et lacustres vont, lors de leur maturation, passer en suivant les chemins I et II, par ce qu'on appelle « la fenêtre à huile » avec l'augmentation de température et de pression. Ainsi se fabrique d'abord de l'huile puis du gaz, alors que, pour le charbon, le système suit les chemins III et IV et passe directement au gaz avec très peu d'huile. C'est pour cela qu'on ne trouve pas d'huile dans les charbons, ou très peu.

Dans un bassin classique, dont vous voyez ici la coupe à droite, vous allez ainsi avoir à moins grande profondeur (2 000-3 000 mètres) des roches mères et des réservoirs à l'huile ; et à plus grande profondeur (2 500-4 000 mètres), des roches mères et des réservoirs à gaz. Dans les charbons, le gaz apparaît à moins grande profondeur que dans les schistes et c'est pour ça que vous allez trouver plus facilement du gaz dans les charbons, dans des mines qui sont à 1 000 mètres de profondeur.



EUROPE	Proved conv. gas resources (Tcf) EIA 2011	Technically recoverable resources (Tcf) EIA 2011
France	0,2	180
Germany	6,2	8
Netherlands	49	17
Norway	72	83
UK	9	20
Denmark	2,1	23
Sweden		41
Poland	5,8	187 (rev PGI 12-27)
Turkey	0,2	15
Ukraine	39	42
Lithuania		4
Others	2,7	19

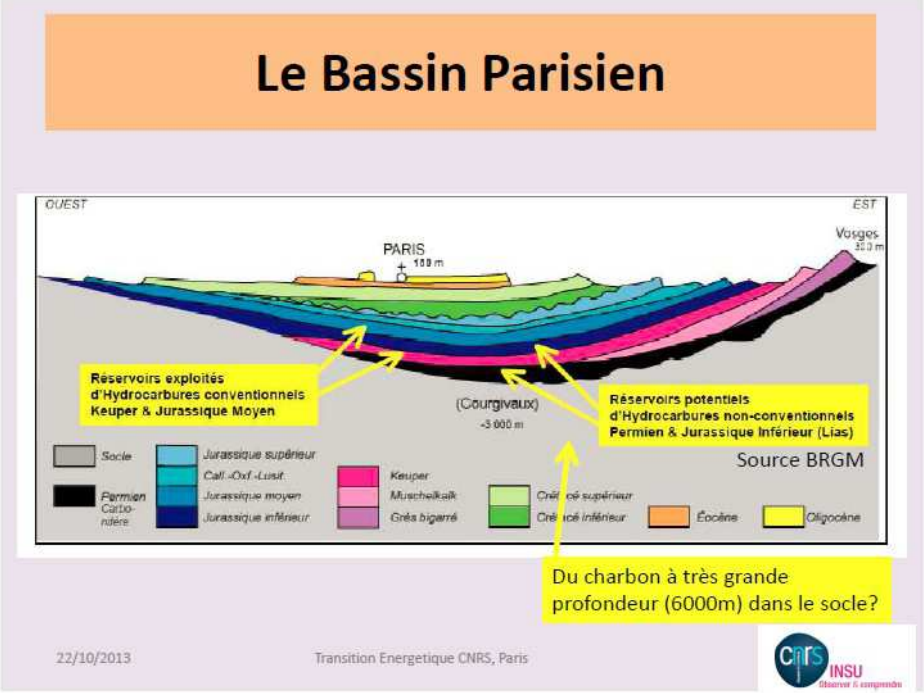
Cette carte montre la ressource, la répartition des roches mères en Europe. Vous y observez des grands bassins. Au Nord : le bassin de Paris, le bassin du nord de la France, du nord de l'Allemagne, au centre de la Grande-Bretagne (en particulier la région du Yorkshire et, au sud, la région du Sussex) ; à l'Est : le Bassin pannonien, le bassin des Carpates, les bassins Baltique et polonais, et aussi dans la région de Donetsk en Ukraine ; ensuite au sud : le Sud-Est de la France et aussi le bassin Cantabrique en Espagne et enfin les bassins Lusitaniens au Portugal.

En 2011, l'Agence internationale de l'énergie a estimé que les ressources les plus importantes se situent en France et en Pologne suivis de la Norvège et de la Grande-Bretagne et le Danemark. Depuis, ces valeurs ont été révisées à la baisse pour la France (25 % de moins), la Pologne (dix fois moins) et à la hausse en Grande-Bretagne (cinq fois plus).

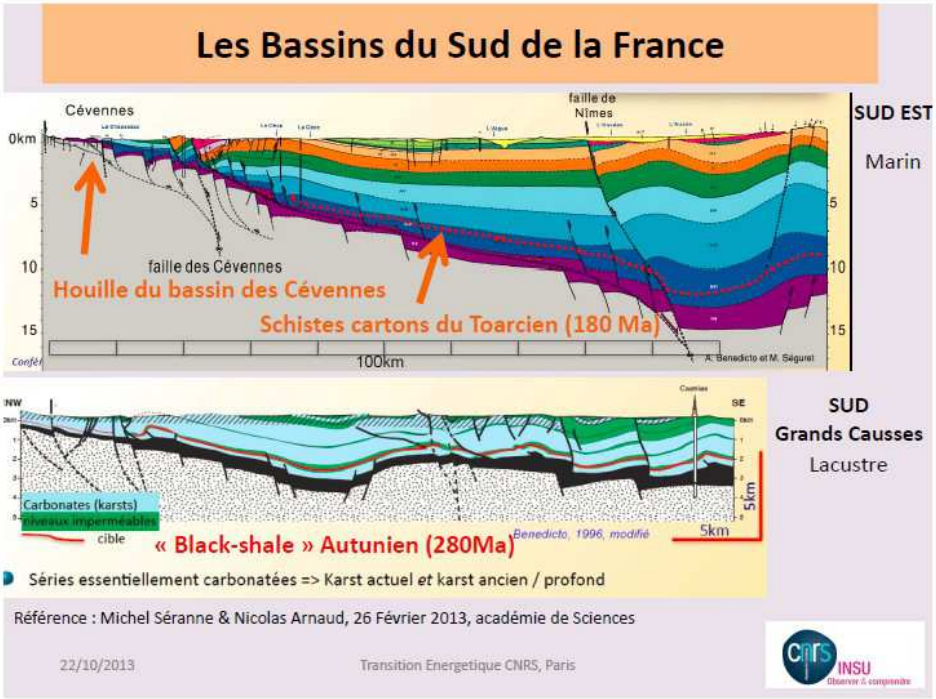
(La table est exprimée en tera-cubic feet (tcf), à diviser par 30 pour l'avoir en teramètre cube).

La France est un pays de roches mères. Vous avez ici deux images. La première est prise au nord de la France dans le Pas-de-Calais à Équihen dans les falaises qui sont entièrement constituées de ces roches mères noires, argileuses. La seconde image montre la Vallée du Buëch dans le Rhône-Alpes à côté de Sisteron, vous voyez un très beau schiste à gaz et le canal de la Durance qui s'enfile et coule en tunnel dans ces schistes.

Ces images correspondent aux deux grands bassins du nord et du sud du pays.

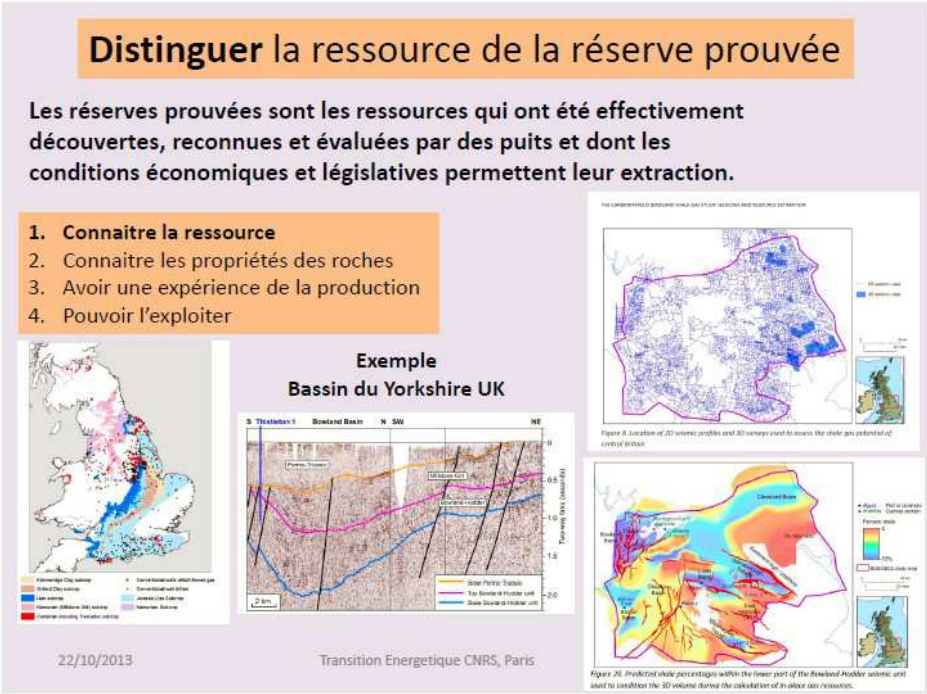


Voici une coupe du Bassin parisien. Les couches exploitées pour les hydrocarbures sont à moyenne profondeur. Comme j'avais expliqué tout à l'heure, les réservoirs potentiels, s'il devait y avoir du gaz en zones non conventionnelles, seront plus profonds, vers 3 000 mètres. Vous voyez qu'avec 3 000 mètres de profondeur maximale le Bassin parisien est la limite pour faire du gaz. C'est pour ça probablement que, dans le Bassin parisien, il n'y aura pas beaucoup de gaz de schiste, mais certainement plus d'huile de schiste. Par contre, dans le Nord-Est, ce bassin riche en charbon dans son socle (en gris dans la figure) le sera aussi en gaz de houille jusqu'à une très grande profondeur, peut-être même jusqu'à 6 000 mètres de profondeur.



Voici deux coupes dans le bassin du Sud-Est.

Le bassin du Sud-Est (des Cévennes aux Alpes) est un bassin très complexe avec beaucoup de failles qui s'enfouissent très profondément (15 km). Ce bassin, profond, d'origine marine, est très propice au gaz. La cible ici ce sont ces roches mères qui sont marquées en pointillés, les schistes-carton du Toarcien. Sur la bordure des Cévennes, ce bassin est connu pour sa richesse en charbon exploitée jusqu'en 1983 dans les mines de la région de la Grand-Combe. Ce charbon était connu pour sa richesse en grisou. Il offre un grand potentiel de gaz. Dans les Grands Causses, la roche mère est d'origine marine lacustre. La cible c'est le niveau en rouge, à des profondeurs de l'ordre de 2-3 km, dans les *black shale* de l'Autunien qui sont aussi une bonne cible dans le bassin du Sud-Est.



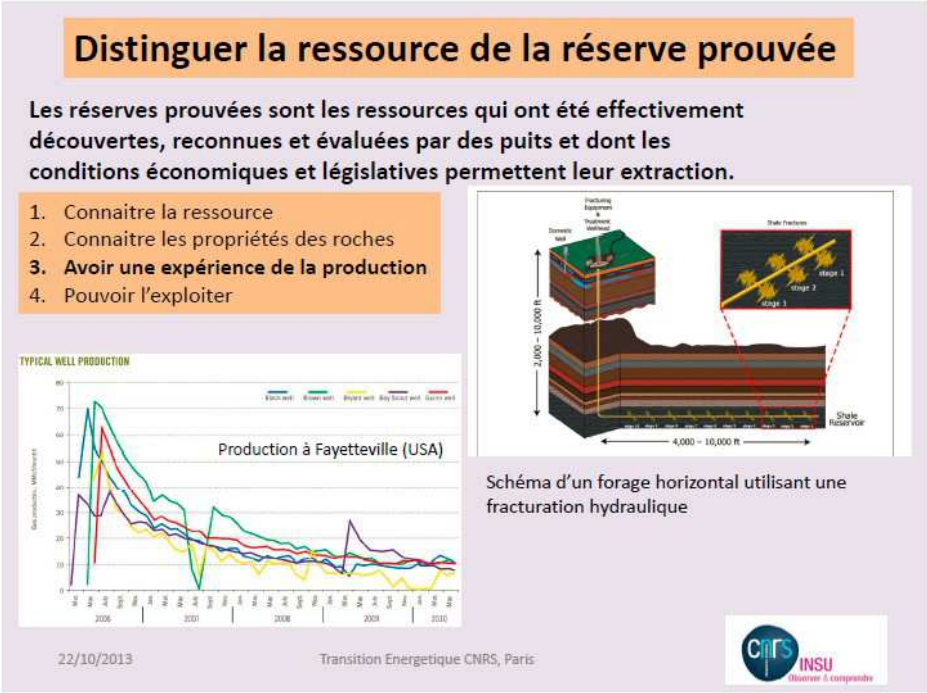
À partir de cible potentielle, pour pouvoir exploiter, il faut définir la réserve. Pour cela, il faut connaître non seulement la ressource mais aussi connaître la propriété des roches, avoir une expérience de la production et pouvoir l'exploiter.

Pour connaître les ressources, que faut-il faire ? Prenons pour exemple le cas du Yorkshire et de Bowland, en Grande-Bretagne. Sur la carte de gauche est présenté le potentiel en hydrocarbure dans les roches, représentées en bleu (carte) tel qu'il est connu par les travaux de terrains et les puits déjà creusés (points noirs). En haut à droite, l'image montre les lignes sismiques en deux et trois dimensions qui ont été parcourues pour obtenir des images sismiques de la structure du bassin (un exemple est donné au centre de la figure). La combinaison de ces données permet de donner une première image (en bas à droite) du potentiel de la ressource.

On voit dans ces documents la masse de travaux nécessaires pour obtenir une modélisation des roches mères et estimer la ressource en gaz de schiste. C'est donc beaucoup d'investissement et de temps de réalisation.

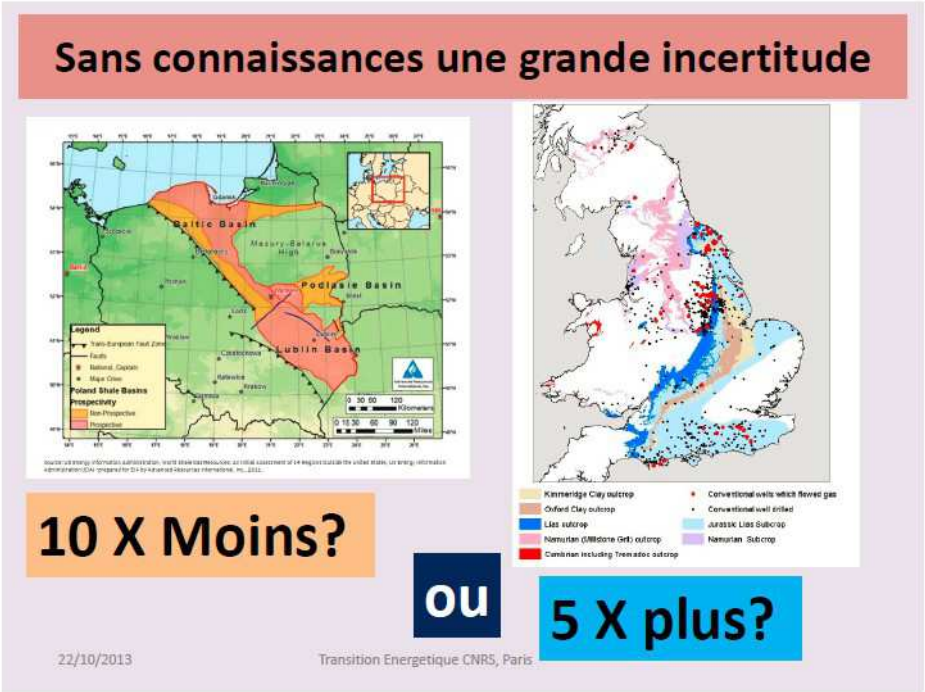
Ensuite, il faut connaître les propriétés des roches. À l'échelle de la centaine de mètres, comme ici par exemple sur les plages du Sussex (à gauche), vous voyez ces roches mères qui sont fracturées. Il faut connaître ces fractures à l'échelle de la dizaine de centimètres. Il faut aussi connaître la perméabilité, la porosité à l'échelle du millimètre et du micromètre comme ici (centre gauche) montré sur cette image en tomographie.

À plus petite échelle encore, à l'échelle du micromètre, la perméabilité et la porosité existent et demandent à être connues. Sur la photo du centre, faites au microscope électronique, on peut voir des trous à côté ou dans la matière organique (en noir). Et, au sein même de la matière organique, la porosité et la perméabilité existent à l'échelle du nanomètre. Pour l'illustrer, l'image en haut à droite montre la structure de cette matière organique (kérogène) sous forme de boule en forme d'oignon de quelques dizaines de nanomètres avec une porosité de l'ordre du ou de fraction de nanomètre.



Ensuite, il faut avoir une expérience de production pour effectivement connaître les capacités réelles de la réserve. La figure de gauche est un exemple aux États-Unis de production de quatre puits de schiste à gaz avec forages horizontaux et fracturation hydraulique (figure de droite). Elle montre que cette production est faite majoritairement la première année.

Enfin, il faut encore pouvoir l'exploiter et donc avoir la place nécessaire pour installer les exploitations. Vous voyez sur cet exemple comment est construite une plate-forme d'exploitation. Il y a jusqu'à dix à quinze drains qui peuvent partir d'une seule plate-forme. Ça constitue une espèce de peigne en profondeur. Chaque peigne couvre de 5 à 8 km^2. Si l'on développe ces peignes dans une région, par exemple ici le département de la Seine-et-Marne, et qu'on décide qu'il y a une zone de protection autour de chaque habitation de 400 m, on peut mettre 9 plates-formes, 9 pavés comme celui-ci dans la région. Si l'on met un périmètre de 750 m, on n'a plus que trois plates-formes et si l'on met un périmètre de 1 000 mètres, il y a zéro plate-forme possible dans la Seine-et-Marne. Donc s'il n'y a pas la place, il n'y a pas la place.



Cette question est certainement une des plus critiques pour les gaz de schiste en France : du fait d'un manque crucial de connaissance des ressources de notre sous-sol se trouve-t-on dans le cas de la Pologne (carte de gauche) où, par rapport aux estimations de l'Agence internationale pour l'énergie, on constate qu'il y a dix fois moins de ressource ? Ou de la Grande-Bretagne où les premières études semblent montrer qu'il y en a cinq fois plus que les estimations AIE ?

La conclusion pourrait être : « Sans connaissance, une grande incertitude. »

François Renard : Les risques de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schiste

François Renard est géologue, professeur de Sciences de la Terre à l'université Joseph-Fourier-Grenoble I et chercheur au sein de l'Institut des Sciences de la Terre (ISTerre).

Les risques de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schistes

François Renard
ISTerre, Univ. J. Fourier & CNRS, Grenoble

Deuxième Journée CNRS de Dialogue sur la Transition Energétique
22 octobre 2013, Paris

François Renard : Depuis une dizaine d'années, avec le retour sur expérience de l'exploitation des gaz de schiste aux États-Unis, les risques liés à cette technologie sont identifiés. Cependant, leurs conséquences sur le long terme ne sont pas encore bien connues. La France a ainsi décidé en 2011 l'interdiction de l'exploration et de l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels par la technique de la fracturation hydraulique.

Le gaz de shale (ou de schiste) en quelques mots

- Le gaz de shale est un **gaz naturel (= méthane)** le plus souvent enfoui à très **grande profondeur** (1500 à 3000 m), dans des roches compactes et imperméables.

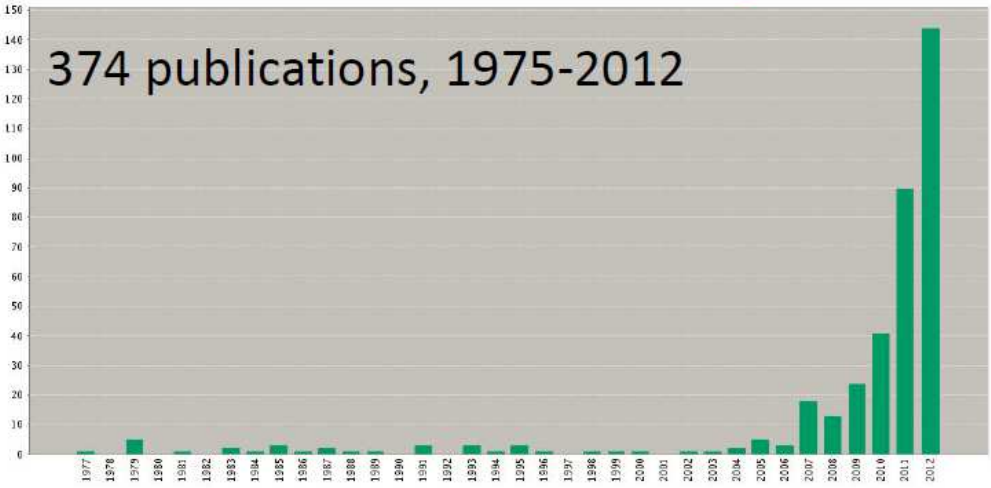
- Ses réserves sont considérables et bien réparties dans le monde : on estime qu'elles pourraient fournir **120 à 150 ans de la consommation** actuelle de gaz naturel.

- En Europe, les réserves de gaz de shale sont estimées entre 3 000 à 12 000 milliards de m^3 (entre 75 et 300 ans de consommation annuelle de la France).

- L'évaluation de ces réserves fait actuellement débat (par exemple en Pologne: entre 30 et 440 ans de consommation du pays, Exxon a arrêté l'exploration).

Le gaz de schiste est du méthane, un composé identique au gaz naturel utilisé comme hydrocarbure depuis bientôt deux cents ans. Le gaz en lui-même ne suscite pas de risques plus importants que ceux liés aux hydrocarbures conventionnels, par exemple le risque d'explosion. En revanche, il existe des risques associés à l'exploration et à l'exploitation de cette ressource qui seront développés dans cet exposé. En termes de réserves, les estimations varient rapidement. Par exemple, les estimations des réserves en Pologne ont été modifiées à l'issue de la réalisation de trente forages d'exploration. D'une estimation de 440 années de consommation du pays basée sur le volume des roches à gaz de schiste estimées, la phase d'exploration a conclu à trente années de consommation du pays, donc pratiquement dix fois moins que prévu initialement. En Angleterre, la situation est inverse : au fur et à mesure des explorations, le volume des réserves identifiées est supérieur à celui des premières estimations. La conclusion de ces deux exemples est que l'incertitude sur le volume des réserves disponibles et exploitables est très élevée et difficile à prendre en compte dans des modèles économiques.

L'état de la connaissance académique: gaz de shale

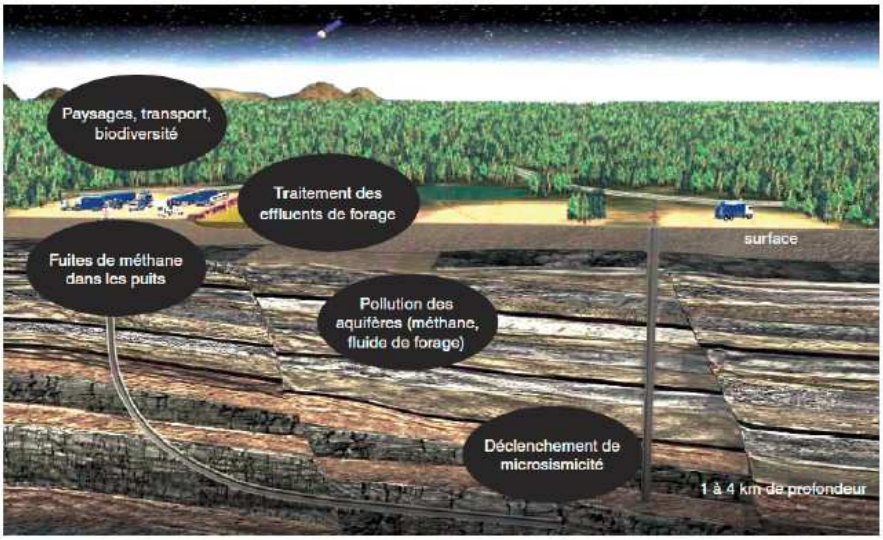


Nombre annuel de publications scientifiques ayant pour sujet « shale gas » ou « gas shale » dans le catalogue « Web of Science » entre 1975 et 2012. Leur nombre augmente fortement depuis 2007 (données au 31 Décembre 2012).

Une grande partie de la connaissance est « privée » (compagnies pétro-gazières)

Dans l'avancée des connaissances sur le gaz de schiste, il faut noter que l'exploitation aux États-Unis a été réalisée par des compagnies privées qui protègent leurs technologies par des brevets. La recherche académique ne s'est penchée que récemment sur cette technologie. Ainsi, la production scientifique académique issue de la recherche publique, et en partie de la recherche privée, a fortement évolué. Avant 2007, très peu de publications scientifiques sur les gaz de schiste sont parues, entre un et cinq par an. À partir de 2007, le nombre de publications voit une croissance exponentielle. Cette augmentation a pour conséquence que la connaissance sur les gaz de schiste rentre peu à peu dans le domaine public, alors qu'avant 2007 elle était confinée au milieu industriel.

Les impacts environnementaux



Technique de fracturation hydraulique par puits horizontaux et enjeux environnementaux associés à la production de gaz de schiste. Image de fond : Schlumberger.

Pour ce qui concerne les impacts environnementaux, je vous propose de faire un historique des avancées de la connaissance ces trois dernières années et comment on est passé de craintes ou de risques qui n'étaient pas connus sur les gaz de schiste à des risques qui sont maintenant connus et identifiés.

L'exploitation de ces gaz de schiste s'effectue par des forages qui comportent un puits vertical, puis un ou plusieurs puits horizontaux.

On peut identifier cinq types d'impacts environnementaux, que je vais décrire rapidement. Premièrement, la circulation de fluides en profondeur peut générer une micro-sismicité induite. En effet, l'exploitation peut déclencher de petits séismes, comme le font d'autres technologies telles que la géothermie, la mise en eau de barrage ou l'exploitation de ressources de gaz conventionnels. Deuxièmement, il existe un risque de pollution des aquifères et je vous montrerai que, dans certaines situations, ça a été le cas. Un troisième impact concerne les fuites de gaz dans l'atmosphère, surtout pendant la phase d'exploitation du puits. Les deux derniers impacts concernent la production d'importantes quantités d'eau qu'il faut traiter avant de les réinsérer dans l'environnement et l'utilisation de réserves foncières et d'infrastructures pour l'exploitation et le transport du gaz de schiste.

Risque de contamination des nappes phréatiques et de l'atmosphère

Dans le film Gasland, l'origine du méthane a fait débat: biogénique (marais) ? gaz de shale ? contamination de surface ?

Gasland by Josh Fox

En termes de risques, le film *Gasland,* produit par Josh Fox et sorti en 2010, a eu un impact très fort et a entraîné une forte mobilisation citoyenne en France et d'importance moindre aux États-Unis. Dans ce documentaire, on voit un monsieur qui possède une maison dont il est indiqué qu'elle est située à côté d'un forage de gaz. Ce monsieur ouvre le robinet de son évier, approche un briquet et le tout s'enflamme. À partir de cet exemple, je vais montrer que ce qui a été identifié comme un risque non avéré, c'est-à-dire un risque inconnu en 2010, a maintenant une explication. Les questions que les chercheurs se sont posées sont les suivantes : Quelle est l'origine de ce méthane ? Est-ce qu'il provient de la surface ou de la profondeur ? Comment est-il arrivé dans le circuit d'eau potable de cette maison ?

Trois origines possibles du méthane observé en surface

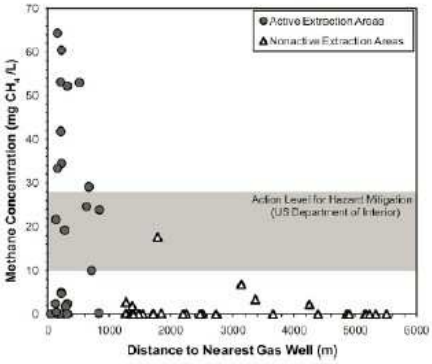
1- Méthane biogénique: généré par la respiration des microorganismes dans les couches plus superficielles
2- Méthane géogénique: flux naturel dans les zones de failles de fortes pressions
3- Méthane géogénique: fuites induites par les activités de fracturation

Différentiation possible des origines par la signature chimique et isotopique.

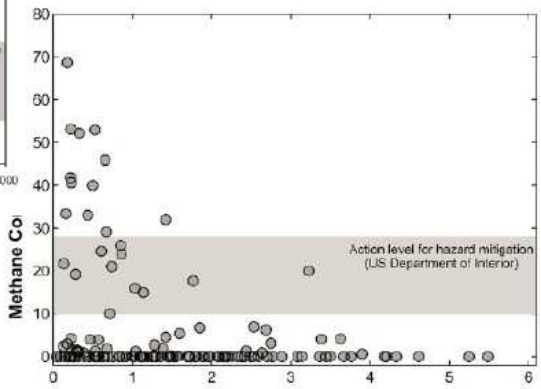
Un débat scientifique qui a débuté en 2010 et qui s'est terminé en 2013: **les fuites de méthane proviennent d'une mauvaise étanchéité de certains puits**.

Quatre origines du méthane sont possibles. Premièrement, le méthane pourrait provenir de la surface, par dégradation de matière organique dans le sol ; deuxièmement, le méthane proviendrait d'une fuite naturelle depuis la profondeur ; troisièmement, le méthane proviendrait d'une fuite reliée à la fracturation hydraulique du réservoir situé à plusieurs kilomètres de profondeur ; quatrièmement, le méthane proviendrait d'une fuite dans le puits d'exploitation. L'analyse chimique des isotopes du gaz montre que le gaz provient bien de la profondeur. Commencé en 2010, le débat scientifique a conclu que ce type de fuites de méthane peut avoir deux origines ; soit des fuites naturelles vers la surface, soit une mauvaise étanchéité de certains puits.

L’expérience américaine: des puits d’eau avec une teneur élevée en méthane, dans un rayon de 1 km de puits de production



Osborn et al., PNAS, 2011 = 34 mesures



Jackson et al., PNAS, 2013 = 141 mesures

Une série d’articles scientifiques a été publiée entre 2010 et 2013 dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences* aux États-Unis. Des chercheurs ont analysé l’eau des puits et des sources dans des régions d’exploitation de gaz de schiste aux États-Unis. Ils ont montré que certaines sources, situées à une distance de moins d’un kilomètre d’un forage d’exploitation, possèdent des concentrations de méthane supérieures aux normes de potabilité et concluaient que la fracturation hydraulique était responsable de ces contaminations. Une première étude en 2010 a fait l'objet de deux commentaires par d’autres chercheurs qui ont critiqué : premièrement, le faible nombre de mesures (34 puits avaient été analysés), deuxièmement, le fait que la fracturation hydraulique était proposée comme étant à l’origine de ces fortes concentrations de méthane.

En effet, il est connu des géologues qu’une fracture produite à plusieurs kilomètres de profondeur ne peut se propager sur de grandes distances. Pour répondre au premier point, l’étude a été étendue à 141 puits et sources, et les auteurs ont montré qu’une vingtaine de puits situés à moins de 1 kilomètre d’un forage étaient contaminés.

Extension verticale des fractures

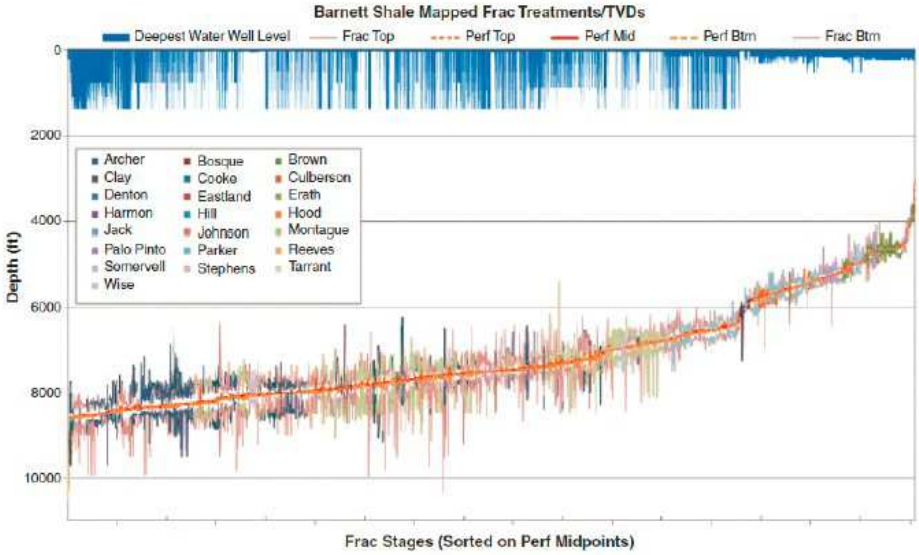


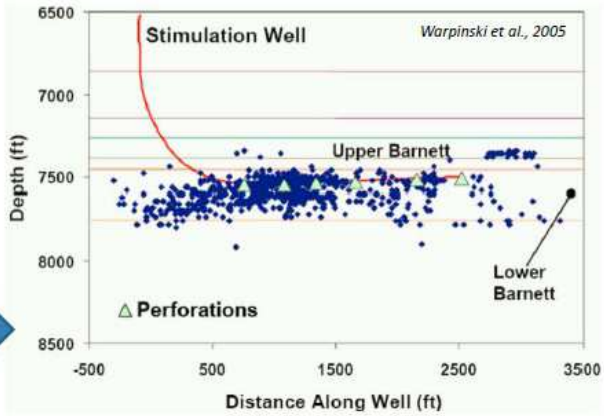
Fig. 2—Barnett shale measured fracture heights sorted by depth and compared to aquifers.

Fisher & Warpinski, SPE, 2012

Pour répondre au second point, un article a été publié en 2012 par des chercheurs de la société Halliburton, qui produit des fluides de fracturation hydraulique. Ils ont publié une série de données de fracturation hydraulique qui montrent que les fractures produites en profondeur n’atteignent pas la surface et ne peuvent donc expliquer la contamination observée. Sur ce graphique, chaque courbe verticale correspond à un forage, et les barres verticales indiquent l'extension verticale de la fracturation hydraulique. En bleu sont indiqués les aquifères superficiels exploités pour la production d’eau potable. Ces données montrent que l’extension verticale de la fracturation hydraulique se situe à une distance importante des aquifères, réfutant la possibilité d’une contamination par cette voie. La conclusion de ces études est que l’origine du méthane dans l’eau potable peut provenir soit de fuites naturelles de méthane depuis la profondeur, connues depuis plusieurs dizaines d’années dans certaines régions des États-Unis, soit de la mauvaise étanchéité des puits d’exploitation.

Risque sismique

Coupe au travers d'un puits de stimulation montrant six épisodes d'hydrofracturation et la sismicité induite (magnitude -1,0 to -2,5) en moins de 24 heures.



- **Sismicité induite:** elle est faible car les volumes d'eau injectés sont plutôt faibles et les injections sont de courtes durées (quelques heures à quelques jours). La magnitude est très faible.
- **La sismicité induite est différente de la sismicité déclenchée, possiblement plus forte.**

L'activité sismique d'origine anthropique est liée à l'injection ou l'extraction de fluides sous terre. D'une part, les opérations impliquant des fluides dans un forage sont à l'origine d'une sismicité déclenchée instantanée et d'amplitude très faible. D'autre part et à plus long terme, les variations de pression du fluide dans les roches sont à l'origine d'une sismicité induite. Aux États-Unis, la sismicité induite liée au gaz de schiste n'est pas due à l'exploitation elle-même, c'est-à-dire le pompage du gaz. Elle est due au fait qu'avec le gaz de grandes quantités d'eau sont pompées. Cette eau est réinjectée sous terre avec des flux qui sont assez importants et suffisants pour déclencher de la sismicité. En conclusion, l'essentiel de la sismicité induite aux États-Unis est liée à la réinjection des eaux de production.

Risque sismique

La réinjection souterraine de fluides de forage ou de production peut induire une sismicité. Quelques exemples récents:
-Crise sismique de Bâle en 2009, dans le cadre d'un forage géothermique profond
-Crises sismiques dans l'Arkansas en 2011 dues à la réinjection de fluides de forage (gaz de shale)

朝日新聞

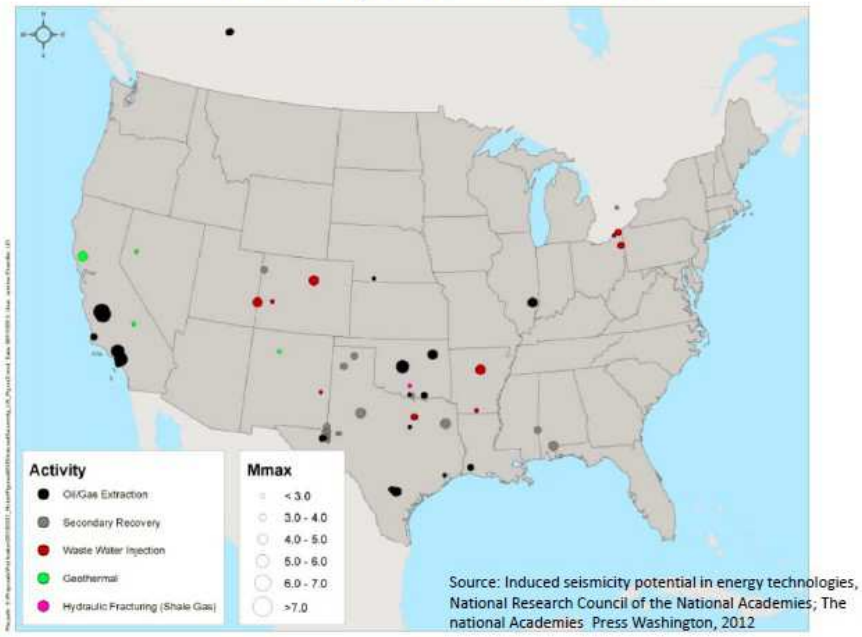
On 26 April 2012, **Asahi Shimbun** reported that United States Geological Survey scientists have been investigating the recent increase in the number of magnitude 3 and greater earthquake in the midcontinent of the United States. Beginning in 2001, the average number of earthquakes occurring per year of magnitude 3 or greater increased significantly, culminating in a **six-fold increase in 2011 over 20th century** levels. A researcher in Center for Earthquake Research and Information of University of Memphis assumes **water pushed back into the fault tends to cause earthquake** by slippage of fault…

…Until two years ago Oklahoma typically had about **50** earthquakes a year, but in 2010, **1,047** quakes shook the state….

…U.S. Government Confirms **Link Between Earthquakes and Hydraulic Fracturing**…

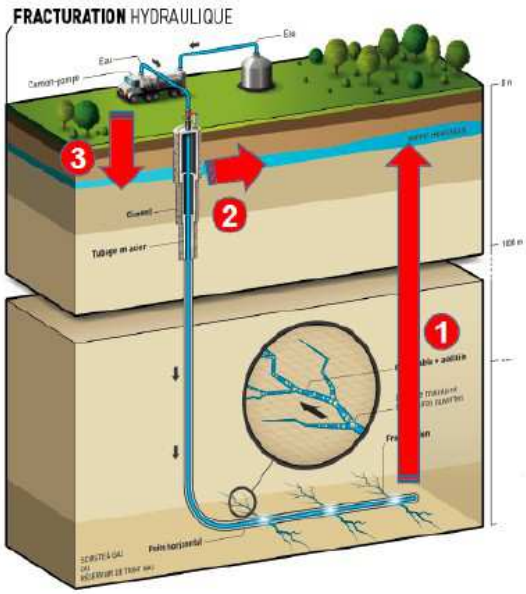
L'effet de l'injection souterraine de fluide sur la sismicité est connu pour d'autres technologies. Par exemple, à Bâle en 2006, une crise sismique a été déclenchée par un forage géothermique. Le séisme déclenché le plus important avait une magnitude de 3.4 et a entraîné l'arrêt des opérations. Dans l'Arkansas en 2011, plusieurs petits séismes ont été provoqués par la réinjection de fluide d'exploitation d'hydrocarbures. Dans l'Oklahoma, l'augmentation de la sismicité depuis une cinquantaine d'années est reliée à l'injection souterraine d'eaux de production d'hydrocarbures conventionnels. Ainsi, il est bien confirmé un lien entre une microsismicité induite et l'injection/extraction de fluides sous terre.

Carte de la sismicité induite aux USA à l'occasion de diverses injections de fluide



Cette carte montre l'ensemble de la sismicité déclenchée aux États-Unis. Chaque couleur correspond à un type d'activité humaine : extraction d'huile et de gaz, réinjection d'eau, géothermie, fracturation hydraulique.

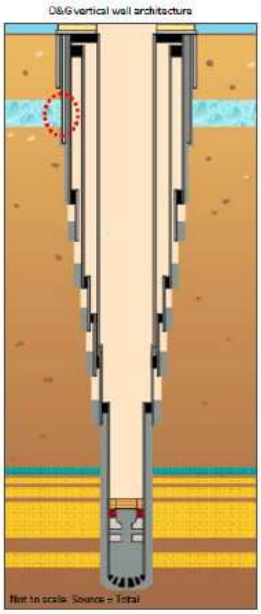
Ce qui est spécifique aux gaz de shale



- Mise en contact avec un aquifère profond du fait du réseau de fissures existant.
- Mise en contact avec un aquifère profond du fait d'une fracturation progressant vers la surface.
- Emploi du procédé à une très grande échelle avec multiplication des puits.

Certains impacts et risques environnementaux sont spécifiques aux gaz de schiste, d'autres non. Si l'aquifère et le réservoir de gaz sont suffisamment éloignés, par exemple de plus de 500 mètres, le risque de fuite directement vers la surface (1) sera très faible. Les risques liés à une fuite dans le puits, proche de la surface (2) ou bien de contamination depuis la surface (3) sont bien identifiés et des normes d'exploitation ainsi qu'un suivi des infrastructures sont nécessaires pour les diminuer. Ces risques existent déjà pour les exploitations d'hydrocarbures conventionnels. Pour les gaz de schiste, le risque principal est la multiplication du nombre de sources potentielles de fuites due au grand nombre de puits nécessaires pour exploiter une ressource identifiée.

Ce qui n'est pas spécifique aux gaz de shale



- Mauvaise étanchéité du tubage (casing) au passage d'un aquifère
- Fuite de surface (arrive aussi pour les gisements conventionnels)
- Traitement des eaux de forage (lixiviation, réinjection souterraine, filière de traitement en surface)
- Remplacement d'additifs dangereux par des équivalents moins nocifs (REACH)

Les fuites dans les puits ne sont pas spécifiques aux gaz de schiste, elles peuvent exister dans les forages conventionnels. Des technologies de puits avec plusieurs parois emboîtées permettent de les diminuer. Enfin, le traitement des eaux de forage récupérées et l'utilisation de fluides de fracturation plus respectueux de l'environnement sont des domaines actifs de recherche et pour lesquels des normes strictes doivent être appliquées.

Quelles alternatives pour l'exploitation des gaz de schistes ?

- Réactiver le plus efficacement le réseau de fissures existantes sans créer trop de nouvelles fissures
- Augmenter la densité de fissures et non l'étendue de la fissuration
- Eviter d'utiliser un fluide de fracturation « stratégique » pour l'environnement
- Définir des normes d'exploitation et éviter les fuites

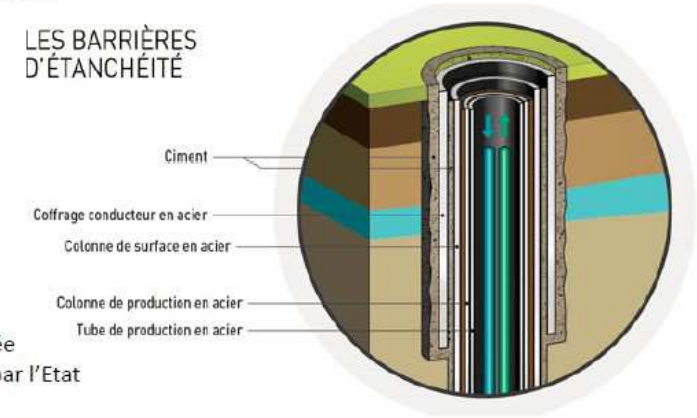
Deux pistes :

- *Changer le fluide de fracturation*
- *Changer le chargement*

Il n'existe pas actuellement de technique alternative à la fracturation hydraulique. Les pistes étudiées visent soit à augmenter la densité des fissures, tout en diminuant la quantité d'eau injectée, soit à remplacer l'eau par un autre fluide. Ainsi, des essais ont été réalisés pour fracturer la roche avec du propane ou bien du dioxyde de carbone.

Mieux étanchéifier les puits et suivre les fuites

- Concept multi-barrière dans la construction des puits



- Gestion du sous-sol limitée à des opérateurs agréés par l'Etat
- Monitoring et surveillance des aquifères de surface et des fuites dans l'atmosphère

Enfin, l'étanchéité des puits est un domaine actif de recherche, avec de nouvelles technologies qui permettent d'augmenter la durée de vie des puits et de suivre en continu d'éventuelles fuites.

Une communauté scientifique française à organiser sur l'étude des risques et les développements technologiques

Vers un site pilote pour la recherche publique, à vocation fondamentale et appliquée ?

Ce type de recherche est autorisé par la loi du 13 Juillet 2011.

- Réalisation d'un état zéro avant tout début d'étude
- Forages profonds et complétions *adhoc* pour assurer la collecte d'échantillons
- Plateformes d'essais des échantillons au laboratoire
- Essais hydrauliques in-situ et monitoring (sismicité, composition des fluides, fuites)
- Transparence des données et des résultats (ouverture aux associations

De nombreuses pistes de recherche sont explorées par les chercheurs : améliorer la technique de fracturation hydraulique, la remplacer par une technique alternative, identifier les risques potentiels et chercher à les diminuer. La loi française de 2011, confirmée par le Conseil constitutionnel en 2013, interdit la fracturation hydraulique pour l'exploitation et l'exploration des gaz de schiste. Elle prévoit aussi un cadre légal pour des opérations de recherche avec la mise en place d'un comité d'experts. Un outil de recherche pourrait être un site pilote ouvert à la communauté scientifique. Au vu des controverses en France, il sera probablement difficile de mettre en place un tel site, qui pourrait voir le jour dans un autre pays européen. Si un tel site pilote est réalisé, il sera très important, avant de commencer toute opération de forage, de réaliser un suivi environnemental (eau, air, sismicité) sur plusieurs mois pour obtenir ainsi un « état zéro ». Ensuite, des opérations de forage et des fracturations hydrauliques pourraient être réalisées, tout en assurant un suivi en temps réel des paramètres environnementaux du site pour mesurer tous les effets induits. Un tel site permettrait de répondre à certaines critiques sur les études scientifiques réalisées à ce jour aux États-Unis, où l'état des sites avant exploitation des gaz de schiste n'a pu être réalisé. Il permettrait aussi aux chercheurs de développer de nouvelles pistes pour à la fois exploiter le réservoir de manière plus respectueuse de l'environnement, mais aussi de définir des normes acceptables de protection de l'environnement.

Références bibliographiques

Engelder (T.) (2012) “Capillary tension and imbibition sequester frack fluid in Marcellus gas shale”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* Vol. 109, n° 52, E3625.

Fisher (K.) and Warpinski (N.) (2012), *Hydraulic Fracture-Height Growth: Real Data,* The Society of Petroleum Engineers, SPE Production & Operations, 145949, pp. 8-19.

Jackson (R. B.), Osborn (S. G.), Vengosh (A.), Warner (N. R.) (2011) “Reply to Davies: Hydraulic fracturing remains a possible mechanism for observed methane contamination of drinking water”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* Vol. 108, n° 43, E872.

Meakin (P.), Huang (H.), Malthe-Sørenssen (A.) and Thøgersen (K.) (2013), “Shale gas: Opportunities and challenges”, *Environmental Geosciences,* 20, pp. 151-164.

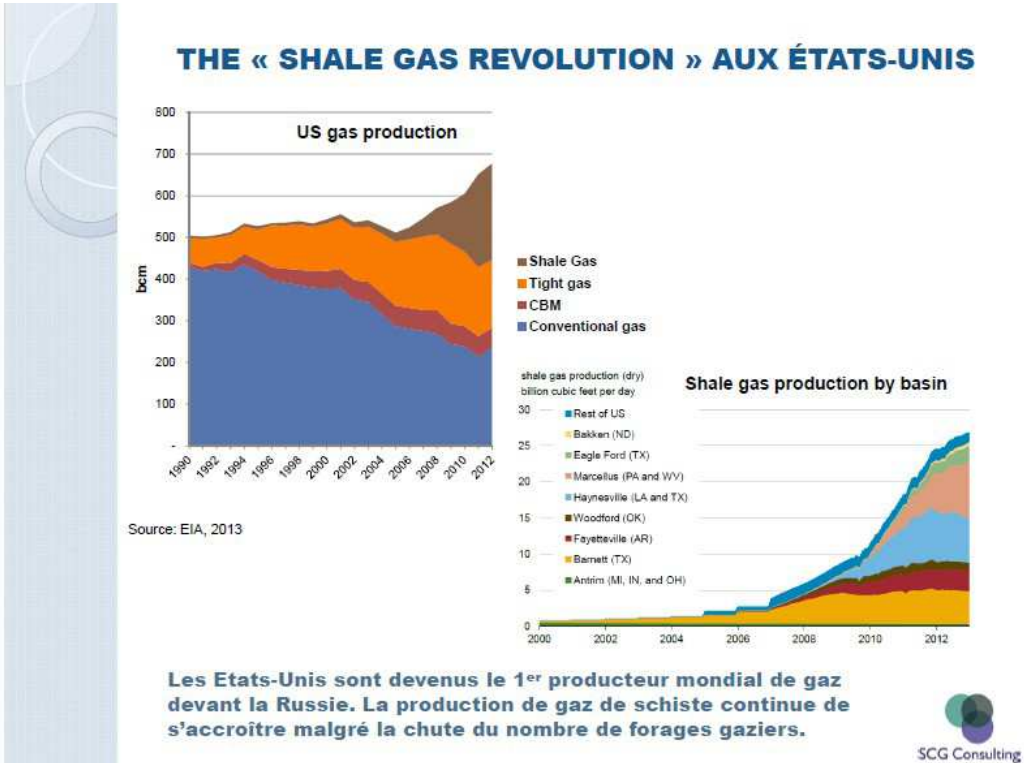
Osborn (S. G.), Vengosh (A.), Warner (N. R.), Jackson (R. B.) (2011) “Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing”. *Proceedings of the National Academy Sciences of the United States of America,* Vol. 108, n° 20, pp. 8172–8176.

Warner (N. R.) et *al.* (2012). “Geochemical evidence for possible natural migration of Marcellus Formation brine to shallow aquifers in Pennsylvania”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* Vol. 109, n° 30, pp. 11961–11966.

Sylvie Cornot-Gandolphe : L'effet « gaz de schiste » sur les industries et marchés gaziers : des différences marquées entre régions

Sylvie Cornot-Gandolphe est consultante en énergie, spécialiste des questions internationales.

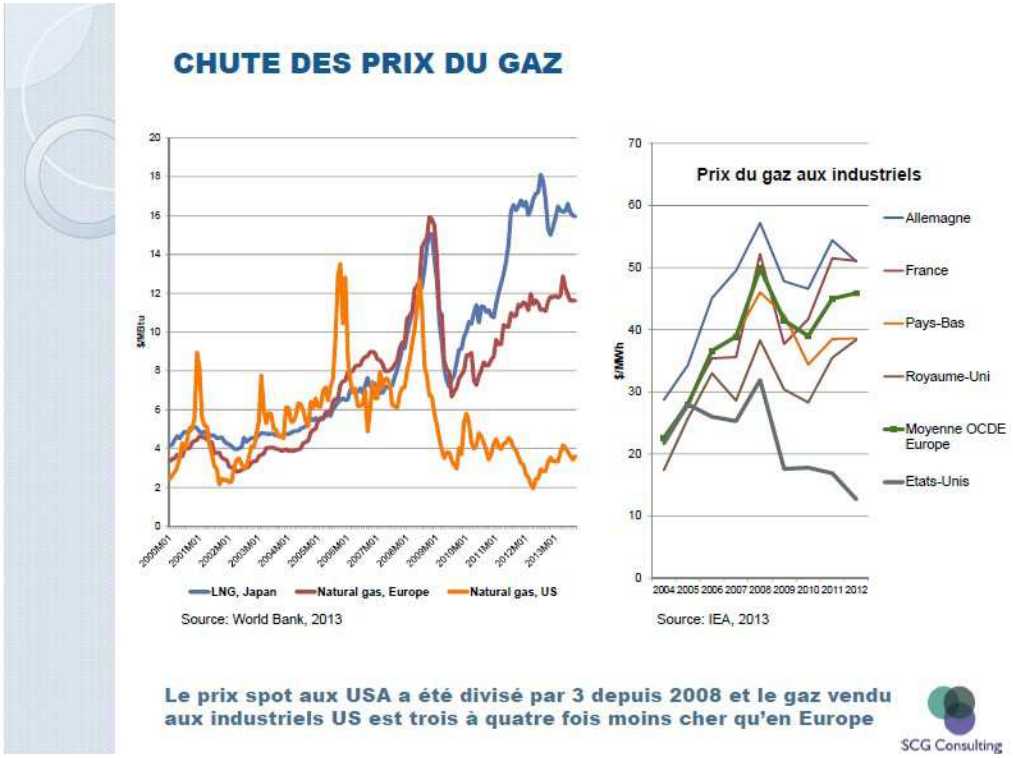
Que se passe-t-il au niveau mondial sur les gaz de schiste ? Quelles peuvent être les conséquences des développements mondiaux sur l'Europe ? Développements mondiaux principalement aux États-Unis et au Canada d'ailleurs puisqu'à l'heure actuelle il n'y a pas encore de développement de production de gaz de schiste dans d'autres zones du monde.



La révolution « gaz de schiste » aux États-Unis

La révolution des gaz de schiste aux États-Unis se marque par la relance de la production gazière US. On observait une baisse de la production de gaz conventionnel. Depuis 2008, on observe un retour à la hausse de la production de gaz américaine de 30 % environ au cours des cinq dernières années avec une part croissante des gaz de schiste qui couvrent 35 % de la production américaine.

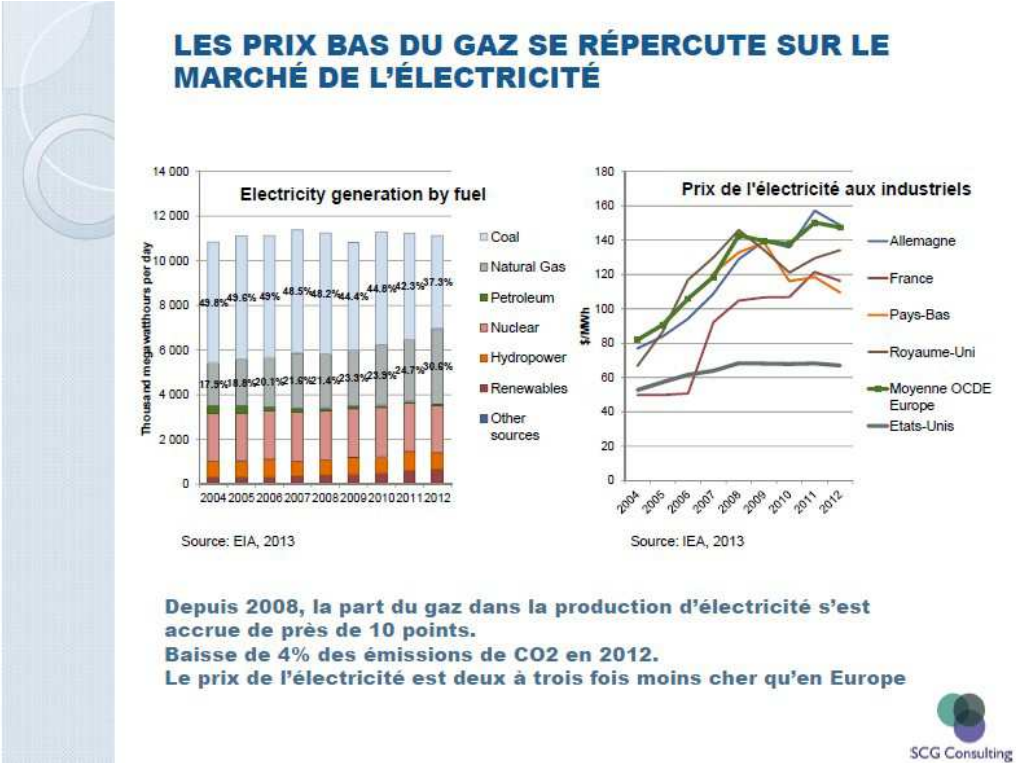
C'est vraiment à partir de 2008 que s'opère le décollage dans les grands bassins de gaz de schiste américains, et l'on continue d'observer une augmentation de la production malgré la chute récente du nombre de forages gaziers aux États-Unis. Ils sont maintenant le premier producteur mondial devant la Russie depuis 2009. Cette arrivée des gaz de schiste a entraîné une surcapacité sur le marché américain qui a fait fortement chuter les prix du gaz.



Le prix du Henry Hub, le prix du GNL importé au Japon et le prix européen étaient proches au début des années 2000. Depuis 2008, le prix du gaz aux États-Unis s'est effondré. Aujourd'hui, on est aux environs de 4 US$ par million de btu à comparer à un prix européen qui est de 12 US$ par million de btu environ. Ça se répercute bien sûr sur le prix de vente du gaz aux industriels et aux ménages. (La courbe du bas, c'est celle du prix industriel aux États-Unis). Aujourd'hui, en moyenne, on a un prix du gaz en Europe qui est environ trois fois plus cher qu'aux États-Unis avec toutes les conséquences qu'on peut voir sur la compétitivité d'industries internationales fortement consommatrices d'énergies.

Un effet direct de cette surcapacité de production et de la baisse du prix du gaz est le quasi-arrêt des importations de gaz aux États-Unis. Au milieu des années 2000, ils devaient devenir un gros importateur de GNL. Ils ont construit des terminaux de regazéification de GNL pour des capacités d'environ 200 milliards de m³. Ces terminaux aujourd'hui ne servent pas pour la bonne raison que les États-Unis n'importent pratiquement plus de GNL.

Cette chute des importations de gaz s'explique directement parce que le prix aux États-Unis est bien plus bas qu'en Europe et en Asie, marchés plus attractifs. On a aussi une vingtaine de projets d'exportations de GNL aux États-Unis vers ces régions qui sont en train d'être construits, il y en a déjà un qui est en construction. Des demandes sont déposées auprès du département de l'Énergie pour pouvoir exporter vers des pays avec lesquels il n'y a pas encore d'accord de libre échange. L'ensemble de ces projets représentent environ 200 milliards de m³. Les exportations potentielles des quatre projets approuvés, c'est 66 milliards de m³. Et ça veut dire que les États-Unis vont redevenir un exportateur net de gaz naturel, *via* le GNL. Ils exportent également beaucoup de gaz naturel par gazoduc, vers le Mexique en particulier.



Autre conséquence des gaz de schiste aux États-Unis : le switch du charbon vers le gaz naturel dans la production d'électricité. La part du charbon a fortement chuté de 50 % à 37 % en 2012, alors que le gaz naturel passe de 21 % en 2008 à près de 31 % en 2012. Cette augmentation de la part du gaz dans la production d'électricité a induit une forte baisse sur le prix de l'électricité vendue aux industriels ou, en tout cas, une limite de la hausse jusqu'en 2012-début 2013.

Les retombées macroéconomiques sont importantes. Selon IHS-CERA, 87 milliards de US$ ont été investis en 2012 dans l'amont de la chaîne des hydrocarbures non conventionnels et des gaz de schiste et huiles de schiste et 2 400 milliards prévus sur la période 2012-2035. Ce sont des investissements énormes qui se retrouvent dans la croissance américaine, en termes d'emplois générés et de recettes fiscales.

INVESTISSEMENTS REVIENNENT AUX USA
EX: PÉTROCHIMIE

Coût de production de l'éthylène, 2012 vs. 2005

Source American Chemistry Council, 2013

Investment in new steam crackers

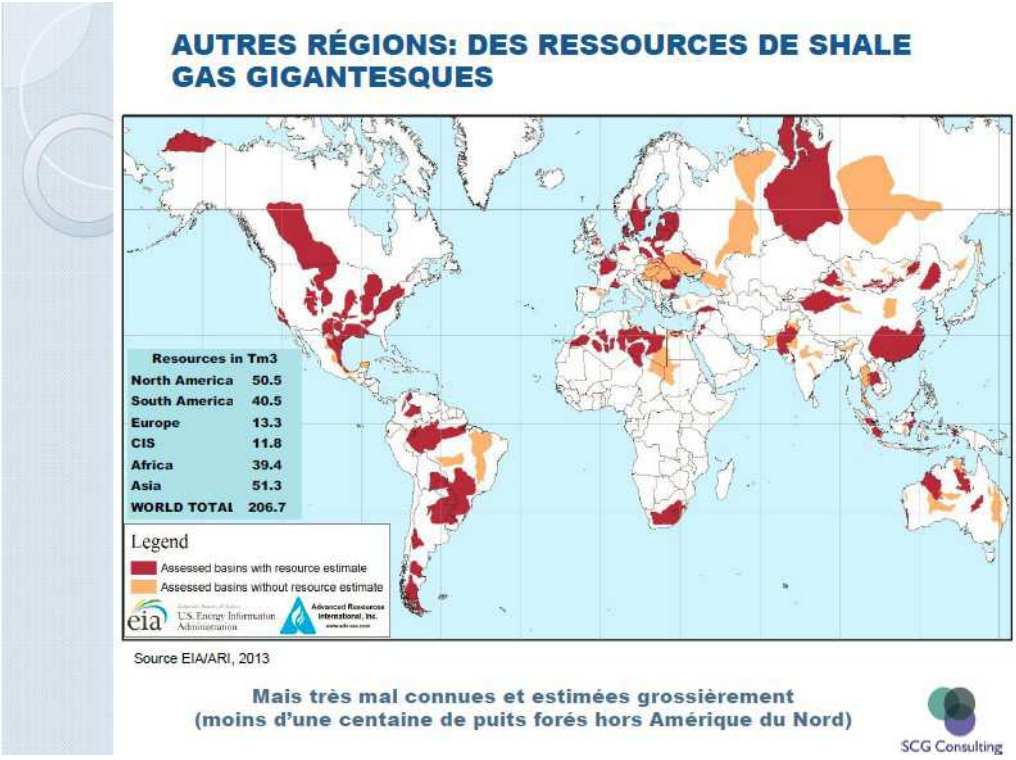
Operator	Headquarters	Location	Capacity (Mt/year of ethylene)	Start-up date
Aither Chemicals/Bayer	USA/Germany	Charleston, W. VA	0.3	2016
Formosa Plastics	Taiwan	Point Comfort, TX	1.2	2016
ExxonMobil Chemical	USA	Baytown, TX	1.5	2016
Chevron Phillips	USA	Baytown, TX	1.5	2017
Dow Chemical	USA	Freeport, TX	1.5	2017
Occidental Chemical/Mexichem	USA/Mexico	Ingleside, TX	0.55	2017
Shell Chemical	Netherlands	Monaca, PA	1	2017
Sasol	South Africa	Lake Charles, LA	1.4	2017
Appalachian Resins	USA	W. Va	0.2	na
TOTAL			9.15	

Source IFRI, 2013

Augmentation des capacités de production d'éthylène (et de polyéthylène) de 40% d'ici 2020

SCG Consulting

L'avantage compétitif profite aussi aux industries fortement consommatrices d'énergies. En particulier, la pétrochimie : le coût de fabrication de l'éthylène qui a très fortement chuté par rapport à l'Europe, avec, en conséquence, une construction d'une dizaine de vapocraqueurs d'éthylène alors que, malheureusement, en Europe, on les ferme.



Le gaz de schiste dans les autres régions du monde

Des gaz de roches mères se retrouvent partout. Les ressources au niveau mondial totalisent 207 000 milliards de m^3, l'équivalent des réserves prouvées de gaz naturel conventionnel. C'est vrai que, dans un cas, on parle de réserves prouvées que l'on peut exploiter aux prix d'aujourd'hui avec les technologies d'aujourd'hui. Dans l'autre cas, on parle de ressources mal connues qui sont estimées grossièrement à partir de l'épaisseur de la roche, de sa superficie et de son contenu en matière première. Je signale aussi sur ce graphique qu'il y a eu moins de quelques centaines de puits forés dans le monde hors bien sûr l'Amérique du Nord ; ça veut dire qu'on ne sait pas précisément ce qu'on a.

Il faudra beaucoup de temps pour mieux connaître ces ressources : il faut faire des études de faisabilité, de préfaisabilité, il faut faire de l'exploration, faire des pilotes de production et enfin faire du développement de cette production commerciale. En Europe, on en est entre la faisabilité et les premières études d'exploration. On ne sait pas encore ce qu'on a dans notre sous-sol, même si on en connaît bien les ressources potentielles : il faut forer… surtout forer pour savoir, autrement on ne saura pas.

Ailleurs qu'aux États-Unis on ne retrouvera jamais la situation très favorable au développement des gaz de schiste (voir tableau suivant), même dans les pays très prometteurs comme l'Australie où pourtant il

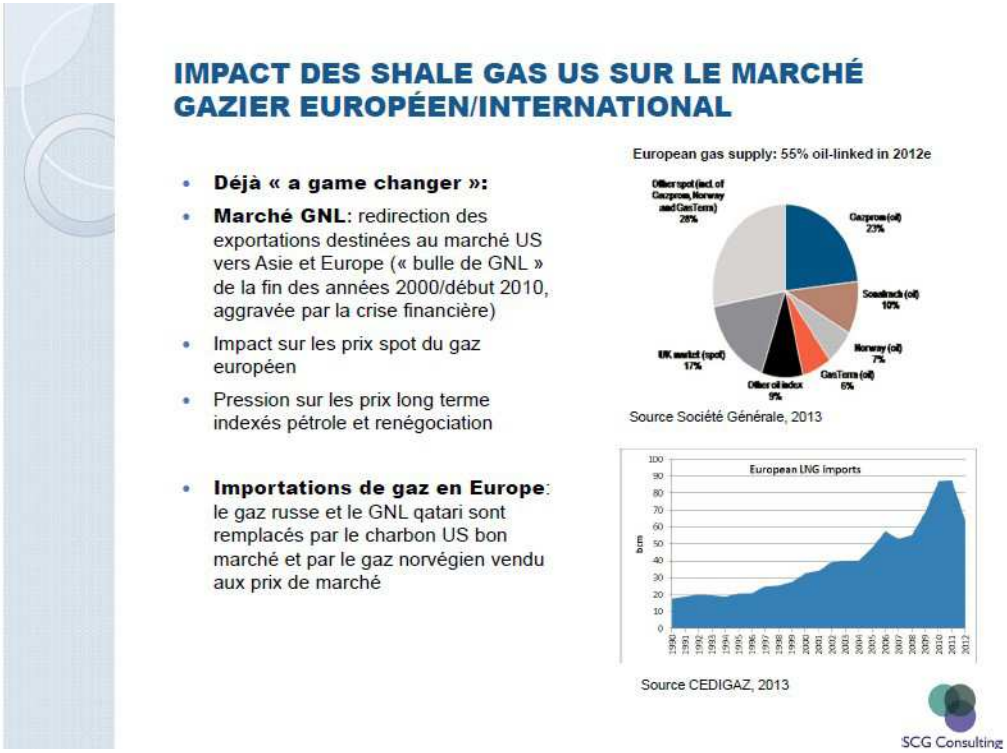
y a de l’espace et des roches mères partout, avec des ressources potentielles équivalentes à celles des États-Unis. Il n’y a pas les ressources en eau, le droit du sous-sol, le tissu d’entreprises pétrolières, etc.

LA SITUATION AMÉRICAINE EST UNIQUE

- Géologie favorable: des roches-mères continues sur de grandes étendues, moins profondes qu'en Europe
- Propriété du sous-sol (les propriétaires de terrains détiennent la propriété du sous-sol)
- Densité de population (100 à 200 hab. /km^2 en Europe, à comparer à 30 hab./km^2 aux USA
- Degré de développement et de libéralisation du marché gazier/Etendue du réseau gazier
- Un tissu très dense de sociétés spécialisées dans le secteur pétrolier
- Les populations sont habituées aux travaux des pétroliers dans plusieurs régions (e.g.Texas),
- Disponibilité en eau (sauf dans certains Etats)
- Réglementation environnementale favorable (exemption au niveau fédéral de certaines obligations du Clean Air Act et Water Act)

SCG Consulting

En Europe, on a une géologie qui est moins favorable avec des roches plus compliquées, plus complexes et plus profondes, la propriété publique du sous-sol, ce qui supprime toute incitation privée à recevoir un forage. Une densité de population qui n'a rien à voir, un degré de développement du marché gazier moins mature et moins libéralisé pour faciliter les entrées, un tissu bien moins dense de sociétés de forage, des contraintes plus fortes d'usage des eaux.



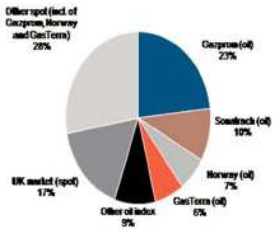
Pour l'heure on a surtout un impact indirect des gaz de schiste américains sur le reste du monde et en particulier sur l'Europe, *via* les prix actuels d'importations de gaz et du charbon (voir slides ci-dessous). À plus long terme, les importations de GNL qui seraient allées vers le marché américain déstabilisent le marché européen dominé jusqu'ici par le « gaz contractuel » avec des indexations du prix sur les prix des produits pétroliers. Elles rendent le marché spot plus liquide avec des prix plus bas que celui des contrats, ce qui amène à définir de nouvelles formules de prix dans les contrats avec une dominante prix spot.

IMPACT DES SHALE GAS US SUR LE MARCHÉ GAZIER EUROPÉEN/INTERNATIONAL

- **Déjà « a game changer »:**
- **Marché GNL**: redirection des exportations destinées au marché US vers Asie et Europe (« bulle de GNL » de la fin des années 2000/début 2010, aggravée par la crise financière)
- Impact sur les prix spot du gaz européen
- Pression sur les prix long terme indexés pétrole et renégociation

- **Importations de gaz en Europe**: le gaz russe et le GNL qatari sont remplacés par le charbon US bon marché et par le gaz norvégien vendu aux prix de marché

European gas supply: 55% oil-linked in 2012e



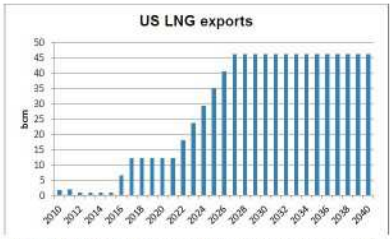
Source Société Générale, 2013

Source CEDIGAZ, 2013

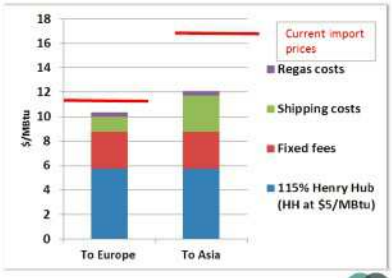
SCG Consulting

IMPACT SUR L'OFFRE DE GAZ/GNL MONDIALE ET EUROPÉENNE À MOYEN/LONG TERME

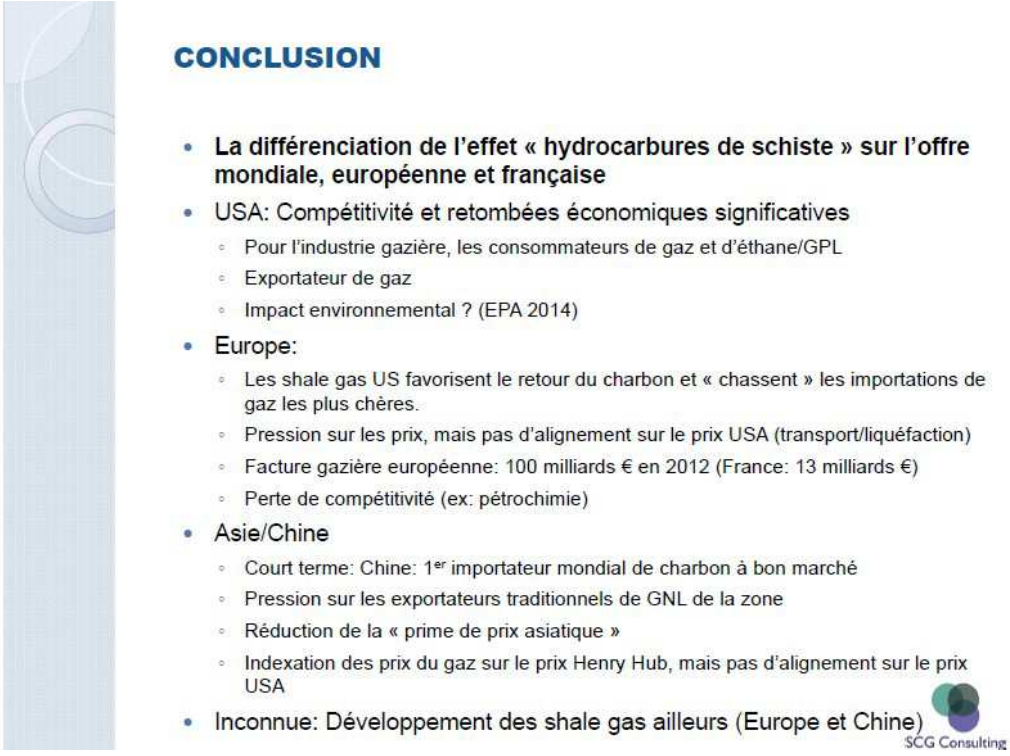
- Nouveaux projets GNL: impact sur les projets les plus capitalistiques
- Impact sur le prix du gaz international:
  - Niveau des exportations de GNL US
  - Destination des exportations US
  - A quel prix?
- Exportations limitées dans le scénario de référence de l'EIA → équilibre entre gaz bon marché sur le marché intérieur et exports GNL
- Prix et dynamique du marché favorisent les exportations vers l'Asie
- **Pression sur les exportateurs traditionnels de GNL et sur la détermination des prix**
- **indexation Henry Hub**
- **Mais pas d'alignement des prix (coûts de transport/liquéfaction)**



Source EIA, Annual Energy Outlook, 2013 (reference scenario)



SCG Consulting

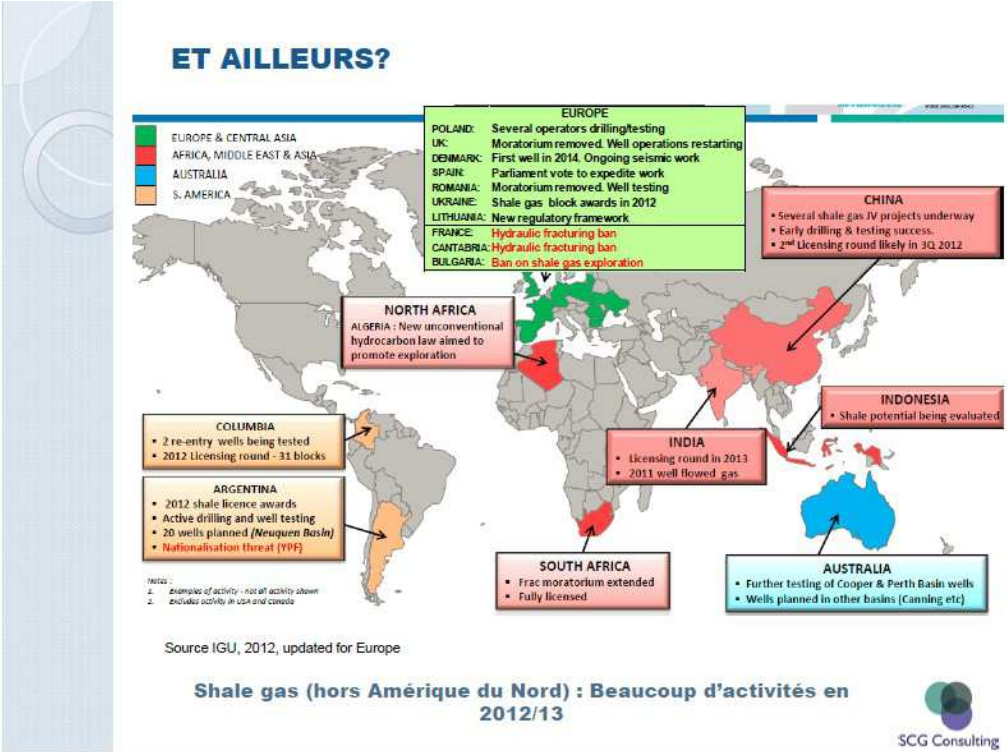


Conclusion

Pour répondre à la question de la différenciation de l'effet hydrocarbure de schiste sur l'offre régionale de gaz. Sur les États-Unis, on voit un avantage compétitif qui est en train de se dessiner par rapport aux autres régions du monde et une indépendance gazière se reconstituer, les États-Unis sont même exportateurs de gaz. Sur les pollutions, en lisant les nombreux rapports sur la pollution des eaux, on observe qu'à chaque fois les problèmes environnementaux créés par l'exploitation des gaz de schiste sont dus à un non-respect des règles de l'art, notamment la mauvaise cimentation des puits. Donc, si l'on fait une bonne cimentation des puits *a priori,* on n'a pas de problème environnemental.

En Europe, l'effet majeur est que les *shale gas* américains sont en train de chasser les importations de gaz les plus chères, et l'on observe un retour du charbon dû à la baisse du prix du charbon américain du fait des surplus non enlevés par les centrales charbon américaines. En même temps, il y a une accélération de la fermeture des sites de pétrochimie.

En France, avec 13 milliards d'euros de facture gazière, l'exploitation des gaz de schiste pourrait permettre de diminuer cette facture, mais ce ne sera pas une révolution à l'américain. Au lieu d'importer 100 % de notre gaz, on en importera 70 ou 80 %. Ce serait aussi un peu plus d'activité industrielle.



Dans les autres régions du monde : l'Asie et la Chine. La Chine est devenue le premier importateur au monde de charbon bon marché. Ce n'est pas forcément du charbon US, mais il y en a, c'est du charbon bon marché parce que le prix du charbon a baissé partout. Et ce qu'on verra par la suite, c'est la même chose qu'en Europe, c'est-à-dire une pression sur les exportateurs traditionnels de GNL vers l'Asie qui vont être obligés de baisser leur prix, voire de passer à de nouvelles indexations, plus d'indexation de pétrole, mais une indexation prix de marché, en particulier sur le prix du gaz américain en « Henry Hub ».

Je conclus en disant qu'on a une grande inconnue : quel sera le développement des *shale gas* ailleurs et donc leurs impacts futurs ? À l'heure actuelle, on ne peut faire que des hypothèses.

Minh Ha-Duong : Le CSC à grande échelle, une option réaliste ? État des lieux et des controverses

Minh Ha-Duong est directeur de recherche au Cired.

Minh Ha-Duong : Je vais rapidement vous présenter l'état des lieux des technologies de captage, transport et stockage du CO_2 (CSC) et pointer quelques controverses notoires à leur propos.

Grands projets intégrés dans le monde : un développement lent

Comme Alain Nadaï l'a dit précédemment, un certain nombre de grands projets intégrés de CSC existent déjà dans le monde. La définition de grands projets, c'est « on capte et on stocke » ou « on stocke et on transporte » plus de 800 000 tonnes de CO_2 par an par les projets associés des centrales électriques, ou bien 400 000 tonnes de CO_2 par an pour d'autres projets.

Le nombre de grands projets intégrés augmente

	2009	2012	2013
Operationnel	**8**	**8**	**12**
En construction	**2**	**8**	**9**
Planifié	**54**	**59**	**44**

Source : GCCSI, accédé 22/10/2013.
Voir aussi le 2013 CCS Status Report : http://www.globalccsinstitute.com/publications/global-status-ccs-2013/online/117746

R&Dialogue

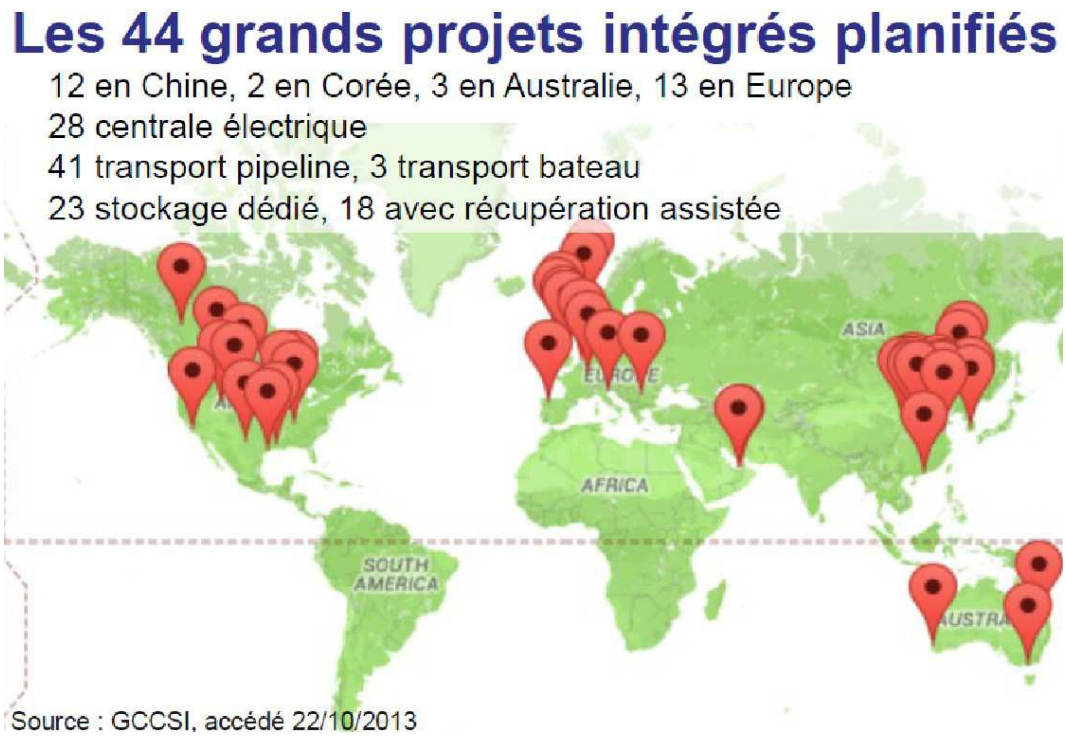
Le nombre de ces grands projets était de 75 l'année dernière. Ce nombre a diminué cette année. Si l'on regarde le degré d'avancement, nous pouvons distinguer trois classes : les projets opérationnels, les projets en construction et les projets planifiés pour lesquels on n'a pas encore commencé à verser le béton. Le nombre de projets opérationnels a augmenté de 50 % l'année dernière.

Où se situent ces projets ? Regardons les 21 grands projets actifs dans le monde, dont les douze projets opérationnels. On peut voir qu'il n'y en a pas beaucoup en Europe, surtout si l'on prend en considération que la Norvège n'est pas dans l'Union européenne.

La majorité des projets opérationnels sont des projets sur des gisements de gaz naturel. Quand on produit du gaz naturel, on produit aussi le CO_2 associé. Par conséquent, il est nécessaire de les séparer puisque le CO_2 ne peut pas être vendu avec le gaz naturel. Il s'agit de fait d'une source de CO_2 quasi pur à coût quasi nul.

La majorité des projets utilisent le transport par pipeline excepté deux projets situés sur une plate-forme de production du gaz naturel. Ces deux projets ne nécessitent pas de transport, il suffit d'injecter avec une plate-forme juste à côté.

La grande majorité des projets qui fonctionnent sont des projets dont le but premier n'est pas de stocker le CO_2 mais bien de récupérer davantage d'hydrocarbures, donc de pétrole ou de gaz.



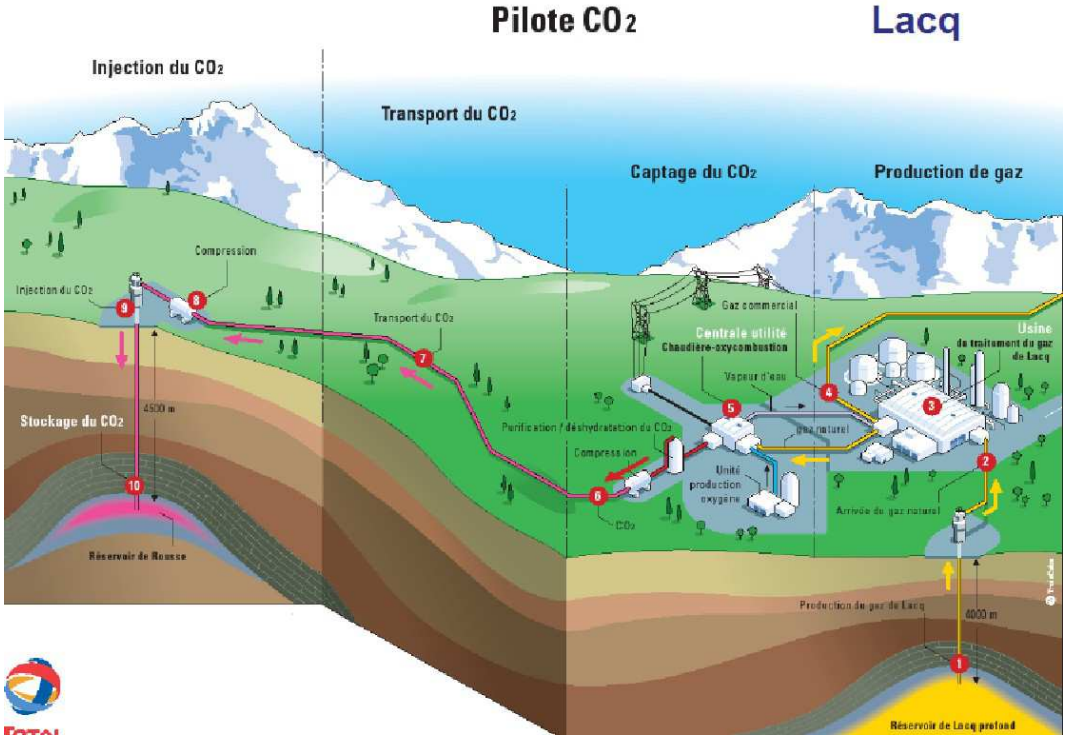
Voyons maintenant les projets en développement. Ce sont des projets planifiés : bien entendu, certains seront abandonnés et de nouveaux seront créés. Que constate-t-on ?

Le centre de gravité du développement du CCS s'est considérablement déplacé vers la Chine (et vers la Corée qui développe deux projets).

Les projets en développement commencent à intéresser des centrales électriques, alors qu'auparavant c'était surtout des unités de production de gaz naturel, des centrales de production d'engrais et d'hydrogène.

On voit émerger les trois projets pour lesquels le transport se fait par bateau. Un en Chine et deux en Corée.

Il s'agit majoritairement de projets avec stockage dédié plutôt que de récupération assistée d'hydrocarbures.



En France, plus d'échecs que de succès

Au sujet de la France. Nous n'avons pas de grands projets intégrés. Nous avons un projet qui a bien marché à Lacq. Projet qui consistait à stocker du CO_2 qui était produit sur une chaudière à oxy-combustion et à le réinjecter dans une poche du gisement de gaz de Lacq. Un peu plus que 50 000 tonnes de CO_2 ont ainsi été stockées, et l'injection s'est arrêtée au mois de mars.

Le Havre

- ✗ **COCATE** Mutualisation des fumées, captage et export du CO2
- ✓ **C2A2** Démonstrateur captage 1t/h , solvant et process innovants

Au Havre, un fort intérêt a débouché sur deux projets.

Une étude sur la mutualisation des fumées des établissements industriels dans la zone, avec la possibilité d'un pipeline jusqu'à Rotterdam pour exporter le CO_2. Le projet a conclu que ce n'était pas rentable et qu'il ne fallait pas le mettre en œuvre dans l'immédiat.

Par contre sur la centrale EDF que vous pouvez voir ici, il y a un pilote de système de captage de CO_2. Ce pilote démontre la faisabilité d'un process et d'un solvant innovants qui permettent de gagner quelques points de rentabilité pour le captage du CO_2. Le pilote est à une échelle d'une tonne par heure, ce qui est considéré comme une petite échelle. C'est l'échelle d'un système de captage de CO_2 pour fabriquer des boissons industrielles. Ce projet a capté ses premières tonnes en juillet.

Ailleurs en France

- **France-Nord** Prospection d'un site de stockage pilote dans l'aquifère du bassin Parisien, pour taille industrielle.
- **Projet de Véolia à Claye Souilly** Visait enfouir 200 000t / an.
- **Projet ULCOS à Florange** Remplacé par LIS – Low Impact Steel. Promis 13M€ privés, 19 M€ publics.

R&Dialogue

Ailleurs, en France, il y a eu le projet France-Nord. Les partenaires ont cherché un site pilote pour pouvoir injecter du CO_2 à taille industrielle dans le Bassin parisien. Ils n'ont pas trouvé un tel site.

Il y a eu le projet de Claye-Souilly, interrompu assez rapidement.

Il y a eu également le projet ULCOS qui est devenu complètement politique. Ce n'était plus un projet de recherche, c'était un projet social. 13 millions d'euros étaient promis. Le nouveau projet est « Low Impact Steel », c'est-à-dire que c'est un projet de recherche et non plus un projet de stockage. Et ce n’est pas nécessairement à Florange.

Catastrophe du Lac Nyos, Cameroun: 1700 morts, 21/08/1986

Etat des controverses : les risques : rejet du CO2 ou rejet du projet ?

Maintenant, je vais vous présenter quelques controverses significatives dans le domaine.

Je débuterai par la réalité du risque. Le risque, comme Olivier Godard l'a souligné, est double : il y a le risque environnemental et le risque inverse, c'est-à-dire le risque que le projet ne passe pas. Effectivement, le CO_2 est un gaz toxique et il est produit en quantité importante par le volcanisme en particulier. Et s'il y a des phénomènes de relargage brutal non linéaire, cela peut asphyxier la communauté avoisinante, comme ici lors de la catastrophe du lac Nyos au Camaroun en 1986 qui a provoqué la mort de 1 700 personnes.

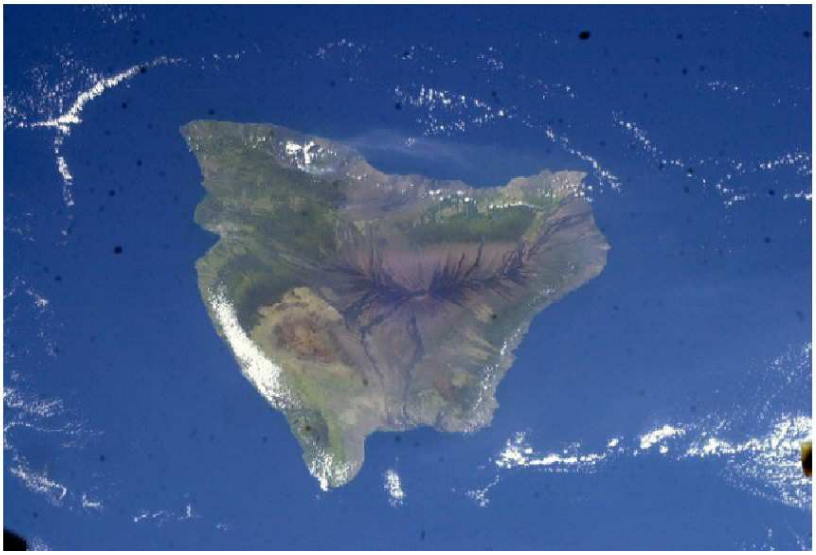
Effusion naturelle de CO2

Analogue d'une fuite par un puit abandonné ?

Quand ils pensent à un stockage de CO_2 qui fuit, les experts pensent plutôt à quelque chose comme ceci, c'est-à-dire à une émanation ponctuelle de CO_2 d'un puits abandonné qui aurait été mal rebouché et qui pourrait créer des acidifications du sol et tuer la végétation.

Rejet d'un projet de recherche d'injection du CO2 en mer

"Feds to Test Impact of Dumping CO2 into Kona Waters"
West Hawaii Today, 18/3/1999.



Le cas du projet d'Hawaï, comme Alain Nadaï l'a expliqué précédemment, illustre bien le fait que le refus d'un projet peut entraîner le refus de toute une option technologique. Comme Francis Chateauraynaud l'explique, si un seul site de stockage explose une tête de puits, cela pourrait compromettre politiquement la technologie de stockage dans son ensemble.

Un remède pire que le mal pour Greenpeace

Trop lointain. La technologie du CSC [...] ne sera disponible à grande échelle au plus tôt en 2030 [...] Nous ne pouvons pas nous permettre d'attendre vingt ans.

Trop énergivore. Le captage et le stockage du carbone consomment [...] entre 10 et 40% de la capacité d'une centrale électrique. Pour compenser ces pertes, il faudrait construire de nouvelles centrales thermiques. Il faudrait donc plus de charbon, c'est-à-dire plus d'émissions de CO2 ! Le CSC ne permet pas de réduire ces émissions. Il les augmente !

Trop cher. Ce gaspillage a un coût. Il s'ajoutera aux sommes colossales investies dans la recherche sur le CSC et aux frais d'installation des infrastructures. [...] augmentation de 21 à 91% des prix de l'électricité ! Il serait plus judicieux de consacrer ces fonds au développement des énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique.

Trop dangereux. Il est impossible de garantir un stockage sûr et permanent du CO2. Les risques de fuites existent, même si personne ne peut les quantifier avec précision dès aujourd'hui. Ce qui est sûr, c'est que toute fuite a des conséquences sur l'environnement, le climat et la santé humaine. [...]

R&Dialogue

Interférences des controverses sur le principe et sur les projets

Venons-en aux controverses. Tout d'abord, il y a des controverses sur le principe et puis des controverses sur le projet. Et ce qui se passe c'est que les deux interfèrent de façon parfois surprenante. La controverse sur le principe est clairement articulée par Greenpeace qui dit que le stockage n'est pas une option à poursuivre. Trop lointain, trop énergivore, trop cher et trop dangereux. En particulier, le stockage consomme encore plus d'énergie, donc ça pourrait émettre encore plus de CO_2.

L'illustration ci-dessus est celle de la manifestation contre le projet de Total à Lacq. On voit en particulier que les personnes ne sont pas tellement intéressées par les risques techniques mais qu'elles protestent contre Total en général, contre Monsanto aussi. Finalement, leurs arguments sont contre l'industriel. Ce sont des problèmes de confiance et de controverses plus que des problèmes scientifiques et techniques.

Une option pour d'autres

WWF, Amis de la Terre. La technologie du CSC pourrait jouer un rôle, mais c'est à l'industrie de payer. Il serait plus judicieux de consacrer les fonds publics au développement des énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique.

US EPA. Power sector carbon pollution standards (proposés) : une nouvelle centrale charbon ne devrait pas emettre plus de CO2 que les centrales à gaz. Verrouillage ?

Bellona, Zero Emission Platform. Promoteurs actifs du captage et le stockage du carbone. Demandent un plancher du prix du CO2, assistance au développement/démonstration de la technologie, une régulation efficace.

IEA. CCS is an integral part of any lowest-cost mitigation scenario where long-term global average temperature increases are limited to significantly less than 4°C, particularly for 2°C scenarios (2013 technology roadmap). Besoin de 30 démonstrateurs en 2020, stockage de 2Gt de CO2 par an en 2030 et 7Gt en 2050.

R&Dialogue

En revanche, la position de Greenpeace n'est pas forcément majoritaire. Il existe d'autres ONG. Le consensus sur les autres ONG c'est que, finalement, ce qui est le plus important, c'est d'interdire les centrales à charbon sans le stockage du CO_2 parce que le charbon pollue vraiment trop. Le consensus social au niveau des ONG, ce ne serait pas de nouvelles centrales à charbon sans captage de CO_2.

Et c'est un peu la direction que prennent les États-Unis puisque Barack Obama a demandé à l'EPA de réviser ses standards des émissions des centrales électriques. Et la proposition de l'EPA c'est de dire que les centrales électriques à charbon ne doivent pas émettre plus de 1 000 tonnes de CO_2 par mégawattheure, c'est-à-dire ne doivent pas émettre plus que les centrales à gaz. Comme à la base les centrales à charbon émettent deux fois plus que les centrales à gaz c'est-à-dire qu'il faut qu'elles réduisent leurs émissions d'à peu près 40 %, donc pas de nouvelles centrales à charbon sans CCS.

Il y a une portée politique à faire passer cette mesure. L'opportunité est que les États-Unis n'ont pas prévu de faire de nouvelles centrales à charbon puisque le gaz est tellement peu cher.

Comme Alain Nadaï vous l'a expliqué, il y a un lobby actif, le Zero Emission Platform et l'Agence internationale de l'énergie qui est de façon un peu surprenante le promoteur assez actif du développement du captage et du stockage du CO_2. Ils ont révisé leur feuille de route alors qu'ils étaient vraiment hyperoptimistes en 2008, mais ils restent très volontaristes et disent : « Oui, dans tous nos scénarios, il y a des CCS. »

Ce projet qui devait démontrer le stockage du CO_2 onshore en Europe n'a pas été accepté : c'est le projet de Barendrecht aux Pays-Bas.

Conclusion

Est-ce une option réaliste ? Je vais décliner la question en trois parties.

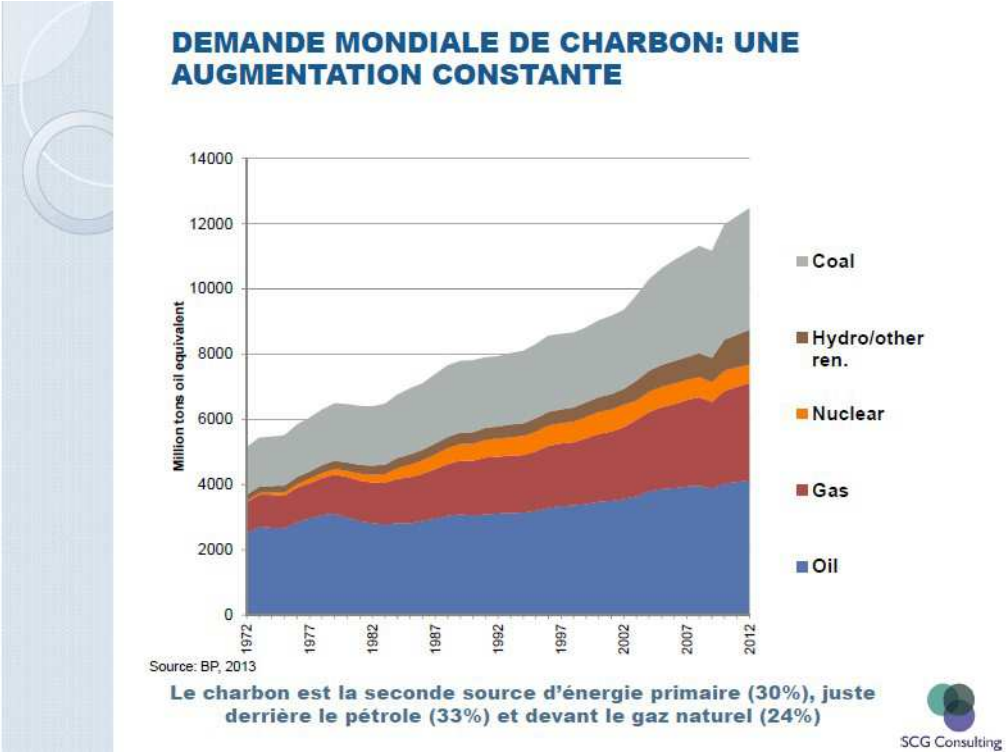
Est-ce une option politique climatique qui compte encore pour l'Europe et pour la France ? Je dirais plutôt oui, parce que, finalement, le stockage de CO_2, ce ne sont pas juste et forcément les centrales à charbon. Peut-être est-ce aussi l'industrie qui aura des productions de CO_2 à coût relativement moins important que les centrales à charbon ?

Ce n'est pas seulement une option de politique climatique mais c'est aussi une option de politique industrielle. Et nous savons que dans tous les développements la transition énergétique c'est aussi une option de politique industrielle. Alors les champions industriels français et européens sont-ils encore dans la course ? C'est devenu le CCUS parce qu'on ne s'intéresse pas seulement au stockage mais aussi à l'utilisation. Les champions industriels européens et français sont des entreprises mondiales. Que le test ou le développement se passe en France ou ailleurs, ils y participent quand même. On retrouve par exemple Alstom et Air Liquide dans tous les projets dans le monde. Donc oui, ils sont encore plutôt dans la course.

En revanche, je suis beaucoup plus réservé sur le fait d'envisager le stockage géologique onshore en France et en Europe aujourd'hui.

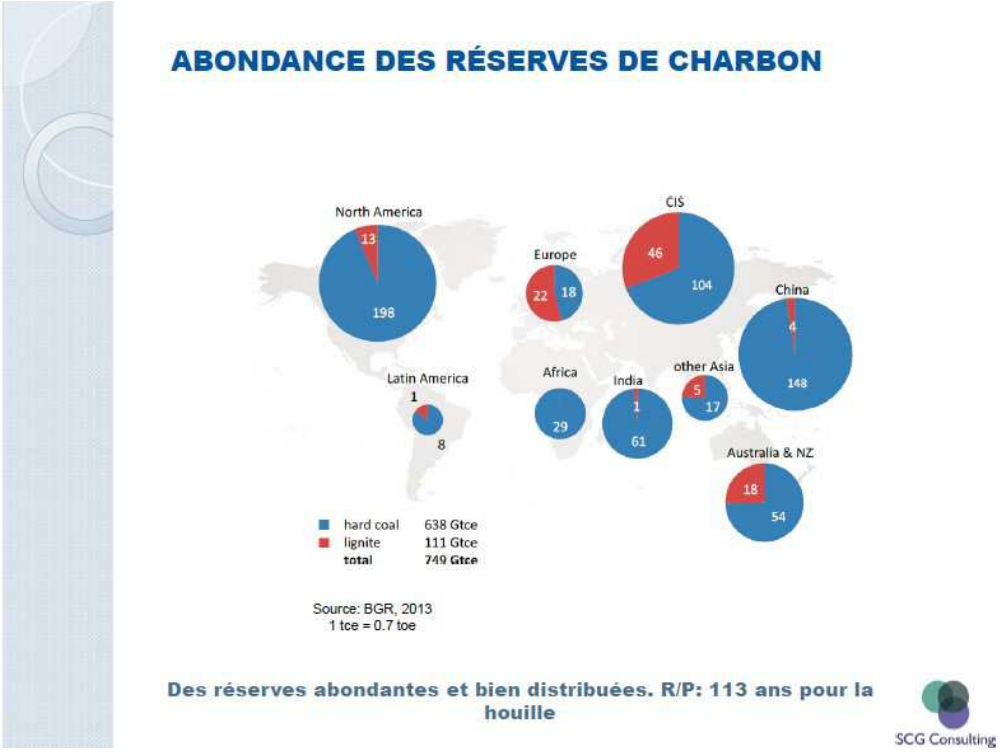
Sylvie Cornot-Gandolphe : Fin ou retour des énergies fossiles ? Le charbon appuyé par CSC

Sylvie Cornot-Gandolphe est consultante en énergie, spécialiste des questions internationales.

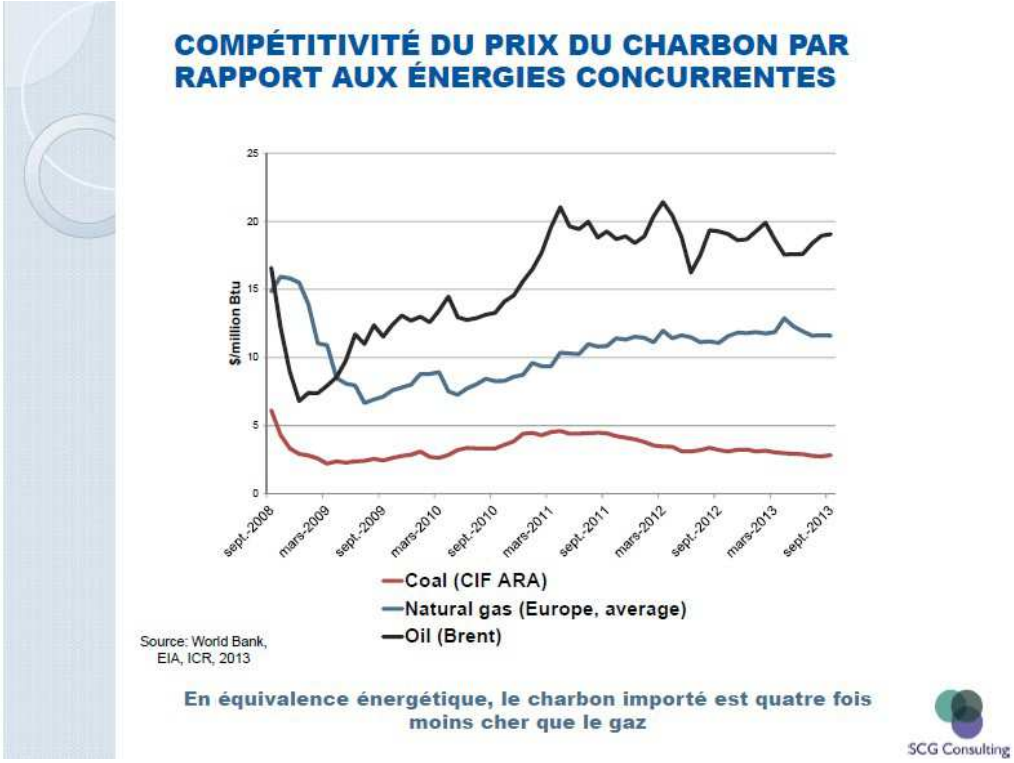


Quel retour du charbon ?

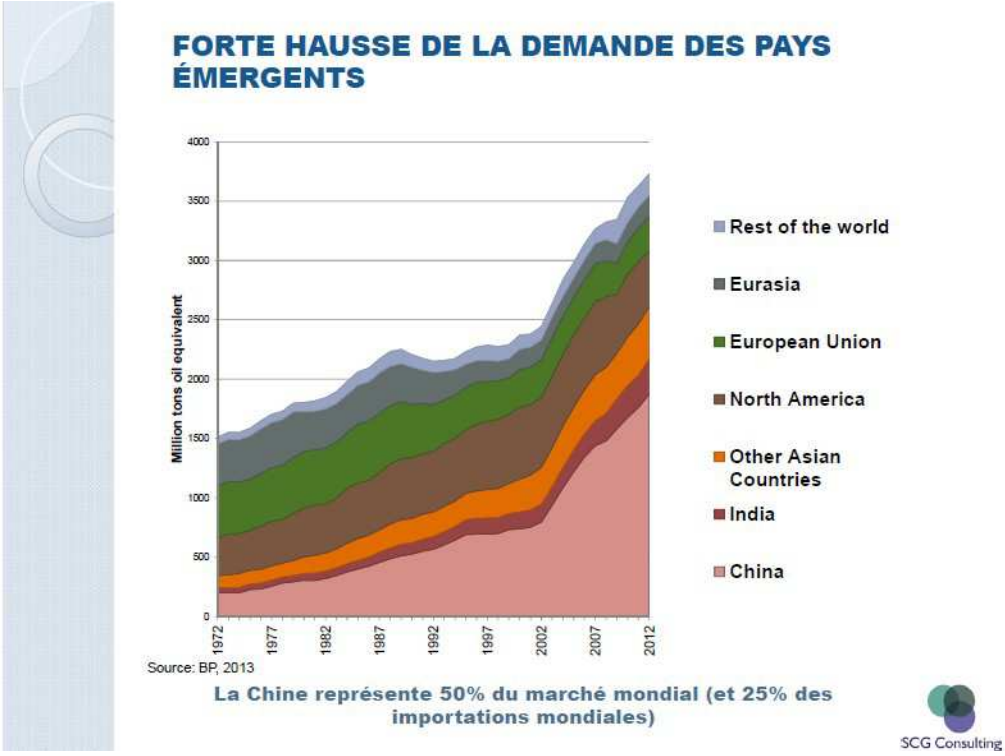
Pour commencer, j'aimerais bien souligner que lorqu'on parle parfois de retour du charbon il n'est jamais parti vraiment. Le charbon c'est quand même 30 % du bilan énergétique mondial. Au cours des quarante dernières années, sa part dans le bilan énergétique mondial n'a jamais diminué : elle a toujours été entre 27 et 30 %, alors que les prévisions de l'IIASA au milieu des années 1970 prédisaient que le charbon allait disparaître du mix énergétique mondial et n'assurerait en 2010 que 5 % du bilan énergétique mondial. Ce n'est pas arrivé.



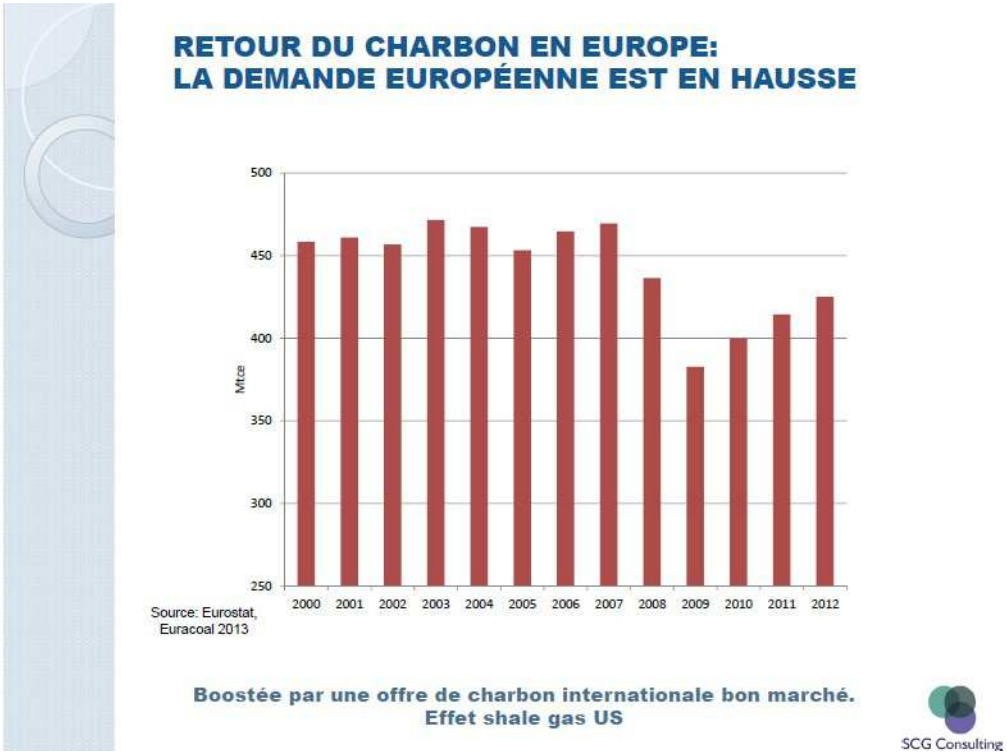
Cette constance du charbon dans le mix a trois principales raisons. La première, bien sûr, c'est l'abondance des réserves. Au niveau mondial, on a environ 750 gigatonnes d'équivalent charbon, soit pour la houille cent treize ans de production actuelle et, pour le lignite, plus de deux cents ans. Deuxième raison : la compétitivité du charbon par rapport aux énergies concurrentes. Alors, le charbon, il est à 80 % utilisé dans les centrales thermiques.



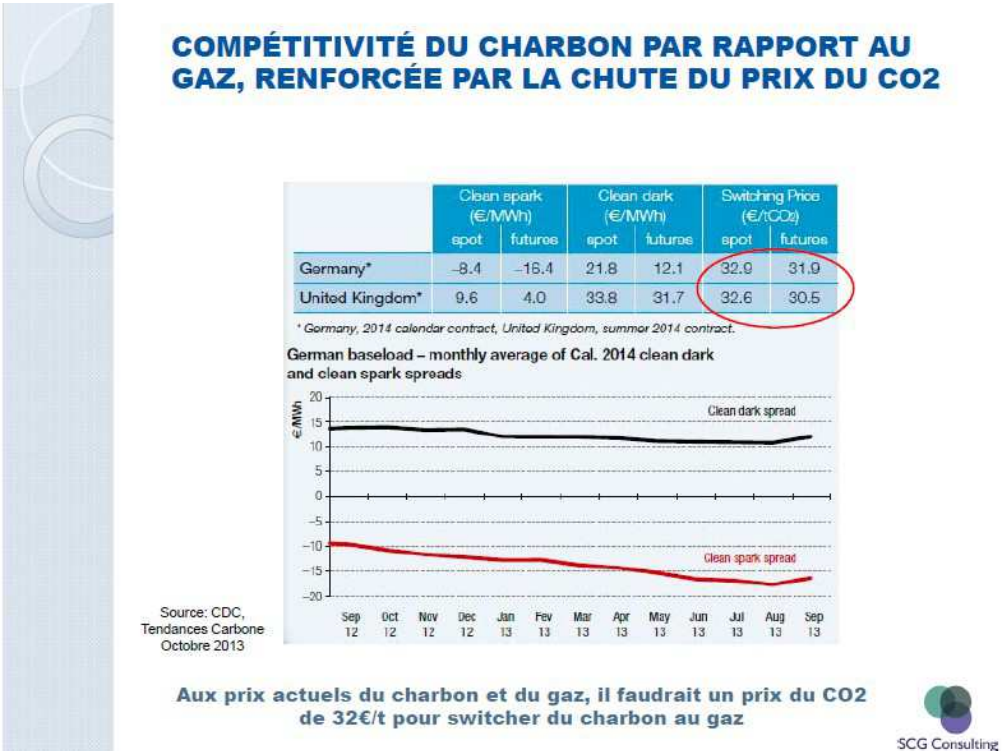
Quand on compare effectivement le prix du charbon (c'est la courbe du bas) avec le prix du gaz (la courbe bleue au milieu), on s'aperçoit que le charbon importé en Europe est quatre fois moins cher que le gaz naturel, qu'il est donc très compétitif. Cela commence en septembre 2008. On a toujours eu cette compétitivité du charbon par rapport au gaz.



Troisième raison pour laquelle la consommation mondiale de charbon se développe : les besoins des pays émergents, en particulier la Chine. Elle a plus que doublé sa consommation de charbon au cours des dix dernières années. La croissance économique de la Chine est basée à l’heure actuelle sur le charbon qui alimente 80 % de la production d'électricité. La Chine représente 50 % du marché mondial du charbon : tout ce qui s’y passe est déterminant pour le marché mondial. Aujourd'hui, elle importe 25 % du charbon commercialisé dans le monde, ce qui veut dire qu’elle a un rôle déterminant dans la fixation du prix du charbon international.

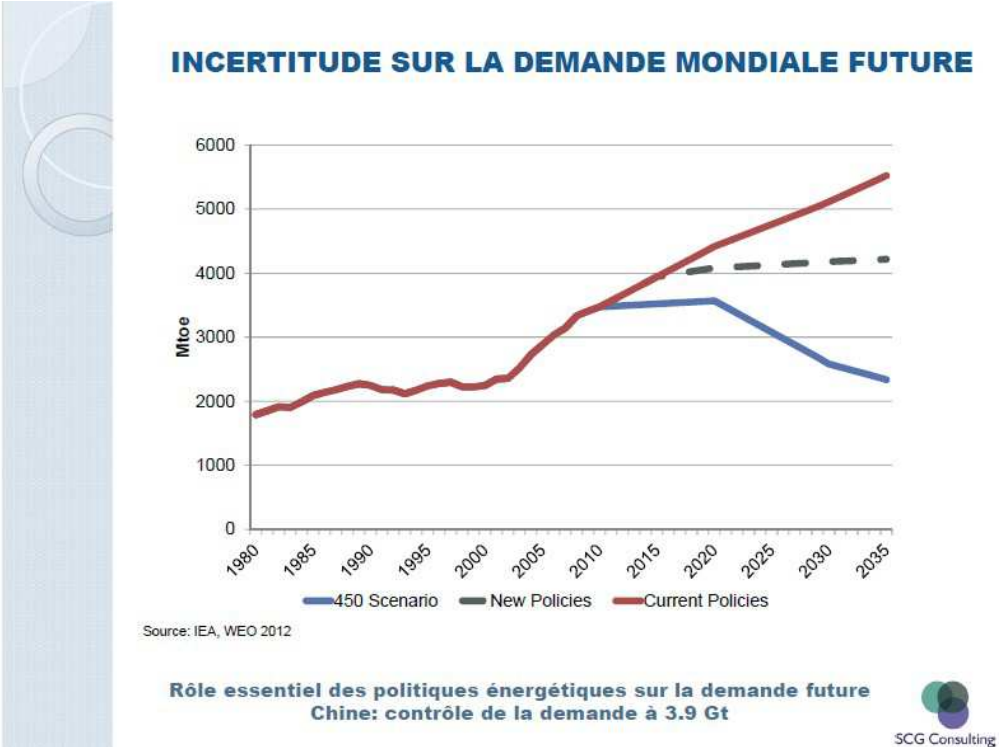


Le retour du charbon en Europe est toutefois modéré et probablement temporaire. En Europe, on avait une tendance lourde à la diminution de la consommation de charbon. Ce que montre ce graphique, ce sont des millions de tonnes équivalents charbon. On a eu effectivement une diminution de la consommation de charbon. On s'attendait à ce que le charbon disparaisse doucement du bilan européen aux environs de 2030. La reprise de la consommation de charbon se fait principalement dans les centrales électriques avec un accroissement total de 4 % par an. Cela peut être plus important dans certains pays, comme en Pologne et en Allemagne, où effectivement il y a une forte augmentation. Il ne faut pas oublier non plus les pays comme la Grande-Bretagne ou l'Espagne.



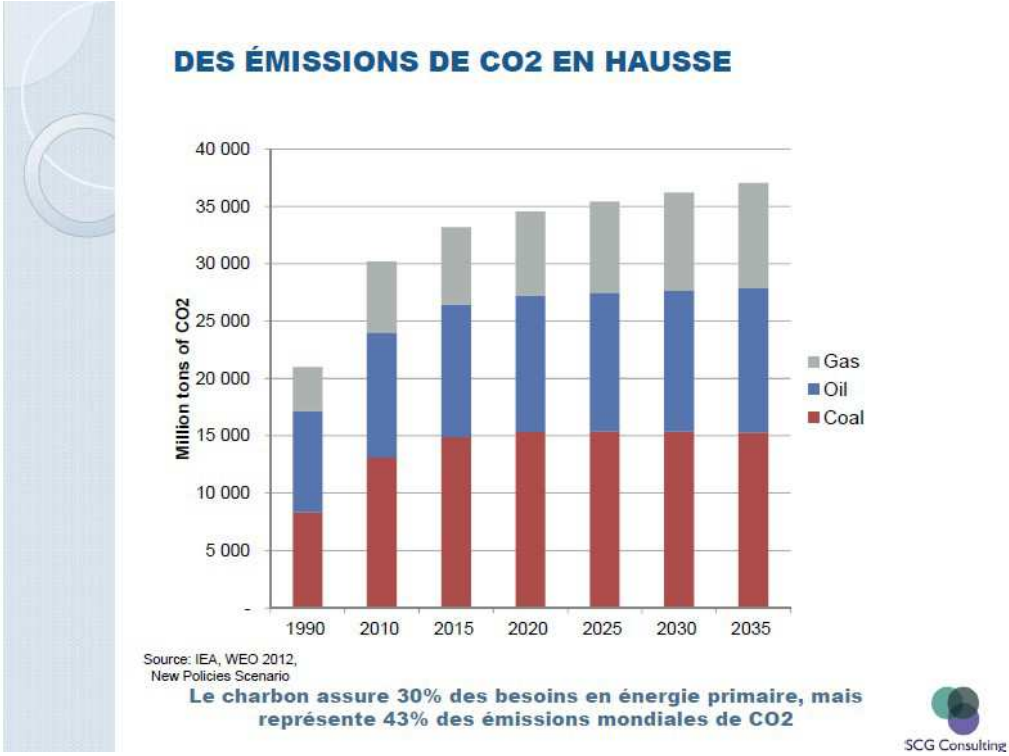
Ce n’est pas un phénomène durable parce que au-delà de l'effet compétitivité du prix du gaz bien sûr, il y a l’effet prix du CO_2. À l’heure actuelle, quand on regarde l'écroulement du prix du CO_2, il n’y a pas d'incitation à passer du charbon vers le gaz naturel. Donc on rouvre des centrales, et on opère des centrales charbon plus intensivement. Ce qu'il faudrait effectivement pour que le mouvement s’inverse, c'est un prix du CO_2 qui soit beaucoup plus élevé. On estime que le prix de switch est environ de 32 € par tonne (voir figure précédente). On en est à l’heure actuelle très loin avec un prix du CO_2 inférieur à 5 € par tonne.

Il faut quand même souligner que d'autres réglementations sur les centrales thermiques en général conduisent à leur fermeture. En particulier, la réglementation européenne sur les centrales à combustion supérieure à 25 MW qui limite les émissions de SO_X et de NO_X et qui prend effet en 2014 et 2015. À côté de ça, on voit quand même de nouvelles centrales bien équipées de désulfureur et à rendement élevé qui sont construites mais également le cas de la Pologne. Ces nouvelles centrales émettent quand même moins de CO_2 que les centrales actuelles, mais tout de même deux fois plus que les centrales à gaz.

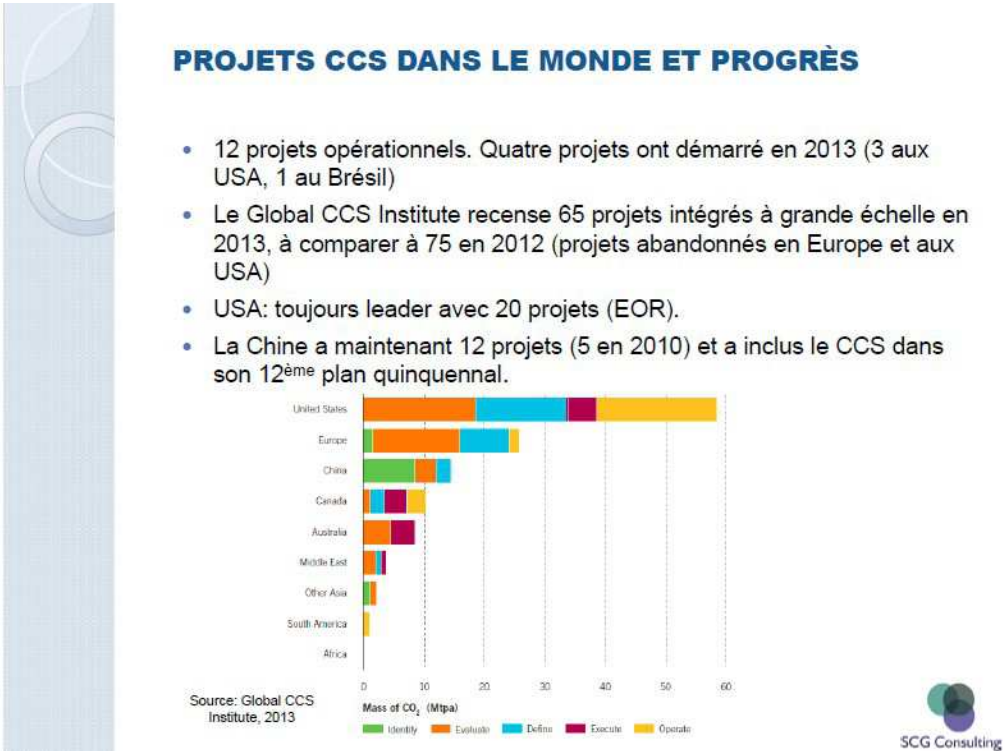


Le rôle du CCS dans le contrôle des émissions liées au maintien des usages du charbon

Les scénarios du World Energy Outlook et de l'AIE montrent un grand écart en 2035 entre le « business as usual » où la consommation de charbon continue d'augmenter et le scénario « nouvelles politiques énergétiques » avec un plafonnement de la consommation de charbon dès 2015-2020. Le contraste est encore plus important dans le scénario 450 ppm qui est le plus volontariste pour limiter le réchauffement climatique : dans un premier temps, la consommation mondiale de charbon y plafonne tout de suite pour baisser très rapidement. Donc on a une grande incertitude au niveau mondial et au niveau européen en relation avec le degré de détermination des États à contrôler les émissions de gaz à effet de serre. Mais il y a encore de la consommation de charbon à l'horizon 2035, même dans les scénarios de politiques climatiques les plus strictes. C'est là où le CSC commence à jouer un rôle à partir de 2025-2030.

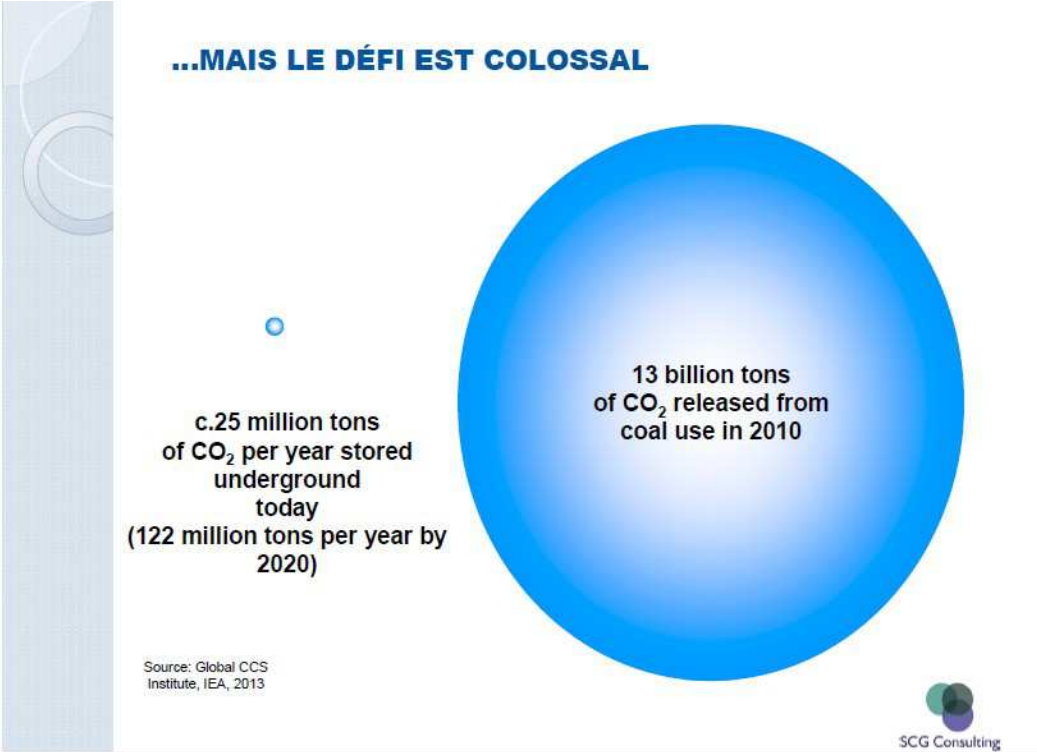


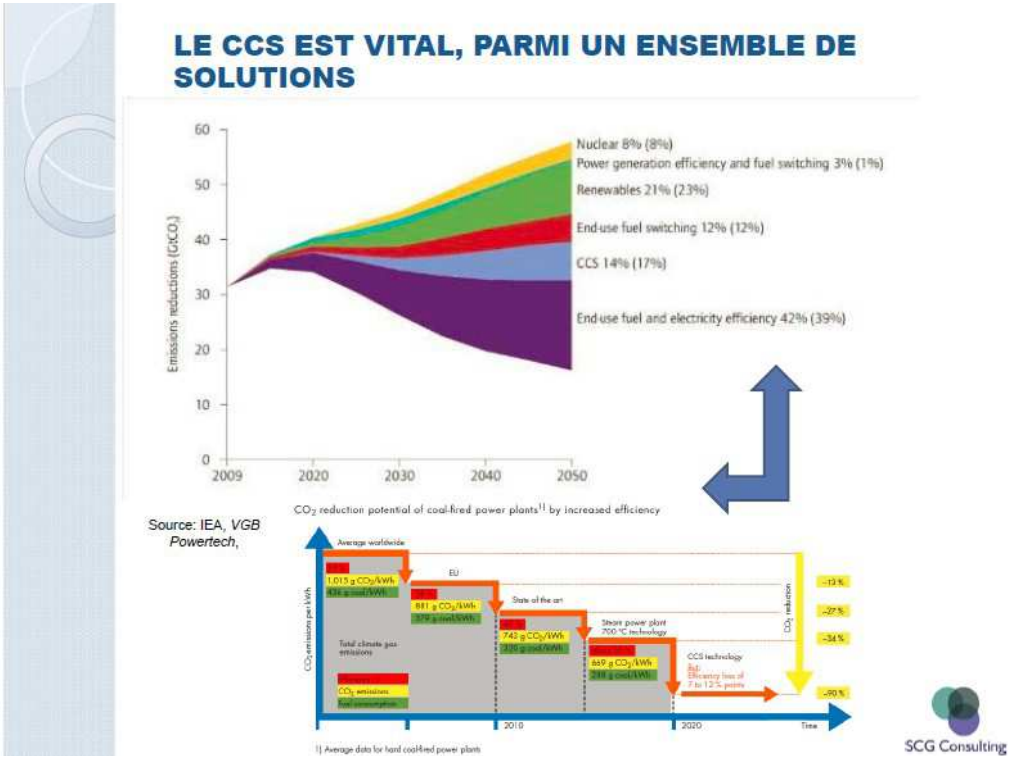
Quand on regarde tous les scénarios à l'horizon 2035, au niveau mondial, on voit que la part des combustibles fossiles étant encore importante, donc on a effectivement un grand intérêt à développer du CCS qui est la seule technologie prouvée à l'heure actuelle pour pouvoir stocker du CO_2 d'une centrale thermique ou bien d'une raffinerie ou d'autres activités industrielles.



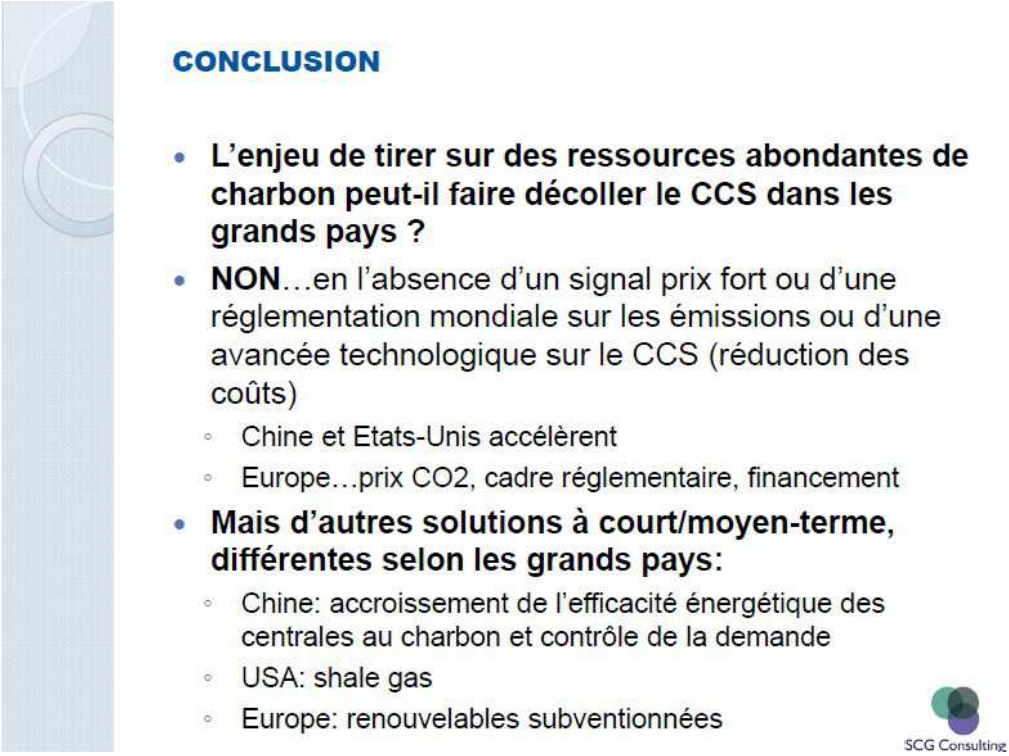
Le rôle du CCS peut devenir important car le défi de réduction des émissions de GES, issues du charbon (43 % des émissions mondiales alors qu'il n'occupe que 30 % dans le bilan primaire mondial) est colossal. Je vous renvoie à la figure suivante qui explique la place que le CSC pourrait occuper dans les réductions de CO_2 à l'horizon 2050.

Mais le démarrage est lent et l'étape actuelle de démonstration est très étirée. Au rythme actuel, on ne stockerait en 2020 que 122 millions de tonnes de CO_2 supplémentaires en rythme annuel (voir la figure d'après).


...MAIS LE DÉFI EST COLOSSAL
c.25 million tons of CO_2 per year stored underground today (122 million tons per year by 2020)
13 billion tons of CO_2 released from coal use in 2010
Source: Global CCS Institute, IEA, 2013
SCG Consulting



Toutefois le rôle du CCS doit être vu parmi un ensemble de solutions pour réduire les émissions de CO_2. Et il ne faut pas non plus oublier les gains d'efficacité énergétique. Aujourd'hui, les centrales en Europe, une centrale charbon en Europe, émet un peu plus de 800 g de CO_2 par kilowattheure. Si l'on construit une nouvelle centrale aujourd'hui, ce que font les Allemands et les Polonais, le rendement est de 45 % au lieu de 38 % et les émissions diminuent de 800 à 743 g de CO_2 par kilowattheure, soit un gain d'environ 14 %. Des recherches sont faites pour passer à des rendements énergétiques des centrales qui soient au-dessus de 50 % avec les cycle supercritiques, ce qui permettrait pour les centrales futures une diminution de 34 % par rapport à la moyenne mondiale des émissions de CO_2. La dernière étape c'est le CCS, donc 90 % de capture des émissions de CO_2, mais en sachant que le rendement rebaissera de 7 à 12 points par rapport aux 50 % de centrales très modernes.



Conclusion

Est-ce qu'avoir des ressources abondantes de charbon et trouver rationnel économiquement de les utiliser et les consommer peut faire décoller le CCS ? Je ne le pense pas, en l'absence d'un signal-prix fort sur le CO_2, on ne va pas voir un développement très fort du CCS. C'est pour cette raison qu'en Europe, avec la chute du prix du CO_2 malheureusement, on a vu les dix projets de démonstration être abandonnés. Il faut aussi que le prix des combustibles fossiles s'élève. Or, l'avènement des *shale gas* et leur effet sur les prix du gaz et du charbon aux États-Unis a eu raison aussi de nombre de projets sur des centrales électriques. Il faudrait une réglementation européenne et mondiale stricte sur les émissions de CO_2 qui conduise à un prix crédible du carbone. Il nous faut des projets de démonstration pour concrétiser des avancées technologiques qui conduisent à des réductions des coûts. Mais, pour cela, il faudrait un prix du carbone élevé.

C'est effectivement que deux pays sont en train d'accélérer : les États-Unis et la Chine. Dans les deux cas, ce sont effectivement des projets de captage et de stockage du CCS mais c'est surtout d'utilisation du CCS, que ce soit aux États-Unis ou en Chine c'est de la récupération assistée de pétrole et de gaz naturel ou ce sont du CCS sur du traitement de gaz, des engrais de la carbochimie en Chine. Donc ce qui nous manque en Europe, on n'a pas beaucoup d'utilisation du CO_2. En Europe, on l'a vu, on a besoin effectivement d'un prix du CO_2 plus important et surtout d'un financement plus important. On estime quand même que le coût de l'électricité pourrait être doublé par un projet, avec un projet CCS et les coûts des démonstrateurs, ils sont encore très importants aujourd'hui. Une compagnie privée n'a pas d'incitation à investir dans cette technologie avec un prix du carbone à 5 US$ la tonne, donc il faut des financements privés.

Session 3 : « Le nucléaire controversé »

Présentation de la session 3 : Le nucléaire controversé, par Venance Journé, p. 178.

« Le risque d'accident nucléaire majeur : calcul et perception des probabilités », par François Lévêque, p. 184.

« Peut-on maîtriser les coûts privés et sociaux du nucléaire ? », par Dominique Finon, p. 193.

« Deux facteurs clés pour l'avenir économique du nucléaire : compétitivité de la filière et régulation des marchés de l'électricité », par Laurent Joudon, p. 207.

« L'économie des différentes options du nucléaire de long terme », par Thierry Duquesnoy, p. 221.

Présentation de la session 3 : Le nucléaire controversé

Par Venance Journé.

Cette session a été consacrée aux controverses sur l'énergie nucléaire qui sont de plusieurs ordres : le risque, le coût, la dépendance technologique sur le long terme et le rapport avantages/inconvénients. Elle s'est déroulée en quatre interventions suivies d'une discussion avec la salle et d'une table ronde sur les conflits autour de la technologie nucléaire.

La première intervention, de François Lévêque (Mines ParisTech), a été consacrée au calcul des probabilités d'accident nucléaires et à la perception de ces derniers par le public. Il note deux controverses portant : 1) sur l'écart important entre les probabilités d'accidents calculées à partir des observations historiques et celles calculées par les experts à l'aide d'études probabilistes de risque, et 2) sur la différence entre ces calculs et la perception des accidents par les sociétés. Pour réduire ces écarts, François Lévêque propose, d'une part, d'inclure les éléments de connaissance sur la sûreté nucléaire acquis au long des dizaines d'années d'expérience de fonctionnement des réacteurs et, d'autre part, de prendre en compte, grâce aux travaux de psychologie expérimentale, les biais cognitifs dans la perception des risques. Tout comme le cerveau est soumis à des illusions d'optique, il serait aussi soumis à des illusions dans la perception des probabilités. Par son caractère d'évènement rare, d'impact ambigu et de caractère effroyable, le risque nucléaire donne lieu à une surévaluation des probabilités d'accident et cela conduit à un surinvestissement en dépenses de sécurité. Puis François Lévêque présente une étude probabiliste bayésienne dans laquelle quatre modèles ont été utilisés pour évaluer l'influence de l'accident de Fukushima sur l'évaluation des probabilités d'accidents. Pour les modèles considérant les accidents comme indépendants, Fukushima change peu la donne (augmentation de quelques pourcents). Dans le cas inverse (modèle de Possion avec pondération exponentielle), l'effet de Fukushima est très important et la probabilité d'accidents atteint le niveau qu'elle avait dans les années 1970. François Lévêque interprète ce résultat par la carence de l'Autorité de sûreté nucléaire au Japon.

Dominique Finon (Cired) a développé deux points principaux, Son premier point est le constat que la phase de hausse de coûts du nucléaire est en cours d’achèvement. Il y a eu un apprentissage coûteux de la technologie nucléaire civile avec pour effet une hausse permanente des coûts plutôt que leur baisse traditionnelle au fur et à mesure de l’apprentissage et des réalisations. C’est dû à la complexification continue de la technologie des réacteurs au fur et à

mesure du rehaussement des normes de sûreté après chaque accident. Ceci dit, la tendance à la complexification a atteint une asymptote, quelles que soient les réponses aux accidents qui pourraient survenir dans le futur. L'internalisation des coûts externes et des risques a atteint un sommet. Même après les mesures post-Fukushima qui porteront sur les nouveaux réacteurs à construire après les têtes de série actuelles d'EPR, de l'AP1000 de Westinghouse, de l'ATMEA de Mitsubishi-Areva, ou autres, les coûts des centrales nucléaires devraient baisser dès la 3e réalisation et produire de l'électricité compétitive par rapport aux centrales fossiles pénalisées par le prix du CO_2 et aux ENR matures à apport intermittent qui devraient payer les coûts d'ajustement et de réserves qu'ils entraînent pour le système (éolien terrestre notamment). On ajoute l'idée que la maîtrise des coûts est très sensible au coût du capital : en régime libéralisé de l'industrie électrique dans les pays de l'OCDE, les investisseurs ont des taux de rendement de 3 % supérieurs à celui du monopole de service public parce que le risque ne porte que sur le producteur, contrairement à l'autre régime où il était intégralement reporté sur les consommateurs. Revenir à ce régime antérieur ou organiser des contrats de long terme qui permettent le partage de risques pour le nouveau nucléaire, l'éolien offshore ou le CCS (comme on le fait au Royaume-Uni actuellement) est aussi une façon d'organiser l'économicité des technologies bas carbone et du nouveau nucléaire en particulier.

Le deuxième point concerne la gouvernance de la sûreté nucléaire qui est à la base de l'économicité du nucléaire. Un accident majeur érode à chaque fois un peu plus la confiance des opinions publiques dans les pays démocratiques. Les sources de l'accident de Tchernobyl et celles de l'accident de Fukushima relèvent d'abord des déficiences de gouvernance de la sûreté nucléaire dans ces pays. Si l'on doit « penser l'impensable », il faudrait déjà s'attaquer à ce qui est pensable et à la façon dont le contrôle de la sûreté nucléaire est pensé et mis en œuvre dans chaque pays. Il y a là un énorme travail à faire dans le monde, et notamment dans la région Asie vers laquelle le centre de gravité du nucléaire est en train de basculer et où les pays ont une approche par trop pragmatique et laxiste.

Il faudrait arriver à garantir au plan international la sûreté maximale pour éviter tout nouvel accident afin de préserver l'acceptabilité de la technologie. Pour obtenir des infléchissements marqués en matière de standards de conception et d'exploitation et dans les pratiques institutionnelles de contrôle de la sûreté dans tous les pays à option nucléaire, l'idéal serait de parvenir à la mise en place d'une gouvernance internationale contraignante et d'examiner les incitations et les conditions pour y parvenir. Les incitations ne semblent pas assez fortes sur les États pour qu'ils délèguent une partie de leur souveraineté dans ce domaine. On est condamné à se contenter d'une gouvernance faible qui combine le rôle actuel de facilitateur de l'AIEA et la pression par les pairs pour les exploitants, les vendeurs et les autorités de sûreté, en observant que, pour chacun, les incitations à la

rigueur sont en train d’être renforcées. C’est sans doute là une inconnue majeure pour le futur du nucléaire dans le monde.

Laurent Joudon (EDF) a expliqué comment la combinaison de deux facteurs clés que sont la compétitivité par rapport aux autres filières énergétiques et la régulation des marchés doivent être pris en compte dans l'évaluation de l'avenir économique du nucléaire.

Prenant acte du fait que le partage d'une réelle culture de sûreté par toutes les parties prenantes est un préalable indispensable à la poursuite du nucléaire, Laurent Joudon a posé la question de la légitimité de la filière, étant donné la dérive des coûts (multiplication par deux voire plus) pour la mise en œuvre de chaque nouvelle génération de réacteurs. Le scénario médian de l'Agence internationale de l'énergie prévoyant pour 2035 une part constante du nucléaire à 13 % : cela nécessitera la construction de nouvelles centrales, 200 GW supplémentaires dont 75 % en Asie ainsi que 100 GW pour le remplacement des centrales en fin de vie dans l'OCDE. La question primordiale ici est la maîtrise des coûts qui se joue actuellement en Asie, puis se jouera dans une dizaine d'années dans les pays de l'OCDE.

Les constructions des nouveaux réacteurs de génération 3 pâtissent de la période de dés-apprentissage qui s'est étalée sur les vingt dernières années : en conséquence, un enjeu majeur pour faire baisser les coûts est le retour d'expérience à partir des premiers numéros de série construits. Pour ces réacteurs de génération 3, les coûts anticipés sont de 90 à 100 €/MWh actuellement, mais l'objectif est d'atteindre 70 €/MWh, valeur qui serait comparable à celle des énergies renouvelables dans le futur. Laurent Joudon a aussi mentionné qu'il était important que les coûts de référence fassent maintenant l'objet d'une évaluation partagée et qu'ils ne soient plus uniquement évalués par l'administration, comme c'était le cas jusqu'à présent.

Enfin, pour éviter les risques de divergences sur, par exemple, l'horizon de temps considéré ou la prise en compte des externalités, entre ce qui est souhaitable pour la collectivité et ce qui sera décidé par les investisseurs essentiellement privés, comme c'est le cas actuellement dans les marchés libéralisés en Europe, Laurent Joudon a insisté sur la nécessité de mettre en place des règles bien établies et qui restent stables dans le temps (prix de la tonne de CO_2, enchères pour contrats de long terme à prix garantis, réglementation des prix) pour une organisation saine de la concurrence public-privé.

Thierry Duquesnoy (CEA) est intervenu sur l’économie des différentes options du nucléaire de long terme, des réacteurs de génération 2 à ceux de génération 4.

Gen. 2 : étant donné les constantes de temps des différentes phases (retour d'expérience, construction, exploitation), l'évolution du parc ne peut s'envisager qu'à l’échelle d'un siècle. Différents éléments dans la gestion de ce parc (standardisation, déploiement par paliers qui ont généré des économies d'échelle) ont permis une mise en place efficace de la filière dans certains pays dont le France. Les mesures actuelles

visant au maintien à niveau du parc et les mesures post-Fukushima vont faire passer les coûts de production de 50 à 55 €/MWh, mais les coûts de gestion des déchets à vie longue et du démantèlement sont encore incertains. Une étude OCDE/AEN datant de 2012 calcule des coûts de prolongation des réacteurs à 1 milliard d'euros par GW.

Gen. 3 : les scénarios projettent une augmentation de la demande en France à 2050 variant de -30 % à +80 %. Le mix énergétique retenu pour satisfaire à cette demande dépendra des orientations politiques en matière énergétique (engagements en matière de réduction des émissions, etc.) et de la performance économique. En ce qui concerne l'EPR, le coût d'investissement par kW est beaucoup plus important, mais la disponibilité sera aussi accrue par rapport à celle des réacteurs actuels. Les coûts élevés des têtes de série montrent l'importance de la disponibilité de l'infrastructure industrielle en matière de coûts de construction.

Gen. 4 : la principale inconnue est la ressource en uranium. Actuellement, à production constante (pour une consommation annuelle de 65 000 tonnes), la réserve (7 millions de tonnes) est assurée à prix modéré pour un siècle, à laquelle s'ajoutent 10 millions de tonnes pronostiquées, et 4 millions de tonnes non conventionnelles provenant de l'exploitation des phosphates. Si le nucléaire double à l'horizon 2050 (ce qui est envisageable d'après un scénario de l'IIASA), la disponibilité des ressources ne dépassera pas celle de l'exploitation du parc : l'uranium conventionnel sera engagé par les réacteurs en place d'ici à 2050-2070 et consommé à l'horizon 2070-2090, ce qui entraînera une forte tension sur les prix de l'uranium à l'horizon 2070. La solution préconisée est le recours aux réacteurs à neutrons rapides dans la seconde moitié du siècle : il faudra donc organiser une transition entre le cycle du combustible actuel à l'uranium enrichi et celui fonctionnant à l'uranium appauvri et le plutonium. Cela devrait correspondre à une augmentation supplémentaire de la part investissement, mais une moindre sensibilité aux matières premières.

Une table ronde intitulée « Les conflits autour de la technologie nucléaire » a ensuite réuni quatre intervenants autour des risques propres au nucléaire.

Pour François Levêque (Mines ParisTech), le risque très spécifique pour les opérateurs nucléaires est que son acceptabilité sociale est dépendante de ce qui peut se produire à des milliers de kilomètres, en Russie, en Chine ou ailleurs, indépendamment de la situation nationale et de l'état de la sûreté dans le pays. Au-delà de la question du pour ou contre le nucléaire, celle qui se pose vraiment est la qualité de la régulation. En ce qui concerne les coûts, il est difficile de prévoir ce que sera la situation dans une dizaine d'années. Les deux questions actuelles en France, qui sont découplées, concernent le prolongement des centrales, qui est actuellement justifié économiquement, et la question très différente de savoir par quoi les centrales actuelles seront remplacées dans quinze ans, par du nucléaire ou d'autres énergies.

Yves Marignac (WISE et *Global Chance*) a introduit son intervention par un questionnement sur l'attitude majoritaire des scientifiques a priori moins ouverts aux énergies renouvelables – qui se développent avec une plus grande rapidité et une meilleure compétitivité que prévues – qu'au nucléaire pour lequel ils proposent un avenir déterministe, alors que cette filière est l'objet de risques bien spécifiques, les accidents majeurs et les déchets (qui ont une composante inter-générationnelle) et le lien du nucléaire civil avec les armes nucléaires. Yves Marignac conteste l'inéluctabilité du futur nucléaire : en effet, actuellement les constructions dans l'Asie vont seulement compenser les fermetures ailleurs dans le monde, sauf si des centrales sont prolongées. En ce qui concerne la question des coûts, le coût des réacteurs est croissant, par exemple, le coût de l'EPR est élevé même si incertain (65-109 €/MWh), et les coûts « post-Fukushima » seront sans doute bien plus élevés que le milliard d'euros par réacteur qui est indiqué actuellement par l'opérateur, mais qui reste pour le moment incalculable en l'attente des prescriptions requises. Ce coût croissant pose problème dans un contexte économique de plus en plus compétitif où des efforts sont faits en matière de maîtrise de la demande. Si l'on ne considère que les scénarios respectant le facteur 4 à 2050, la demande électrique sera de 0 à 30 % inférieure à ce qu'elle est actuellement, avec une division par deux de la consommation d'énergie. En dernier lieu a été abordée la question des effets d'éviction potentiels entre le nucléaire et les renouvelables alors que dans le scénario 400 ppm de l'AIE, qui prévoit le développement important du nucléaire et de la capture et séquestration du carbone, les contributions de la maîtrise de l'énergie et du nucléaire à la réduction des émissions des ENR sont respectivement de 25 %, 54 % et 6 %.

Pierre Charbonnier (Institut Marcel Mauss) a apporté un éclairage historique. Il a évoqué un effet de « discordance historique » de la question énergétique et du nucléaire en particulier, dû au fait que, d'une part, le nucléaire a été une décision de sortie de crise (guerre, choc pétrolier) prise il y a plusieurs dizaines d'années, et que, d'autre part, les problèmes induits (déchets, coûts, renouvellement du parc, démantèlement) doivent être gérés maintenant. C'est une rupture d'ordre politique qui ne peut faire l'objet d'une gestion essentiellement quantitative, en particulier par l'utilisation de modèles. Pierre Charbonnier a ensuite abordé la question du choix entre deux types d'énergie. Les premières sont qualifiées d'« invisibles » : le nucléaire et les énergies carbonées, généralement mises en opposition à cause de leurs niveaux différents d'émissions de gaz à effet de serre, mais qui ont en commun le fait d'être des énergies socialement invisibles dans le sens où leur emprise ne concerne que le sous-sol. Par ailleurs, l'emploi de main-d’œuvre généré est très faible quantitativement et très spécialisé. Les secondes, « visibles », sont les énergies renouvelables qui ont une emprise environnementale forte et tangible. Le choix actuel, qui est d'ordre politique, est crucial, parce qu'il signifie le passage des énergies invisibles aux énergies visibles, et c'est pour cela qu'il soulève tellement de controverses.

Sylvain David (CNRS-IN2P3) a traité de la question centrale des ressources en uranium. L'aspect de la disponibilité de la ressource se pose ici de façon très différente au cas des énergies fossiles à cause de la possibilité des réacteurs à neutrons rapides qui consomment 200 fois moins d'uranium que les réacteurs de génération 2 ou 3. Il s’ensuit qu'à partir d'un certain prix de la ressource les réacteurs à neutrons rapides deviendront plus compétitifs que les réacteurs de génération 2 ou 3, même s'ils nécessitent un investissement plus important au départ. Il y a donc de facto la fixation d'un prix maximum de l'extraction de l'uranium, en moyenne de l'ordre de 400 $ le kilogramme au-delà duquel les réacteurs à neutrons rapides deviendront compétitifs. Cependant, si ces derniers ne sont pas construits pour des raisons de sécurité ou d'investissement, il sera possible d'extraire l'uranium de l'eau de mer qui en contient des ressources immenses, à un prix de 1 000 à 1 500 $ le kilogramme. Un autre élément se rajoute à cette vision que l'on a des ressources : aux États-Unis, le plutonium est considéré comme un déchet, alors qu’en France, étant pessimiste en matière de disponibilité des ressources, on le considère comme une matière valorisable. Les réacteurs à neutrons rapides en nécessitent 20 tonnes de Pu pour démarrer, ce qui correspond à 1 200 tonnes pour la totalité du parc, alors que seulement 300 sont disponibles pour le moment.

François Lévêque : Le risque d'accident nucléaire majeur : calcul et perception des probabilités

François Lévêque est responsable à l'École des mines du cours d'économie industrielle et de l'option Droit et Économie de l'Entreprise. Co-responsable à l'Université de Californie à Berkeley du cours Comparative Antitrust Law. Cette intervention ne contient pas de commentaires de son auteur.

Le risque d'accident nucléaire : calcul et perception des probabilités

François Lévêque, Professeur d'économie à Mines ParisTech

Journée de dialogue sur la transition énergétique (Cired, 22 octobre 2013)

Fukushima Daiichi et les probabilités

- Les probabilités d'accident nucléaire calculées dans les études ne semblent pas coller avec les observations
  - Par exemple, un accident (INES >4) tous les 50.000 an.réacteur (calcul) contre une fréquence observée d'un accident tous les 1500 an.réacteur
- La perception des probabilités d'accident nucléaire semble écarter tout calcul et toute rationalité
  - Par exemple, « il y a plus de 100% de chances qu'un accident se produise d'ici 30 ans en Europe » !!!
- Comment expliquer (et réduire) ces écarts entre fréquence observée, probabilité calculée et accident perçu ?

Réponse

- En conjuguant les observations d'accident et les autres éléments de connaissance de la sûreté
  - Eviter à la fois l'empirisme aveugle (seules les observations d'accident comptent) et l'expertise scientifique bornée (seules les études probabilistes de sûreté valent)
- En continuant d'enrichir les analyses théoriques de la décision en incertitude par les observations sur les comportements
  - En particulier sur les biais cognitifs dans l'évaluation des probabilités

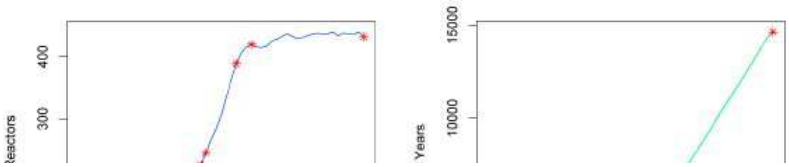
Plan et références

- I La combinaison des fréquences d'accident observée et calculée
- II La prise en compte des biais de perception des probabilités dans la théorie de la décision
- Lina Escobar Rangel and François Lévêque, How Fukushima-Daiichi core meltdown changed the probability of nuclear accidents? *Safety Science*, Forthcoming 2014
- François Lévêque, *Nucléaire On/Off, analyse économique d'un pari*, Editions Dunod, chapitres 5 et 6, novembre 2013

Rappel de définitions

- **Certitude** : une urne contenant uniquement des boules rouges. Je suis sûr de tirer une boule de cette couleur en plongeant ma main dans l'urne
- **Risque** : une urne contenant 30 rouges et 60 blanches. Je ne suis plus sûr de tirer une rouge p(r)=1/3, p(b)=2/3
  - L'ensemble des états du monde est connu et à chaque état correspond une probabilité connue
- **Incertitude** : une urne contient 30 rouges et 60 autres noires ou blanches p(r) =1/3, p(n) = ? p(b)= ?
  - Peut-être ramenée à un risque en introduisant une hypothèse sur les probabilités inconnues, par exemple p(n)=p(b)
- **Incomplétude** : une urne remplie de boules de couleurs, non spécifiées
  - Tous les états du monde ne sont pas connus
- Le calcul des probabilités s'applique aux situations de risque et d'incertitude (i.e., **un monde sans surprise**), mais non aux situations d'incomplétude

Les observations



Les modèles

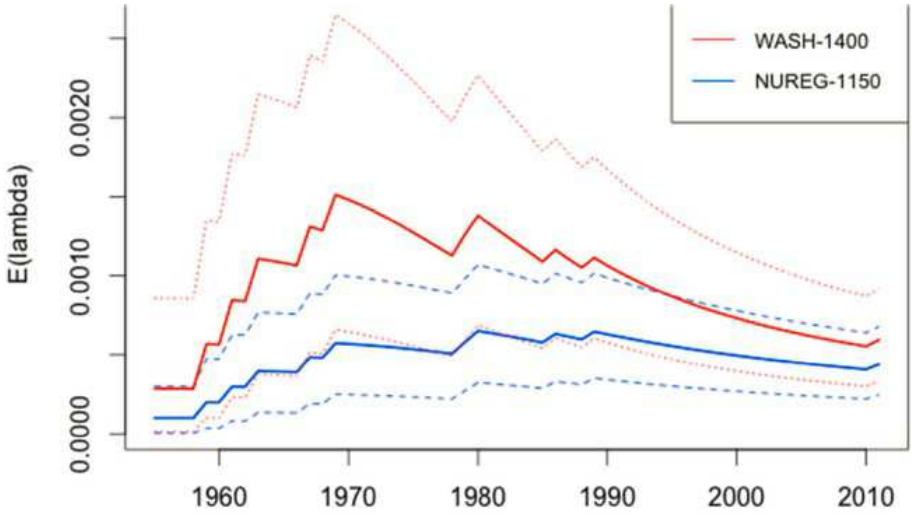
Dans quelle mesure l'accident de Fuskushima Daiichi nous conduit-il à réviser les calculs de probabilité de fusion de cœur ?

Model	$\hat{\lambda}_{2010}$	$\hat{\lambda}_{2011}$	Δ
MLE Poisson	6.175e-04	6.66e-04	0.0790
Bayesian Poisson-Gamma	4.069e-04	4.39e-04	0.0809
Poisson with time trend	9.691e-06	3.20e-05	2.303
PEWMA	4.420e-05	1.95e-03	43.216

Observation et calcul : la probabilité de l'événement d'après

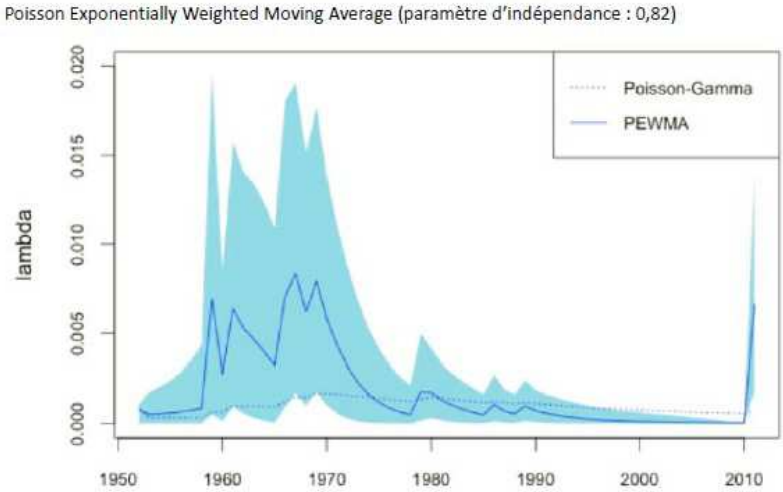
- Quelle est la chance de tirer une boule rouge dans une urne au n+1 ème tirage sachant que les n précédents tirages ont produit k boules rouges ?
- (k+1)/(n+2) selon Laplace (1825)
  - La formule revient à ajouter 2 tirages virtuels, dont l'un a donné une rouge et l'autre une non-rouge, aux n tirages ayant produits k rouges
- Généralisation : (k+st)/(n+s) où t est la probabilité attendue a priori (ex. 0,5 en cas d'événements équiprobables dans un choix binaire) et s le paramètre qui mesure la force de l'a priori (i.e., l'incertitude qui entoure l'a priori ou encore la dispersion autour de la moyenne)
  - Plus s est grand moins les observations modifient l'évaluation initiale, et inversement plus s est petit plus les observations l'emportent
- Le choix de s et t peut se baser sur des connaissances scientifiques (ex. on a mesuré le risque d'accident majeur grâce à de multiples études probabilistes) ou sur des croyances (ex. je crois fermement ou mollement que la probabilité d'accident est élevée ou faible)

Modèle bayésien Poisson Gamma (données d'EPS américaines)



(Source : Lévêque et Rangel, 2014)

Modèle PEWMA

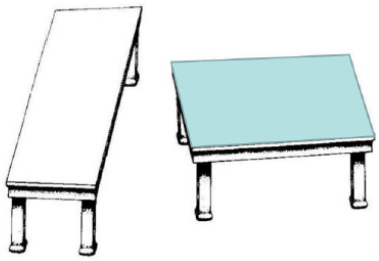


La décision rationnelle en incertitude : théorie et comportement

- Une fonction d'utilité décroissante (Bernouilli, 1738) pour expliquer l'aversion au risque
- Le paradoxe d'Allais (1955) peut être expliqué par des préférences non linéaires en matière de probabilité : surestimation des petites probabilités et sous-estimation des grandes probabilités
- Le paradoxe d'Ellsberg (1961) qui montre que les individus préfèrent le risque à l'incertain
- Bref, la théorie économique de la décision avance en complexifiant la fonction d'utilité pour tenir compte de certains comportements observés

La psychologie expérimentale : les biais de perception des probabilités

- L'individu ne maximise ou n'optimise plus, il décide en suivant des routines et en prenant des raccourcis (heuristiques)
- Observer la déformation des probabilités devient un moyen d'accès pour comprendre comment fonctionne notre cerveau
  - ex. la probabilité d'une perte de 0,0001 est perçue comme plus faible qu'une probabilité de 1/10.000 par négligence du dénominateur



Le risque perçu d'accident nucléaire majeur

- Événement rare, donc de probabilité perçue surestimée, d'où sur-assurance et demande de protection plus grande
- Evénement ambigu, donc biais à retenir la probabilité la plus haute et le niveau de dommage le plus élevé
- Evénement effroyable, donc négligence du dénominateur et focalisation sur l'accident lui-même qui laisse une forte empreinte
- D'où des choix entre investissements alternatifs distordus (ex. : plus de charbon ou d'hydraulique car moins d'accidents mortels que pour le nucléaire, alors que c'est l'inverse qui est vrai)
- D'où un risque de surinvestissement en sûreté lorsque les décideurs publics suivent le mouvement

Les conséquences de l'attentat du 11 septembre 2001

- Immédiates : les images effroyables de l'effondrement des tours jumelles a entraîné une sous-utilisation transitoire de l'avion et une sur-utilisation de la voiture
  - Avec plus de morts dans les accidents de voiture en surnombre que de passagers décédés dans les deux avions (Gigerenzer, 2010)
- Durables : inflation des mesures de sécurité dans les aéroports du monde entier d'un coût très élevé et d'une efficacité controversée

Conclusions

- Mêler observations et autres éléments de connaissance pour mieux approcher les probabilités d'accident
- Rapprocher théorie de la décision et biais de perception des probabilités
- Les probabilités perçues d'accident resteront cependant durablement écartées de celles calculées par les experts
- La décision publique doit-elle tenir compte des probabilités perçues ? Doit-elle les corriger ? Doit-elle se fonder uniquement sur les probabilités calculées ? Tenir compte des deux ? Comment ?
- Pour en savoir plus, voir François Lévêque, Nucléaire On/Off, Editions Dunod, 2013, en particulier les chapitres 5 et 6, ainsi que L. Escobar-Rangel and F. Lévêque, « How Fukushima Daiichi core meltdown changed the probability of nuclear accidents », *Safety Science*, Vol. 64, April 2014, 90-98

Dominique Finon : Peut-on maîtriser les coûts privés et sociaux du nucléaire ?

Dominique Finon est directeur de recherche au Cired et économiste.

Résumé

L'accident de Fukushima repose la question de la viabilité sociale et économique de la technologie nucléaire. Pour y répondre, il faut d'abord analyser le processus passé d'internalisation des coûts externes et des risques du nucléaire qui s'est concrétisé par une complexification permanente de la technologie et qui présente la particularité d'être tiré par les leçons des accidents majeurs. Il a contribué à désorganiser le processus d'apprentissage de la technologie pour finir par mettre en question sa compétitivité pour les investisseurs sur les marchés électriques. Instaurer des institutions indépendantes de sûreté est devenu une condition indispensable à la poursuite de son déploiement, au risque de ne pas faciliter la stabilisation de la technologie, condition de sa viabilité économique. On défend ici l'idée que la nouvelle séquence d'internalisation des externalités du nucléaire ouverte par Fukushima aura des effets limités sur les coûts, du fait des étapes antérieures de sévérisation de la sûreté. La complexification de la technologie atteint une asymptote : on est en train de sortir du défi d'apprendre par des accidents. En revanche, pour que l'acceptabilité se maintienne, il faut arriver à garantir la sûreté maximale en s'attaquant à l'autre racine du problème, celui de l'indépendance et des compétences des autorités de sûreté dans tous les pays, ce qui ne se décrète pas. C'est pourtant à ce prix que sera préservé l'acceptation du nucléaire, et au-delà son économicité dans les pays maintenant ou adhérant à l'option nucléaire.

Introduction

Je me suis donné pour tâche de donner une vision prospective de l'économie du nucléaire. Que pouvons-nous dire de l'évolution passée des coûts de la production électronucléaire après quarante ans de nucléaire civil. Peut-on en déduire quelle tendance d'évolution dans le futur ? La réponse se joue à deux niveaux d'observation. Le premier sur les coûts réels : les coûts des équipements n'ont cessé de croître, mais il y a beaucoup de déterminants qui sont derrière cette hausse continue et ils ne joueront plus du tout de la même façon dans le futur. Le second niveau est celui de la controverse sur les risques de sûreté dans le nucléaire et de la façon dont les risques sont contrôlés selon les pays.

En premier lieu, il y a eu un apprentissage coûteux de la technologie nucléaire civile tiré par les leçons des accidents et d'incidents graves, mais la complexification de la technologie des réacteurs engendrée par l'apprentissage continu de cette technologie touche à une asymptote actuellement, quels que soient les changements apportés après l'accident récent, et la maîtrise des coûts est renvoyée à l'organisation du contrôle de la sûreté de l'industrie dans le futur. Dépendra-t-elle également du maintien en l'état du régime de marché des industries électriques dans les pays de l'OCDE ? Y aura-t-il des dispositifs particuliers pour permettre le partage des risques d'investissement, etc. ? En second lieu, les sources de l'accident de Tchernobyl ou de celui de Fukushima résident d'abord dans la gouvernance de la sûreté nucléaire. Pour permettre le maintien de l'économicité du nucléaire à travers celui de son acceptation sociale dans les démocraties, les approches de la sûreté doivent viser la rigueur absolue et doivent être en mesure d'évoluer au fur et à mesure de l'amélioration de la prise en compte des risques.

Les modes d'internalisation des coûts externes de la technologie nucléaire

Tout d'abord, il faut rappeler la spécificité de la technologie nucléaire par rapport à des technologies plus classiques. C'est une industrie extrêmement complexe, qui mêle plusieurs savoirs et savoir-faire. C'est une technologie géante, avec d'énormes composants, avec des durées d'apprentissage très longues et des mises au point, avec également des durées d'installation et des cycles de vie très étirés. C'est la situation extrême par rapport au cycle de vie très court des technologies du numérique. Ces durées étirées signifient qu'il y a énormément de paramètres qui joueront sur les nombreux risques économiques. Le nucléaire n'est pas vraiment compatible avec le capitalisme de marché, encore moins avec le capitalisme financier.

Deuxième spécificité, le caractère très particulier des risques de la technologie : les effets de faibles doses, la nécessité de gestion des déchets de très long terme avec un enjeu intergénérationnel qui ne trouvera jamais de réponse définitive. Il faut savoir faire avec ces derniers car l'irréversibilité est déjà créée, même si un pays sort de l'option nucléaire. Il y a des équipements en place, des déchets à gérer, et il faut se préoccuper de ce problème de façon très stricte. Il y a aussi et surtout le risque d'accident majeur, avec relâchement de la radioactivité, condamnation de territoires. Troisième spécificité, il s'ensuit un symbolisme fort, le nucléaire perçu à la fois comme puissance de vie et puissance de mort, l'effet latent sur la santé, l'effet possible sur le génome, etc., qui ont suscité les premières oppositions aux projets de centrales à la fin des années 1960 et dans les années 1970 avec le changement de valeurs sociales, la critique des sociétés industrielles et de la technocratisation des choix politiques.

La complexification majeure de la technologie, effet de l’apprentissage par des accidents

Apprentissage complexe donc. On a lancé commercialement les réacteurs nucléaires sans vraiment tout maîtriser dans la technologie et, au fur et à mesure des incidents, puis des accidents majeurs, on a édicté des règlements, on a complexifié la technologie. Ce qui est très spécifique dans cet apprentissage est qu’il se fait surtout par les accidents, ce qui a été également le cas dans l'aviation ou la sécurité des installations dans les autres industries. L'accident comme dans toute industrie apporte son lot d’informations sur les aspects de la conception et sur l'amélioration des équipements en place. Par exemple, après qu'un ouvrier a déclenché un incendie banal avec une simple bougie dans la centrale nucléaire de Browns Ferry en 1974 (cet ouvrier cherchait s'il n'y avait pas de fuites de gaz à droite, à gauche, dans les gaines, le feu a brûlé les câbles du système d'arrêt d'urgence), on a séparé les dispositifs de prévention d'incendie et d’arrêt d’urgence.

Après Three Mile Island, on a révisé les systèmes de contrôle et d’instrumentation. On a amélioré la formation des opérateurs et, institutionnellement, on a mis en place, au niveau des entreprises électriques américaines qui géraient des réacteur, un régime d’autocontrôle (INPO) par des revues de pairs extrêmement exigeantes.

Après Tchernobyl, dont la cause relevait aussi d’erreurs humaines très graves et des défauts de la culture de sûreté, les dispositifs limitent ces risques dans l'ensemble des pays, pour tous ces types de réacteurs. En outre, on a élargi au plan mondial l’autorégulation à l’américaine, avec partage d’expériences entre exploitants de chaque pays, ce qui a eu un certain effet d’amélioration de culture de sûreté dans les pays laxistes.

Avec Fukushima, il y a prise de conscience du rôle des phénomènes naturels, qui entraînent des conséquences graves par la perte d'alimentation électrique (les auxiliaires n'étaient pas protégées) alors que les installations étaient mal protégées contre les tsunamis. Les conséquences concernent l'amélioration des réacteurs existants (protection de l’alimentation électrique, risque sismique, etc.) et, au niveau des nouveaux réacteurs, le choix de technologies plus sûres de type Gen 3 (EPR, AP1000, ABWR, etc.) et l’attention renforcée aux risques naturels sur les sites choisis.

L’économie politique de la sûreté nucléaire

Les réflexions post-Fukushima sur le contrôle du risque d’accident nucléaire éclairent deux volets de l’économie de la sûreté nucléaire. Fukushima montre que la combinaison de risques naturels avec un risque technologique majeur peut aboutir à des catastrophes. Faudrait-il pour autant « penser l’impensable » selon la formule de Jacques Repussard directeur de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) ? Ceci voudrait dire qu’il faudrait anticiper tout jusqu’à la chute même d’un météorite de probabilité 10-9. Mais envisager la chute d’un météorite ou envisager un tremblement de terre et un

tsunami là où un tel évènement est plutôt probable comme c’était le cas dans la région de Fukushima, ce n’est pas la même chose. D'un côté, il faudrait enterrer tous les réacteurs nucléaires à un coût prohibitif pour faire face à un risque de probabilité d'un milliardième. De l’autre, on n’aurait eu à dépenser que 20 millions de dollars il y a quelques années pour remonter les digues sur le site de Fukushima Daiichi si l’Autorité de sûreté avait été rigoureuse. La preuve en est qu’une autre compagnie électrique plus prudente a rehaussé d’elle-même les digues pour une centrale proche qui n’a pas été affectée par le tsunami lorsque les risques de tremblement de terre ont été ré-évalués dans la région. Donc, d’un côté un arbitrage peut s'opérer entre les bénéfices à attendre d’une mesure et son coût, ce qui suggère qu’il peut y avoir des limites dans l'internalisation des coûts. De l’autre côté, la gouvernance de la sûreté nucléaire doit être à la hauteur de l’enjeu en termes de compétences, d’indépendance et de transparence, comme on le voit plus loin.

Comment doit-on, en bonne économie, améliorer la sûreté des technologies de réacteurs nucléaires ? Quand c’est un réacteur existant ou un design bien admis, on met en relation le coût de ce dispositif supplémentaire avec les bénéfices probabilisés, c'est-à-dire la réduction d’un risque d'incident et, au-delà, de l'enchaînement d’événements qui aboutit à un accident avec relâchement de radioactivité. Mais c’est tout de même une méthode un peu technocratique utilisée aux États-Unis. Le bénéfice est tout de même extrêmement difficile à évaluer. On lui préfère l’approche déterministe dans un certain nombre de pays de « défense en profondeur ».

Au fond, la démarche des régulateurs a été de plus en plus de rechercher la sécurité à tout prix dans la limite des connaissances technologiques : c'est-à-dire qu’après chaque accident on améliore les connaissances, on améliore la conception du réacteur par l’adjonction de protection et de nouveaux circuits de sûreté, etc., avec l’interrogation permanente : « How safe is safe enough ? » Fukushima a rappelé qu'il faut repasser pour la conception des réacteurs à l’approche déterministe, car avec l'approche probabiliste, on en vient à évacuer ce qui semble peu probable. Mais ces accidents peuvent arriver toute de même, comme le montre Fukushima. Et donc la philosophie du régulateur américain est en train de changer. On est en train de revenir aux États-Unis sur l’approche probabiliste.

Des différences d’effets d’internalisation selon la forme des relations État-industrie

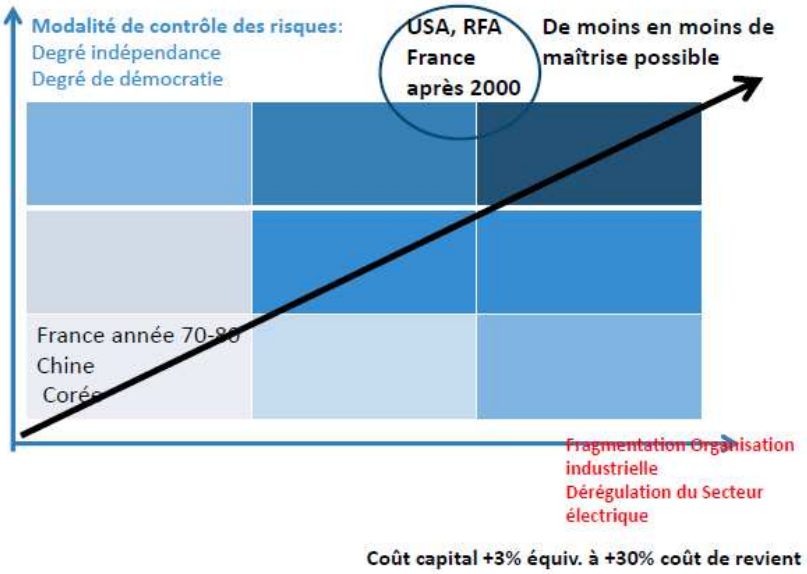
Le processus d’internalisation des coûts externes du nucléaire par complexification de la technologie des réacteurs a eu des impacts très différents sur les coûts d’investissement selon les pays. Les différences s’expliquent par la façon dont se sont manifestées les exigences des autorités de sûreté locales et par la relation entre constructeurs, architectes-ingénieurs et utilisateurs pour faire face aux changements de règlementation.

La progression de l’autonomie des autorités de sûreté vers l’indépendance s’est faite sous l’effet de l’évolution de l’environnement

politique du nucléaire. Elle s’est faite d’autant plus rapidement que les structures décisionnelles étaient perméables, notamment dans les États fédéraux et décentralisés, contrairement aux pays centralisés et technocratiques. Dans les premiers pays, les institutions de contrôle de la sûreté deviennent assez vite indépendantes en étant séparées des instances de promotion de la technologie (en Allemagne dès 1959, aux États-Unis en 1974, au Royaume-Uni en 1975, en Suède en 1984), tandis qu’en France l’autonomisation n’interviendra que de façon progressive à partir de l’accident de Tchernobyl pour n’aboutir complètement qu’en 2006. Le Japon en est resté à une autorité de sûreté placée sous l’autorité du ministère de l’économie et de l’industrie (le METI) jusqu’à Fukushima. Pour les nouveaux venus qui développent le nucléaire à grande échelle à partir du milieu des années 1980 (d’abord la Corée du Sud et Taïwan, puis la Chine et l’Inde), les autorités de sûreté sont restées dépendantes des instances de promotion du nucléaire.

Le type d’organisation industrielle a ensuite conditionné la façon dont les constructeurs et les entreprises électriques ont réussi à faire face aux difficultés. Cette influence de l’organisation industrielle sur sa capacité technologique peut se comprendre en opposant deux modèles d’organisation, le modèle français avec une forte concentration industrielle à dominante publique, et le modèle américain fragmenté, décentralisé et orienté par le marché. Dans le premier modèle, l’organisation est très intégrée avec une seule entreprise électrique nationale qui, de plus, est son propre architecte-ingénieur, un seul constructeur de réacteur et une institution de contrôle de la sûreté de style pragmatique et non procédural. Dans un tel cadre, il a été possible de se limiter à une seule technologie, le PWR Westinghouse, et de se concentrer sur deux conceptions successives et ce sur des séries longues de 8 à 18 réacteurs le long de quatre contrats passés entre EDF et le constructeur Framatome. Dans le cas américain, l’industrie électrique est balkanisée par État fédéré avec, dans chacun, plusieurs entreprises électriques privées de taille moyenne sans compétences d’ingénierie et de contrôle qualité, à une ou deux exceptions près (il y eut jusqu’à 45 exploitants), et il y a à l’époque quatre constructeurs qui proposaient chacun leurs techniques (3 PWR et 1 BWR). Chaque projet est traité comme un réacteur différent par l’autorité de sûreté, d’où l’impossibilité d’une standardisation minimale. Le changement de réglementation sur les réacteurs en construction est venu compliquer considérablement la construction des réacteurs, ce qui s’est traduit par des hausses de coût importantes et l’arrêt des commandes au début des années 1980.

Possibilité de maîtrise des coûts déterminée par organisation industrielle et structure institutionnelle du contrôle des risques

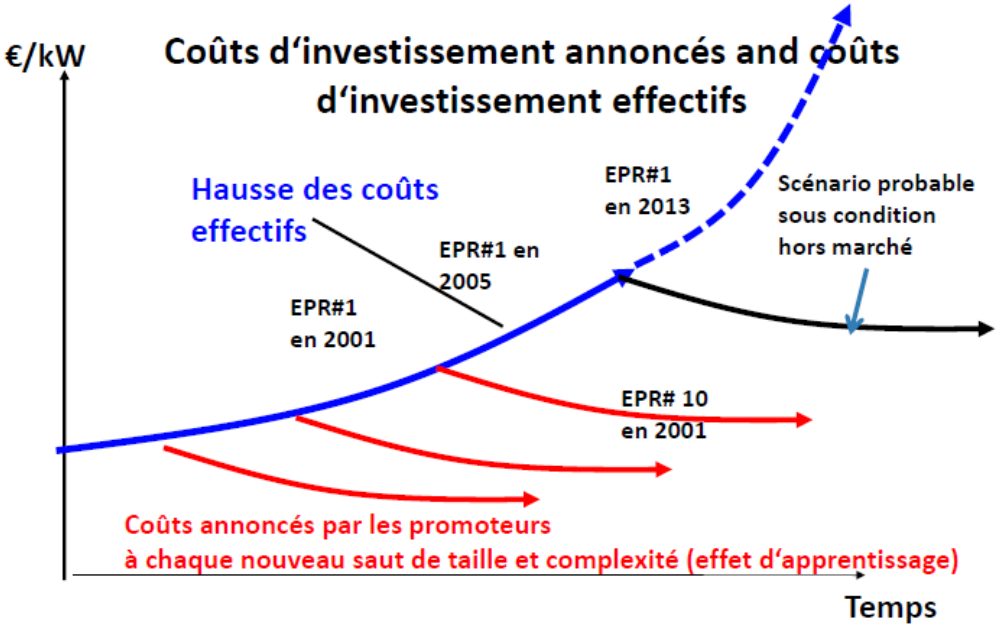


Sur ce graphique, on a placé le degré de maîtrise des coûts du nucléaire dans plusieurs pays selon une typologie qui croise en abscisse le paramètre « mode d'organisation industrielle » et en ordonnée le paramètre « régulation de la sûreté ». Le contrôle des risques dans son environnement institutionnel dépend du degré d'indépendance de l'autorité de régulation et du degré de démocratie. On voit ainsi que la régulation de la sûreté est un déterminant majeur des coûts à travers sa sévérité et la pression de la société pour que la sévérité soit le plus extrême possible. Du côté de l'organisation industrielle et la régulation du secteur électrique, il faut souligner aussi l'impact de la libéralisation des industries électriques des pays de l'OCDE, qui se traduit par une augmentation sérieuse du coût d'investissement parce que, dans un secteur électrique libéralisé, vous êtes confronté à des risques supplémentaires (en particulier les risques de marché : risque-prix et risque volume). Il s'ensuit que le coût du capital (taux d'actualisation) est de 3 % supérieur à celui en cours en régime de monopole, ce qui augmente le coût de revient d'environ 30 %.

L'évolution des coûts après Fukushima

Deux thèses s'opposent : celle des économistes opposés au nucléaire et qui considèrent que les coûts futurs vont encore monter car les coûts ont sans cesse monté contrairement aux effets d'apprentissage habituels et celle des promoteurs du nucléaire qui considèrent qu'à chaque nouveau saut de taille et de complexité il y a des effets d'apprentissage et les coûts rebaissent. Je me situe, avec les

précautions d'usage, plutôt sur cette ligne-là pour les filières Gen 3 (EPR d'AREVA, AP1000 de Westinghouse, ABWR de GE), même après Fukushima. On voit sur le graphique la hausse des coûts effectifs de l'EPR depuis 2001-2005 au moment des premières commandes jusqu'à actuellement. On devrait pouvoir se situer ensuite sur la courbe noire sous la seule condition de mettre le nucléaire hors marché, de retrouver un système monopoliste ou d'encadrer les investissements du nucléaire par des contrats de long terme à prix garanti qui sont en mesure de limiter les risques radicalement.



La raison en est qu'on ne va pas complexifier les nouveaux réacteurs à cause de Fukushima ou de façon limitée. On va surtout faire de la protection contre les risques naturels et protéger les équipements de production de secours. On a atteint une asymptote dans la complexité de la technologie et dans la recherche de très hauts niveaux de sûreté. On est en train de sortir du défi d'apprendre sur la sûreté par des accidents. Il y a toutefois l'option d'installer des réacteurs à sûreté intrinsèque dont le concept de sûreté passive permet de simplifier la redondance des circuits de sûreté, ce qui pourrait permettre de faire baisser les coûts d'investissement. Pour l'instant, ce choix est testé en Chine et aux États-Unis avec les réacteurs AP1000 de Westinghouse-Toshiba. Mais ils en sont au même stade de développement que l'EPR et n'ont pas encore fait leurs preuves en termes de coût inférieur à ceux des EPR futurs. Mon idée centrale reste : du fait des hauts niveaux de sûreté déjà atteints, les améliorations supplémentaires auront de moins en moins d'impacts sur les coûts d'investissement. Les clés futures de la maîtrise des coûts sont devenues l'organisation

de l’apprentissage et les possibilités de planification industrielle, comme actuellement en Chine et en Corée qui se situent dans l’ancien modèle industriel français. Elles leur permettront de faire baisser un peu plus les coûts des filières Gen. 3 qu’en France, au Royaume-Uni ou aux États-Unis.

Quid de la compétitivité du nouveau nucléaire après internalisation ?

Malgré les hausses de coût conséquentes par rapport à la précédente génération de réacteurs mais en considérant atteinte l’asymptote de la complexité de la technologie, le coût du MWh d’un nouveau réacteur nucléaire de type EPR reste au niveau du coût MWh d’une centrale à gaz, même avec un coût du capital élevé de 9-10 % et avec une internalisation accrue des coûts sociaux du nucléaire (calculée ici en suivant les données du rapport de la Cour des comptes de 2013).

Les coûts du MWh d'un réacteur Gen III de série (EPR n°5)
avec internalisation supp.des externalités en référence au rapport de la C. des Comptes

8% Coût du K	EPR n° 5 à 3000€/kW	Cycle combiné gaz à 850€/kW Gaz à 7-10 $/mbtu
Coût total du MWh Avant réajustement	67,0 €	65,0- 82,0
Doublement du coût de gestion des déchets	+0,5 €	
Doublement du coût de démantèlement	+2,0 €	
Provisions pour fonds d'assurance d'un accident (sur 40 ans) de 70 milliards (Cdes Comptes)	1,40 €	
de 430milliards (IRSN)	8,6 €	
	71 € 78,1€	Avec Prix CO2: 25€/t 74,0 – 91 €

Par rapport aux coûts considérés encore en 2011, on considère un doublement du coût des gestions des déchets, un doublement du coût de démantèlement, ainsi que des provisions pour fonds d'assurance d'un accident de 70 milliards, ce qui représente une contribution de 1,40 €/MWh. On considère même des provisions pour couvrir le coût d'accident ré-estimé dans une étude rendue à l'IRSN en 2013, à 430 milliards, qui se monteraient à 8,6 €/MWh. Le coût ainsi augmenté reste proche des coûts du cycle combiné à gaz, avec un prix du gaz et du CO_2 plausible pour l'Europe dans les vingt prochaines années. Un prix du CO_2 de 25 €/t de CO_2 met plus ou moins le nucléaire à hauteur des cycles combinés à gaz dans la situation la plus défavorable quand on prend en compte une assurance généreuse contre l'accident nucléaire.

La gouvernance de la sûreté nucléaire comme garant de l'économicité du nucléaire mondial

La préservation de l'acceptabilité du nucléaire dans les pays choisissant d'utiliser cette technologie a valeur de bien collectif mondial, dès lors que le nucléaire apparaît comme une des options technologiques qui peut contribuer à préserver la stabilité du climat dans la durée et à un ralentissement de l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables. Or un accident nucléaire dans un pays, qui résulterait de compétences insuffisantes et de laxisme en matière de sûreté, aura pour effet externe la déstabilisation de l'acceptation de la technologie dans les autres pays où fonctionnent des réacteurs beaucoup plus sûrs et mieux contrôlés. C'est ce que

montrent clairement les conséquences de Tchernobyl et Fukushima dans les autres pays, alors que tous deux ont résulté du manque d'une culture de sûreté rigoureuse, de défauts de vigilance et de prudence des opérateurs nucléaires en matière de sûreté, d'inapplication des règles de sûreté en exploitation, et au-delà, du manque d'indépendance des autorités de sûreté.

Redisons-le encore une fois, car ceci nous paraît fondamental : ce manque d'indépendance s'est clairement manifesté au Japon par les déficiences en matière d'exigences de mise à niveau de réacteurs anciens, d'autorisation d'implantation de réacteurs dans des zones à risques naturels élevés et d'impréparation à la gestion d'une crise extrême.

Les besoins d’une gouvernance forte de la sûreté nucléaire
Il faut d’abord une séparation totale de l’autorité de sûreté des instances de promotion du nucléaire. (La Corée a bien réagi après Fukushima sur la modification de ses réacteurs existants mais décidé récemment de replacer l'Autorité qui était indépendante au sein du ministère de la Technologie et de la Recherche). Pour assurer l'indépendance, il faut garantir celle des ressources financières. Il faut veiller aux questions de nominations et de « *revolving door* » (c'est-à-dire empêcher les anciens dirigeants et membres du staff de l’autorité de partir chez les régulés ou dans l’industrie de construction nucléaire).

Une seconde condition est la transparence. L'exploitant doit rendre compte publiquement des incidents. En symétrique, les décisions d'autorité doivent être argumentées, éventuellement se prendre à la suite d'audition d’experts et de confrontations des points de vue.

Une troisième condition est le pouvoir d’agir vis-à-vis des constructeurs et des proprietaires-exploitants, c'est-à-dire imposer des standards rigoureux (en s’alignant sur les réglementations les plus sévères des autres pays), contrôler les constructions, contrôler l'exploitation. Il faut pour ce faire coupler l'indépendance avec les compétences en ressources humaines repérables par le nombre élevé de contrôleur par réacteur.

Que signifie indépendance s'il n’y a pas, à côté, des compétences et des pouvoirs réels ? Au niveau de compétences en Russie, la sûreté est dans un organisme indépendant qui s'occupe de toute la sûreté industrielle. Mais ils n’ont pas assez de main-d’œuvre spécifique sur le nucléaire. En Chine, il y avait manque de staff avant Fukushima, et ils n’arrivaient pas à suivre la construction et l’exploitation des réacteurs. (Il y en avait dix-sept en place, quarante, trente en construction). Ils ont mille personnes à l’intérieur de l'organisme de sûreté. Ça fait vingt par réacteur en exploitation et en construction, alors que la norme dans les pays occidentaux est de trente à quarante. C'est aussi un point important au Japon puisque le ratio était de vingt à vingt-cinq personnes avant Fukushima.

Le besoin d’une gouvernance internationale
Il y a un intérêt commun à ce que tous les pays qui maintiennent l’option nucléaire édictent des normes de sûreté sévères (dont l’implantation des équipements dans des zones aux risques naturels limités) et renforcent conjointement les pouvoirs de leur autorité de sûreté nucléaire et ses compétences de contrôle sur la construction et l’exploitation des équipements nucléaires et ses pratiques de gestion de crises. L’enjeu concerne bien sûr les pays « primo-accédants » (Émirats, Viêtnam, Turquie, Indonésie, Pologne, etc.), où les conditions minimales de compétences et de réglementation sont à créer. Mais elle concerne aussi les pays de bon niveau technologique, mais où il n’y a pas de culture de séparation des fonctions de l’État, pas de mise à distance des exploitants électriques vis-à-vis des ministères, et où la légitimité de la technocratie rend difficiles les interrogations sur la rigueur des contrôles. Le cas type est le Japon, mais on peut mettre dans cette catégorie des pays comme Taïwan, l’Inde et aussi la Chine

où non seulement se posent de telles difficultés, mais où le caractère autoritaire et non démocratique du régime supprime toute pression du contrôle démocratique sur les institutions de sûreté nucléaire. On pourrait aussi mettre la Russie pour des compétences en ressources humaines limitées, dans cette catégorie malgré les évolutions positives depuis Tchernobyl ainsi que les anciennes républiques soviétiques (Ukraine, Arménie, Biélorussie).

Tableau 1 : Catégorisation des pays en fonction de l'indépendance du contrôle de la sûreté avant Fukushima.

Subordination de la fonction de contrôle Centralisation technocratique ou autoritaire.	Indépendance de la fonction de contrôle Centralisation institutionnelle.	Indépendance de la fonction de contrôle Fragmentation des pouvoirs.
Japon, Corée du sud, Taïwan, Chine, Inde, Afrique du Sud, Brésil, Tchéquie, Bulgarie, Roumanie, Ukraine, Arménie.	Royaume-Uni, Suède, Ontario (Can.), France après 2000, Russie.	États-Unis, Belgique, Allemagne, Espagne, Suisse

Note : l'information sur la fonction de contrôle de la sûreté des différents pays figure dans les analyses pays de la World Nuclear Association (voir le website de la WNA).

Les infléchissements nécessaires auront les meilleures chances de se réaliser si s'instaure une coordination internationale évoluant rapidement vers un régime international contraignant en matière de sûreté nucléaire, comme cela a été discuté à plusieurs reprises depuis mars 2011 dans le cadre du G20 et de conférences de l'AIEA, mais jusqu'ici sans résultat marqué. Tout pays qui veut utiliser l'énergie nucléaire devrait accepter des normes communes et des contrôles externes sans se retrancher derrière l'argument selon lequel la sûreté nucléaire relèverait de la souveraineté nationale, pour préserver ce bien collectif mondial qu'est l'acceptation du nucléaire.

Les pays de l'OCDE qui sont attachés à maintenir l'option nucléaire devraient affirmer une volonté politique forte pour mettre en place une telle gouvernance mondiale de la sûreté nucléaire. Ils devraient aussi être prêts à financer certains des coûts supplémentaires que ces nouvelles exigences partagées auraient pour les pays les moins riches choisissant l'option nucléaire, en bonne logique de gestion d'un bien public mondial.

La gouvernance de ce régime pourrait être dévolue à l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), instance de l'ONU qui a pour vocation de faciliter le développement des usages civils de l'atome dans le respect des normes de la non-prolifération. Actuellement, alors qu'elle détient compétences et pouvoirs de contrôle en matière d'usages pacifiques d'installations nucléaires et de commerce des équipements et de matériaux nucléaires, elle n'a que des compétences dans le domaine de la sûreté des installations. Et il semble qu'en dépit des prises de conscience de l'importance de l'enjeu d'acceptation sous l'effet de Fukushima de grands pays ne sont pas prêts à une telle transformation.

Que peut-on faire actuellement ?
Une telle gouvernance mondiale, contraignante, n'est pas possible, car les États-Unis n'en veulent pas, comme la Chine, l'Inde pour des raisons de souveraineté.

Pour l'heure, le seul chemin praticable apparaît être celui d'une combinaison d'actions de coordination de l'AIEA en relation avec l'association mondiale des autorités de sûreté nucléaire en matière de normes de sûreté, d'un côté, et d'actions d'autocontrôle des exploitants au plan mondial dans le cadre de leur association mondiale, la World Association of Nuclear Operators (WANO). Elle cherche depuis Fukushima à renforcer ses pouvoirs à l'instigation de ses membres. Installée en 1989 à la suite de Tchernobyl, WANO agit dans quatre directions : la formation technique, le soutien en expertise technique, les échanges d'expériences d'exploitation et, depuis 1992, des peer reviews menées pour chaque centrale à un rythme de tous les six ans. WANO cherche à renforcer la crédibilité de son action et les engagements de ses membres, notamment en matière de respect des recommandations des peer reviews, et de la fréquence des contrôles (passage de six ans à quatre ans). L'incitation viendrait de la publication d'un classement des équipements, de la publicité qui serait donnée au non-respect des recommandations et de la menace d'exclusion de WANO. Est-ce que ce type d'autocontrôle pourrait être suffisant s'il n'est pas plus contraignant ?

En tout état de cause, l'avenir d'une gouvernance mondiale de la sûreté nucléaire demeure incertain, faute de volonté politique. Cette incertitude apparait être une hypothèque qui pèsera lourdement sur le futur de la technologie, tant qu'elle ne sera pas levée.

Conclusion

La place du nucléaire dans l'économie énergétique peut être assurée, car on a atteint une asymptote de complexité même si l'on cherche toujours à imaginer un peu plus de sûreté. Certes, il y aura toujours un risque résiduel. Il faut déjà faire en sorte que le pensable ne se réalise pas, comme le montrent les accidents de Tchernobyl et de Fukushima. Si, déjà, dans le futur, le contrôle des risques nucléaires est géré partout de façon absolument rigoureuse, le bon chemin aura été pris pour assurer l'économicité du nucléaire dans le futur.

Références bibliographiques

Finon (D.) (2012). « L'économie du nucléaire revisitée. Leçons de l'apprentissage d'une technologie complexe par des accidents majeurs ». *La Revue de l'énergie,* n° 607, mai-juin 2012, pp. 165-191.

Finon (D.) (2013), « Vers une gouvernance mondiale de la sûreté nucléaire contraignante : une quête impossible ? ». *La Revue de l'énergie,* n° 616, novembre-décembre, pp. 439-450.

Grubler (A.) (2010). "The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing", *Energy Policy,* Vol. 38, n° 9, September 2010, pp. 5174-5188.

Lévèque (F.) (2013). *Nucléaire On/Off. Analyse économique d'un pari.* Paris, Dunod.

Laurent Joudon : Deux facteurs clés pour l'avenir économique du nucléaire : compétitivité de la filière et régulation des marchés de l'électricité

Laurent Joudon est directeur d'études économiques à la direction de la stratégie d'EDF.

Journées CNRS sur la transition énergétique – 22 octobre 2013

L'avenir économique du nucléaire

Deux facteurs clés : compétitivité et régulation des marchés

Laurent JOUDON – EDF

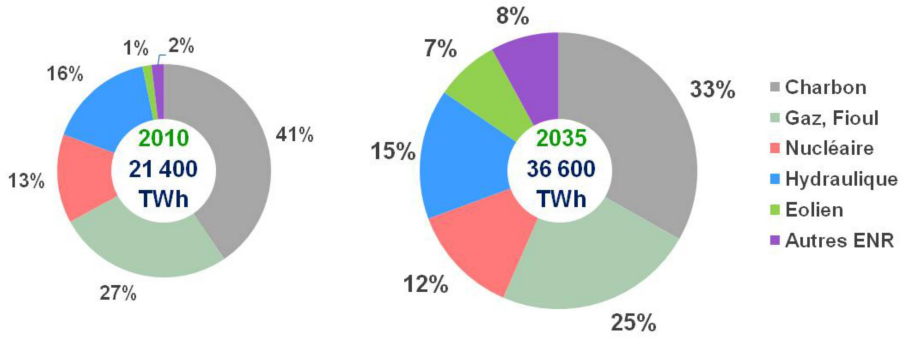
L'avenir économique du nucléaire

- **Intérêt de l'option nucléaire**
  - **Changement climatique et mix électrique mondial**
- **Les facteurs économiques**
  - **Maîtrise industrielle**
  - **Coûts - Compétitivité**
  - **Organisation du marché de l'électricité**
- **L'exemple britannique**

Laurent Joudon : Le nucléaire a-t-il un avenir économique ? La question est légitime en raison de l'inflation des coûts de construction de nouvelles centrales : un facteur 2 à 3 entre les premières estimations faites il y dix ans, lorsque plusieurs pays ont décidé de relancer le nucléaire, et les révisions récentes. Après un rappel des raisons qui justifient l'option nucléaire, on examinera les deux clés d'une réponse positive sur le plan économique. Il s'agit d'une part de retrouver la maîtrise industrielle après une quinzaine d'années sans mise en chantier dans les pays occidentaux, afin de délivrer un nucléaire de « génération 3 » au coût de revient compétitif par rapport au fossile et aux renouvelables. Cependant, dans les marchés libéralisés de l'électricité, la compétitivité ne garantit pas l'incitation à investir ; le second facteur de succès réside donc dans une architecture de marché capable de donner une visibilité à long terme. L'exemple britannique en illustre l'importance et donne des pistes.

Toutes les filières sans CO_2 sont requises

AIE / WEO 2012 – Scenario New Policies (+3 à 4 °C en 2100)



Plus de 300 GW de nucléaire nouveau à mettre en service

Besoins énergétiques et changement climatique : l'intérêt de l'option nucléaire

On peut s'attendre à une croissance mondiale plus sobre en énergie que dans le passé. Dans le scénario « new policies » du World Energy Outlook 2012, l'AIE montre une croissance économique annuelle moyenne de 3,6 % entre 2010 et 2035, mais une croissance de la consommation d'énergie finale de seulement 0,4 %. Toutefois, ce taux atteint 1,4 % pour l'électricité, parce qu'elle se substituera aux hydrocarbures pour certains usages. Or la production d'électricité est aujourd'hui responsable de 40 % des émissions mondiales de CO2. Pour soutenir la croissance du besoin tout en luttant contre le changement climatique, toutes les filières de production électrique sans CO2 sont requises.

Regardons ce scénario central de l'AIE, qu'on peut considérer comme un minimum d'ambition, car il entraînerait un réchauffement climatique estimé entre +3 et +4° C à la fin du siècle. Avec un effort de développement des ENR (85 GW par an, pour une subvention annuelle de 150 milliards de dollars) et une proportion de nucléaire constante, on abaisse de 10 % seulement la part des énergies fossiles et d'à peine 30 % l'émission de CO2 par MWh. Si la part du nucléaire diminue, ce seront les sources fossiles qui compenseront pour produire de l'électricité en base, et sans doute le charbon en premier lieu. Quant à la disponibilité d'une technologie de CSC à échelle industrielle vers 2030, elle est douteuse. L'Allemagne d'aujourd'hui l'illustre bien : en déployant la politique d'ENR la plus volontariste au monde mais en arrêtant 7 GW de nucléaire après Fukushima, elle a recouru au charbon pour 53 % de sa production électrique au premier semestre 2013.

Le besoin de capacités de production nucléaire peut alors s’estimer à quelque 300 GW de nouvelles centrales : une addition nette de 200 GW pour maintenir constante la part dans le mix, plus le remplacement d’environ 100 GW qu’il faudra déclasser d’ici à 2035. Dans le scénario « 450 ppm », qui contient le réchauffement planétaire à +2° C en fin de siècle, le supplément d’effort doit concerner toutes les technologies sans carbone, et 500 GW de nouvelles centrales sont à mettre en service d’ici à 2035. Développer ces 15 à 20 GW de nucléaire par an requiert des conditions. La sûreté vient en premier et retentit naturellement sur le coût de construction des nouveaux modèles de réacteurs.

Les chemins de la maîtrise industrielle

- **Où et quand ?**
  - Aujourd'hui, 75 % du nucléaire neuf en Asie
  - OCDE : d'abord prolonger, puis remplacement 2025-30
- **Refonder l'effet de série**
  - Génération III : moins évolutionnaire que prévu
  - Optimiser le design et l'adapter aux contextes nationaux
  - Remontée en compétence du tissu industriel
- **Descendre la courbe d'apprentissage**
  - Des « FOAK » à 90 – 100 €/MWh
  - Des « NOAK » à 70 €/MWh

Les chemins de la maîtrise industrielle et d'un coût compétitif

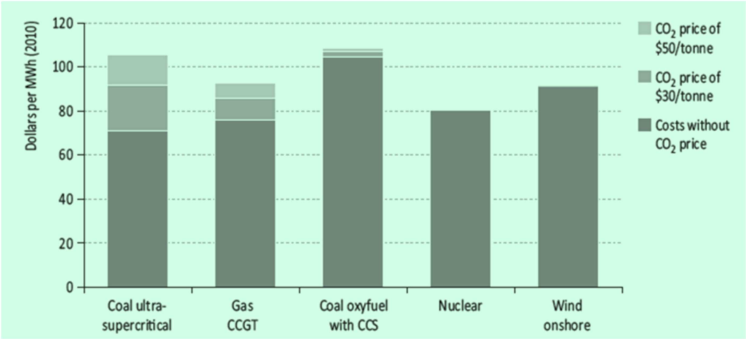
Si les volumes que nous venons d'évoquer sont comparables aux réalisations de pays de l'OCDE à l'époque des « programmes nucléaires » (1970-1990), le développement connaîtra demain une plus vaste géographie. Les dimensions spatiales et temporelles sont lourdes d'implications stratégiques pour le tissu industriel mondial : aujourd'hui comme dans les dix années à venir, les trois quarts des centrales nouvelles naissent en Asie et la moitié en Chine. Pour l'Europe et l'Amérique du Nord, l'accent actuel est mis sur la prolongation des parcs existants, et c'est plutôt à partir de 2025-2030 que de nouvelles centrales seraient mises en service.

Les nouveaux modèles, dits de « génération III », ont été conçus dans les années 1990, tel l'EPR d'Areva ou l'AP1000 de Westinghouse. Leur conception n'apporte pas de rupture par rapport à la génération précédente mais incorpore les retours d'expérience accumulés, les améliorations identifiées et une élévation des référentiels de sûreté. Quand de premiers chantiers ont été envisagés il y a dix ans (loi d'orientation française prévoyant un « démonstrateur » EPR, Energy Policy Act aux Etats-Unis, décision finlandaise…), les coûts de construction étaient estimés en-dessous de 2 000 €/kW. Aujourd'hui, on sait que le coût de construction des EPR de Flamanville ou d'Olkiluoto sera plutôt de 5 000 €/kW; les devis des projets américains récemment mis en chantier (il s'agit de l'AP1000) sont du même ordre. Pourquoi une telle dérive ? Le second chiffre, qui assombrirait nettement la compétitivité du nucléaire, est-il définitivement le coût des centrales futures ?

Deux facteurs industriels se combinent pour expliquer la dérive. D’une part, les nouveaux modèles se révèlent moins « évolutionnaires » que prévu. Les améliorations de conception, mise à l’épreuve du chantier réel, soumises au test et souvent à une exigence accrue des autorités de sûreté, se sont traduites par une plus grande complexité. D’autre part, les acteurs industriels occidentaux n’avaient pas lancé de projet neuf depuis quinze, voire vingt ans, ce qui a engendré un réel phénomène de désapprentissage, sans doute aggravé par un allongement des chaînes de sous-traitance. On peut d’ailleurs constater, pour étayer ce second point, que la construction des deux EPR de Taishan, en Chine, là où le tissu industriel nucléaire est resté actif sans discontinuer, n’a pas connu de dérives de coûts et de délais aussi grandes qu’en France ou qu’en Finlande. Cette analyse des causes montre également la voie à suivre : d’abord, tirer les leçons des têtes de série, rectifier les dispositions constructives, optimiser la conception en lui apportant des simplifications. Ensuite, s’appuyer sur la remontée en compétences du tissu industriel – c’est là qu’intervient la capacité des grands fournisseurs à nouer des relations industrielles avec la Chine. Enfin, redonner un sens à la notion d’effet de série, tout en sachant qu’elle différera forcément de celle réussie en France dans les années 1970-1980, lorsque vingt tranches identiques étaient commandées par le même maître d’œuvre, EDF, au même constructeur, Framatome ; construire le même modèle de réacteur dans différents pays demandera à chaque fois une adaptation au contexte (démonstrations de sûreté…) et une « tête de série locale ».

Une fourchette de 70 à 100 €/MWh

Coûts de production actualisés par filière, horizon 2020



Source : AIE / WEO 2011 – Scénario «New Policies»

Besoin de références : méthode partagée, coûts « complets »

Tentons de quantifier ces chemins de maîtrise industrielle en nous appuyant sur une récente étude universitaire[11] commandée par la Commission européenne. Pour une tête de série, le coût de construction (« overnight cost », sans intérêts intercalaires) est estimé à 4 250 €2012/kW (avec une plage d'incertitude de -20 % à +30 %). Les tranches de série (au moins 5 unités) sont estimées à 3 400 €2012/kW (avec une plage d'incertitude de -10 % à +15 %). Dans le cas européen, l'auteur suggère que la vraisemblance maximale se situe entre l'estimation moyenne et la valeur haute de la fourchette. Le coût révisé de l'EPR de Flamanville, les 8,5 Md€ indiqués par EDF en décembre 2012, est dans cet intervalle. L'étude propose également des coûts actualisés de production, tenant compte de toutes les dépenses, y compris la déconstruction et la gestion des déchets. En les restituant avec un unique taux d'actualisation de 8 %[12], pour ne pas multiplier ici les résultats chiffrés, on obtient 73 à 95 €2012/MWh pour la tête de série et 63 à 74 €2012/MWh pour la série, qui réalise ainsi une réduction de coût de revient de l'ordre de 20 %.

La compétitivité de tels coûts s'apprécie à l'aune des autres filières de production en développement. L'AIE livre une telle comparaison, qui invite à retenir une fourchette de 70 à 100 €/MWh. Dans le cas du cycle combiné à gaz, on peut relier les 70 €/MWh à un prix du gaz de 10 $/MBTu, soit le prix actuel en Europe et donc un minorant à long terme, associé à une pénalisation nulle des émissions de CO2, et les 100 €/MWh à un prix du gaz de 13 $/MBTu augmenté de 40 € par tonne de CO2 émise. Enfin, l'éolien maritime et le solaire resteront nettement

11 D'Haeseleer (W.) (2013), *Synthesis on the Economics of Nuclear Energy,* Université de Louvain.

12 Un taux d'actualisation de 8 % (réel, avant impôt) correspond au coût moyen pondéré du capital d'une entreprise européenne de l'énergie, typiquement 6-7 % en nominal après impôt.

plus coûteux, surtout en incluant les coûts d'intégration dans le système (réseau et moyens de back up).

La leçon est ainsi la suivante : le coût des têtes de série « génération III », qui peut avoisiner les 100 €/MWh, est critique quant à la compétitivité ; l'expérience des premières réalisations et le réapprentissage de la filière industrielle (en Europe et aux États-Unis) permettront de revenir en bas de la fourchette 70-100 €/MWh. La perspective est réaliste, mais également impérative pour envisager sereinement de développer un nucléaire sûr et compétitif[13]. Afin de bien préparer les décisions publiques, afin de mener des débats bien informés, il est important de publier de telles évaluations, d'en confronter et d'en partager les hypothèses et les méthodes. Il est dommage, à ce titre, que l'administration française ait cessé depuis plusieurs années d'élaborer les « Coûts de référence de la production d'électricité ».

13 Rappelons que seul le nucléaire neuf est considéré ici, dans l'optique de développements à long terme. L'équation économique du nucléaire existant est très différente : le coût de revient, incluant les coûts d'élévation du niveau de sûreté et de jouvence, est estimé, dans le cas du parc français, entre 40 et 55 €/Mwh selon les différentes sources. Ce coût est donc nettement inférieur à celui de tout moyen neuf.

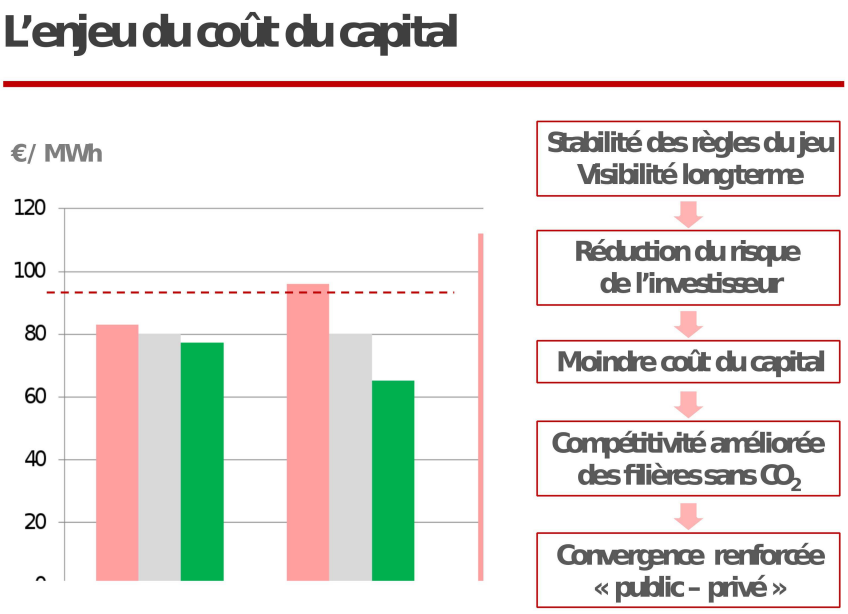
Des règles du jeu visibles et stables

- **Dans un marché « libéralisé », des risques de divergence**
  - Tropisme de court terme
  - Prime de risque excessive sur le coût du capital
  - Prise en compte des externalités ?
- **Incohérences du marché européen**
  - La plupart des investissements sont hors marché (ENR)
  - Le prix ETS n'est pas le dual d'une politique climatique !
  - Le marché de gros : impuissance à fonder les bons investissements
- **Organiser la convergence « public – privé »**
  - CO2 : objectif 2030, au besoin prix-plancher
  - Recours aux contrats de long terme
  - La concurrence au service des meilleurs coûts & technologies

---

De l'importance de règles du jeu visibles et stables

Vérifier que le coût de production du nucléaire futur est compétitif permet de retenir cette option dans un optique d'intérêt général, de « social welfare ». Toutefois, ce sont des investisseurs privés qui, dans la plupart des pays, construiront les centrales. Dès lors, une seconde question apparaît : l'organisation du marché de l'électricité est-elle compatible avec des investissements intenses en capital et dont la rentabilité s'obtient sur plusieurs décennies ? De fait, les marchés libéralisés qu'on a créés dans les années 1990 risquent d'induire une divergence entre l'approche « collectivité » et celle d'investisseurs en concurrence : tropisme de court terme, prise en compte imparfaite des externalités, instabilité des règles du jeu.



Dans son état actuel[14], le marché européen fournit un parfait exemple de ces risques : le marché de gros, sur lequel on a voulu baser toutes les transactions, en se défiant des contrats de long terme pour tenter d'accroître la concurrence, ne délivre pas de signal pertinent pour décider les investissements. L'injection massive de production renouvelable subventionnée (60 % des nouvelles capacités électriques mises en service depuis 2006), dont le coût variable est nul et le fonctionnement intermittent, a considérablement perturbé les prix. De même, le choix européen de donner un signal-prix sur le carbone via un marché de permis d'émission négociables n'a pas résisté aux négociations permanentes sur la quantité de quotas à mettre en circulation, comme l'atteste un prix devenu quasi nul et très favorable à l'utilisation maximale des centrales au charbon. Ainsi, le risque ajouté par le marché finit par dominer le risque industriel qu'un investisseur compétent sait gérer. Il en résulte une hausse du coût de capital qui va complètement déplacer les choix d'investissement, au détriment des filières les plus intensives en capital – qui sont également celles qui n'émettent pas de CO2.

Au moment où l'on prend conscience des piètres résultats de la libéralisation du marché européen et du besoin de réformes, il importe de rechercher une meilleure convergence entre les objectifs publics et les décisions d'investissements privées. Les contrats de long terme sont l'un des instruments souhaitables[15], qui peuvent donner la

14 Voir notamment le rapport du Commissariat général à la stratégie et à la prospective : Auverlot (D.) et *alii* (2014), *La crise du système électrique européen.*

15 Plusieurs travaux récents en économie le soulignent. On peut notamment citer : Finon (D.) (2012), Institutions and Electricity Systems Transition Towards Decarbonisation : the hidden change of the market regime, Cired, ou encore Helm (D.) (ancien conseiller énergie de Tony Blair) (2014), *The current situation and mid-term propects for European electricity markets*.

visibilité voulue, réduire le risque et donc le coût du capital, tout en permettant une concurrence – qui pourrait même être accrue – entre investisseurs et entre filières. De même, l'adjonction d'une trajectoire-plancher de long terme (par exemple, 25 €/tonne en 2020 puis 50 en 2030) au marché des permis d'émission de CO2 permettrait une réelle prise en compte de l'enjeu du changement climatique.

Regardons les marchés ouverts à la concurrence dans lesquels des centrales nucléaires ont été récemment engagées : il s'agit de projets qui ont pu, d'une façon ou d'une autre, s'attacher une forme de visibilité à long terme. Aux Etats-Unis, ces projets se trouvent dans des Etats qui n'ont pas choisi d'ouvrir leur marché jusqu'aux petits consommateurs et ont donc conservé des tarifs réglementés (Géorgie, Caroline du Sud), qui sont une forme de contrat de long terme. En Finlande, l'investisseur, TVO, peut être comparé à une coopérative dont les actionnaires sont également les utilisateurs de l'énergie produite, des industriels du papier notamment. Continuons avec l'exemple du Royaume-Uni, qui a entrepris une réforme de son marché électrique dans le but, précisément, d'atteindre ses objectifs de long terme.

Royaume-Uni : une démarche logique

- **Le contexte énergétique : une nécessaire transition**
  - Epuisement des ressources en Mer du Nord
  - Remplacement du parc électrique : dès 2020 - 2025
  - Politique climatique
- **Un choix politique avec une évaluation économique**
  - Nuclear New Build, ambition ENR
  - Pas de subvention chronique
- **D'où les instruments de l'EMR**
  - Guides de prix visibles et prévisibles (CO2, Coûts de référence)
  - Contrats longterme (CfD)
  - Facilitation de la concurrence pertinente, pas aide d'Etat

La réforme du système électrique britannique : une démarche logique

Comme l'Union européenne, le Royaume-Uni base ses objectifs énergétiques sur le triptyque compétitivité, sécurité d'approvisionnement, développement durable. Il en a tiré les conséquences à partir de ses propres perspectives, à savoir l'épuisement des réserves d'hydrocarbures de la Mer du Nord, la nécessité de remplacer un parc électrique vieillissant dès la décennie 2020-2030, et d'une forte volonté publique de réduire les émissions de CO2, largement dues aujourd'hui au poids de la production d'électricité avec du charbon. La nécessité de recourir à toutes les formes de production sans carbone est dès lors apparue avec force et urgence : le mix électrique, à l'horizon 2030, doit comporter de l'ordre d'un tiers de renouvelables et un tiers de nucléaire, et toutes ces capacités sont à construire.

Après plusieurs années de consultations et de débats, nourris par des analyses économiques publiquement discutées[16], le gouvernement a entrepris l'Electricity Market Reform qui vise à introduire les instruments qui permettront au marché de délivrer les résultats voulus, tout en s'interdisant la subvention publique. Parmi ceux-ci, nous citerons le Carbon Price Support, qui fixe le prix minimum que paieront les émetteurs de CO2 dans le secteur électrique, au cas où le prix de marché européen lui serait inférieur, et l'introduction de « Contracts for Difference », qui sécurisent la recette des investisseurs dans les

16 Comme exemple des éléments très détaillés rendus publics par le gouvernement, on peut citer les scénarios d'offre et de demande, avec les quantités et les prix associés, ou encore les coûts de référence des différentes technologies.

technologies sans carbone sur une durée adéquate. C’est dans ce cadre qu’un accord a été conclu avec le groupe EDF, en octobre 2013, pour la construction de deux tranches EPR à Hinkley Point. Un prix d’exercice est fixé (92,5 £/MWh), et l’exploitant recevra pendant trente-cinq ans une somme égale à la différence entre ce prix et celui constaté sur un marché de référence ; si le prix de marché vient à être supérieur, c’est l’exploitant qui paye la différence.

Le nucléaire a une perspective et un avenir économique là où sont réunies deux conditions

- **Compétitivité économique par rapport aux autres filières, externalités incluses – Maîtrise industrielle.**

- **Visibilité et stabilité des règles du jeu – Convergence de points de vue investisseur privé - collectivité.**

L'idée essentielle d'un tel contrat est de pallier les carences du marché qui se révéleraient dissuasives pour investir, et non de subventionner a priori l'investissement. Étant établi que le prix est en ligne avec le coût de développement du système électrique qui répond aux objectifs publics, le CfD apporte les couvertures qui n'existent pas sur les marchés (par exemple, le terme le plus lointain auquel se négocie une livraison d'électricité n'excède pas trois ans). Ce contrat est aussi une couverture contre l'instabilité des politiques publiques (si celles-ci venaient à faire baisser le prix de marché dans le futur, par exemple en relaxant le prix-plancher du CO2, alors l'investisseur en serait compensé). Cependant, la Commission européenne n'est pas de cet avis : elle a lancé, en mars 2014, une enquête approfondie au grief que ce contrat constitue une aide d'État qui peut fausser le marché européen. Les débats et la décision à venir seront particulièrement instructifs quant au chemin que veut prendre l'Europe pour se doter d'un système énergétique performant.

Thierry Duquesnoy : L'économie des différentes options du nucléaire de long terme

Thierry Duquesnoy travaille au CEA Économie du stockage des déchets radioactifs et Compétitivité comparée des systèmes nucléaires.

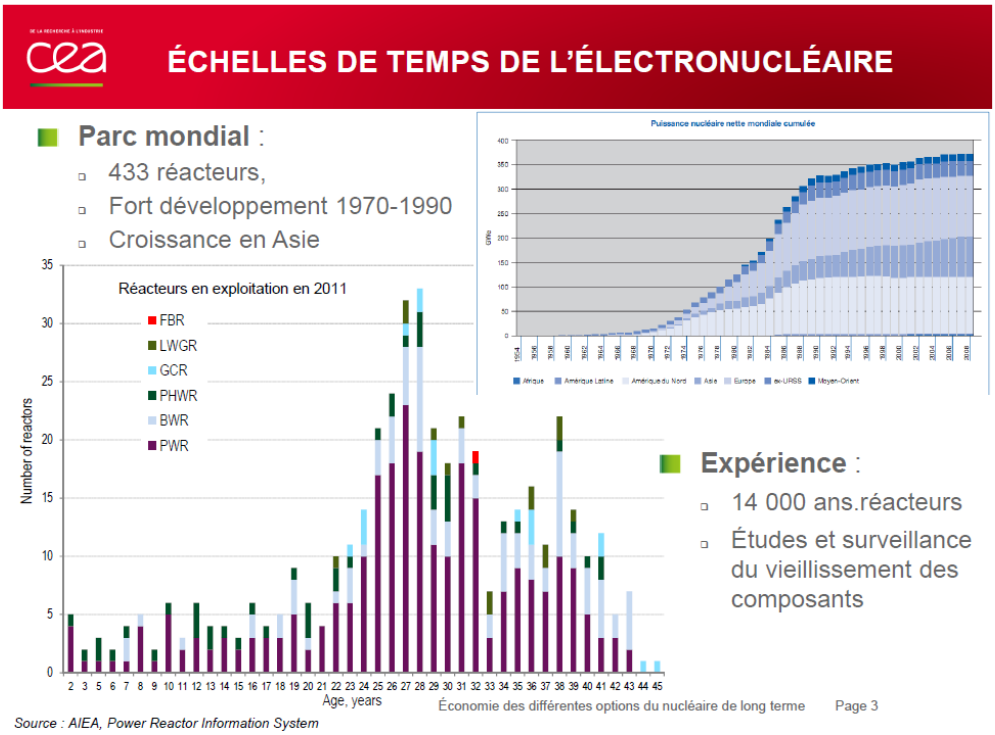
ÉCONOMIE DES DIFFÉRENTES OPTIONS DU NUCLÉAIRE DE LONG TERME

Thierry Duquesnoy,
DEN / DANS / I-tésé
Institut de Technico-Économie des Systèmes Énergétiques
Thierry.duquesnoy@cea.fr

CNRS, 2ième rencontre du cycle : « La transition énergétique en France, une cartographie des enjeux et des controverses »

le 22 octobre 2013

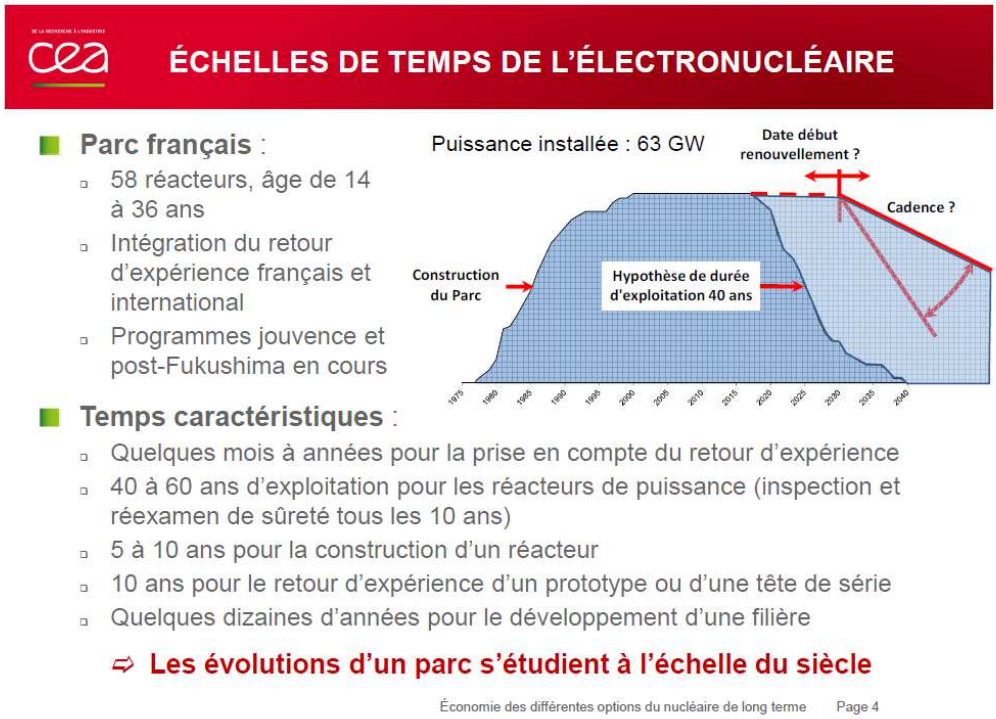
Thierry Duquesnoy : Je vous remercie d'avoir invité le CEA à présenter les résultats de divers organismes dont, bien entendu, les siens en matière de technico-économiques des options nucléaires de long terme. Les analyses que j'en tire n'engage que moi et non pas le CEA qui respecte une certaine réserve en tant qu'organisme public.



Le présent : génération II

Pour parler du long terme, quelques mots très rapidement déjà sur les enseignements que l'on peut retirer de la génération II, le parc actuellement en exploitation.

Je commence par le parc mondial dont on voit qu'il a été déployé à partir des années 1970 en réaction à une crise énergétique. La majeure partie des 433 réacteurs a été déployée en une vingtaine d'années. Sur ce graphique de distribution des âges des réacteurs, on s'aperçoit que, d'une part, on continue à en construire quelques unités par an, cela ne s'est pas arrêté, et que, d'autre part, la moyenne des âges est d'une trentaine d'années. On a donc un retour d'expérience assez important, significatif, sur le fonctionnement de cette génération II même si globalement c'est une industrie récente qui a commencé dans les années 1970.



Pour la France, le déploiement du parc date de la même époque. Au fur et à mesure de son exploitation, il a intégré en permanence le retour d'expérience français et international. Aujourd'hui, les mesures post-Fukushima viennent s'ajouter un programme de jouvence des installations qui a déjà commencé depuis quelques années.

Le graphique que vous avez en haut à droite montre la problématique du renouvellement de ce parc avec deux paramètres : la date du renouvellement et la cadence. À ce sujet, la première à se prononcer est l'Autorité de sûreté nucléaire, l'ASN, qui par le biais des visites décennales d'inspection et des réexamens de sûreté, se prononce sur la possibilité de continuer l'exploitation. Ensuite, c'est à l'industriel de savoir s'il est rentable d'effectuer les travaux de maintenance et de sûreté ou de remplacer. Enfin, cette courbe de remplacement sera gérée par les décisions sur les orientations en matière de politique énergétique.

Globalement sur le parc, les enseignements que l'on peut retirer sont les constantes de temps. Elles sont très courtes pour tout ce qui concerne la prise en compte du retour d'expérience. Tout à l'heure, il a été fait allusion au « recombineurs » d'hydrogène, modification faite très rapidement, d'autres modifications prennent plus de temps mais le retour d'expérience est systématiquement pris en compte au sein d'une durée d'exploitation qui est estimée de quarante à soixante ans, valeurs qui sont actuellement émises, et rythmée par les visites décennales.

Maintenant, quand on parle d'une nouvelle filière, l’objet de cet exposé, la durée de construction d’un réacteur est de cinq à dix ans. Obtenir le retour d'expérience du fonctionnement de ce réacteur représente une dizaine d’années. Quand on prend en compte le déploiement de la filière, on voit tout de suite que l'on est sur une échelle de quelques dizaines d’années et qu’une évolution de parc ne peut s'envisager qu'à l’échelle d'un siècle.

COÛT DE PRODUCTION DE LA GÉNÉRATION II

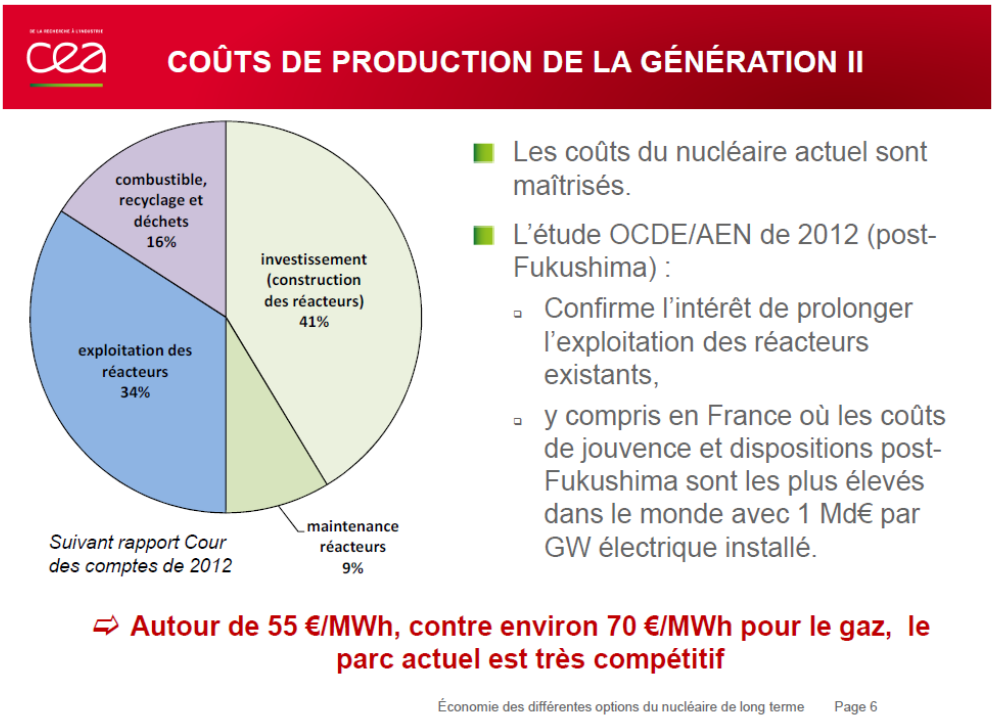
- Le coût de production pour le parc actuel (génération II) :
  - Est de **50 €/MWh** aux conditions économiques de 2010,
  - Passera à environ **55 €/MWh** par effet du programme de jouvence et des dispositions post-Fukushima.
- Il résulte d'un développement basé sur :
  - **Stratégie industrielle** d'ensemble,
  - **Répartition claire des rôles** entre les différents acteurs,
  - **Opérateur unique** (rationalisation de l'organisation et standardisation),
  - **Déploiement par paliers** générant économies d'échelle et progrès :
    - Amortissement des effets de têtes de série des paliers CP0, CPY, P4 et N4,
    - Gains par effet de taille 900, 1300, 1450 MWe,
    - Effet de série dans la réalisation de chaque palier,
  - **Duplication d'unités sur un même site**.

⇨ **Le nucléaire de génération II, en France, illustre la mise en place efficace d'une filière**

Économie des différentes options du nucléaire de long terme Page 5

Autre enseignement sur la génération II, le coût de production est, aujourd'hui, annoncé à 55 € le mégawattheure en intégrant les programmes de jouvence et de dispositions post-Fukushima. Le parc français est très compétitif.

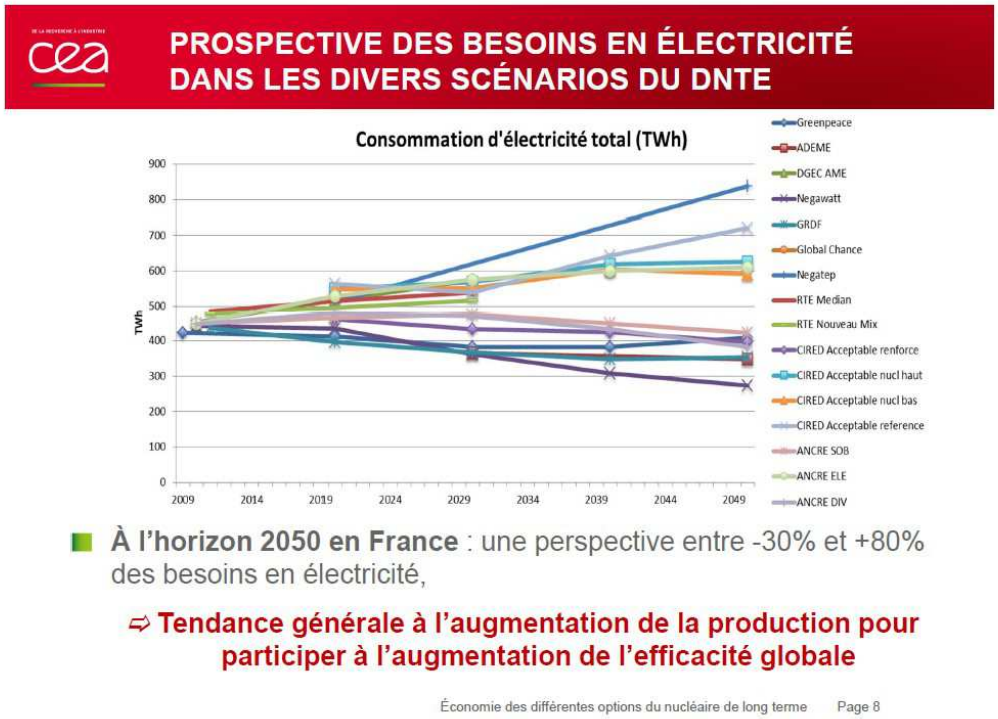
L'efficacité résulte d'une stratégie industrielle et d'une répartition des rôles très claire entre les différents acteurs. La mise en œuvre technique a également été judicieuse, un seul concept de réacteur PWR, un déploiement par paliers qui permet le développement technologique tout en gardant, à l'intérieur de chaque palier, le bénéfice de la standardisation et de l'effet de série ainsi que des mutualisations sur les sites également judicieuses. Sur la question de savoir comment mettre en place une filière, le parc actuel apporte énormément d'enseignements.



Je détaille ce coût de production. Il est maîtrisé à deux incertitudes près en l'attente d'une mise en œuvre industrielle de la gestion des déchets à vie longue et du démantèlement. Le camembert que vous voyez là montre les parts : investissement de 41 %, maintenance de 9 %, programme de jouvence inclus. Le coût du cycle du combustible, 16 %, et les coûts d'exploitation, 34 %, sont également bien connus.

Parmi les études sur la prolongation des durées d'exploitation, l'OCDE a elle-même effectué en 2012, donc après Fukushima, une étude où l'intérêt de prolonger l'exploitation est confirmée, y compris en France où son coût est de l'ordre du milliard d'euros par gigawattheure électrique, à un bémol près, celui des États-Unis où la « bulle » du gaz de schiste fait que la prolongation de certains réacteurs pourrait ne pas être rentable, mais c'est par rapport à un phénomène ponctuel sur le gaz de schiste.

En Europe, ce n'est pas du tout le cas, si l'on compare par rapport à un gaz à 70 € par mégawattheure, le parc actuel est compétitif.



Le futur proche : génération III

Le nucléaire futur, de génération III, a été développé pour avoir à la fois la capacité de remplacer des réacteurs qui seraient arrêtés et afin d'être présent sur le marché international.

Concernant les perspectives de la production d'électricité en France, ce graphique compile les résultats des scénarios envisagés dans le débat sur la transition énergétique. On s'aperçoit que la fourchette prévue à l'horizon 2050 par rapport à la production actuelle est entre -30 % et +80 %.

Globalement, il y a donc plutôt une tendance à la hausse de la production électrique qui correspond également à une contribution de l'électricité à l'efficacité globale du système énergétique.

DÉTERMINANTS DE LA PLACE DU NUCLÉAIRE DANS LE MIX ÉLECTRIQUE DU FUTUR

- **Les orientations politiques** définies par rapport :
  - Aux engagements internationaux génériques :
    - Réduction des émissions de CO2 (facteur 4, 450 ppm, …),
    - Règle des 3x20 en 2020 (et au-delà) du plan énergie-climat européen.
  - Aux objectifs nationaux :
    - Grenelle et engagements post-Grenelle (mesures techniques supplémentaires pour atteindre les objectifs de 2020),
    - Les engagements du gouvernement actuel :
      - part du nucléaire,
      - rénovation et construction des logements neufs, …

  ⇨ **Dispositions réglementaires, fiscales, économiques en place**

- **La performance économique** :
  - Coûts de production de l'électricité par les différentes énergies,
  - Coûts induits sur le réseau (back-up, renforcement) et entre les énergies.

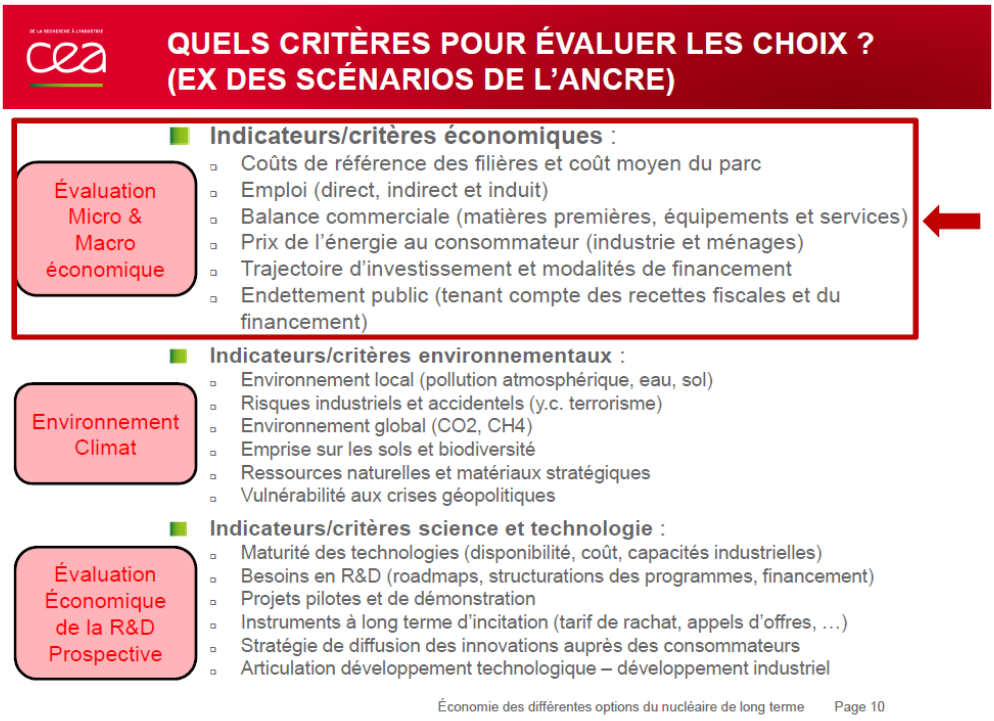
  ⇨ **Maintien de la compétitivité de l'électricité française**

Économie des différentes options du nucléaire de long terme Page 9

Les orientations qui seront prises pour le mix électrique vont résulter, d'une part, des engagements de la France par rapport aux grands engagements internationaux : la réduction des émissions de CO_2, le plan Énergie Climat européen et, d'autre part, des objectifs nationaux : le Grenelle, la part nucléaire en elle-même, la rénovation et la reconstruction de logements. Sur ces questions, les dispositifs réglementaires et les incitations fiscales et économiques sont en place.

Un autre paramètre important va être la performance économique d'ensemble de ce mix électrique qui dépendra de la pondération du coût de production de chaque type d'énergie par sa part dans le mix. Mais il ne faut pas oublier qu'elle dépendra également du coût induit sur le réseau par les puissances de back-up nécessaires et les renforcements des réseaux de distribution qui seront nécessaires en fonction des proportions des différentes énergies dans le mix, en gros entre les énergies de base et les énergies intermittentes.

Le nucléaire doit, pour des raisons économiques mais également pour des raisons de back-up, garder sa place dans un mix électrique compétitif.



Cette planche reproduit la grille des critères retenus par l'Ancre dans l'évaluation des différents scénarios, je pointe simplement les critères économiques, le premier bloc. Certains critères viennent directement à l'esprit : les coûts de production de référence des filières, le coût pour le consommateur, les investissements.

S'agissant de choix nationaux, les impacts sur l'emploi, la balance commerciale et l'endettement public sont également des éléments à prendre en compte.

COÛT DE PRODUCTION DE LA GÉNÉRATION III

- **L'EPR est le modèle de génération III le plus avancé :**
  - Europe, OL3 et FLA3 ont des coûts de construction élevés, environ 8 Md€, **liés aux effets de têtes de série industrielle,**
  - Chine, les 2 EPR de Taishan bénéficient du retour d'expérience, la réduction des durées de construction reflète la réduction des coûts.
  - Caractéristiques principales :
    - Capacité de 1630 MWe,
    - Disponibilité de 92%,
    - Dimensionnement pour 60 ans d'exploitation.
- D'autres types de réacteurs, de taille intermédiaire (ATMEA, AP1000, …), voire de faible taille avec les SMR, complètent l'offre par rapport aux réseaux et critères de choix locaux.

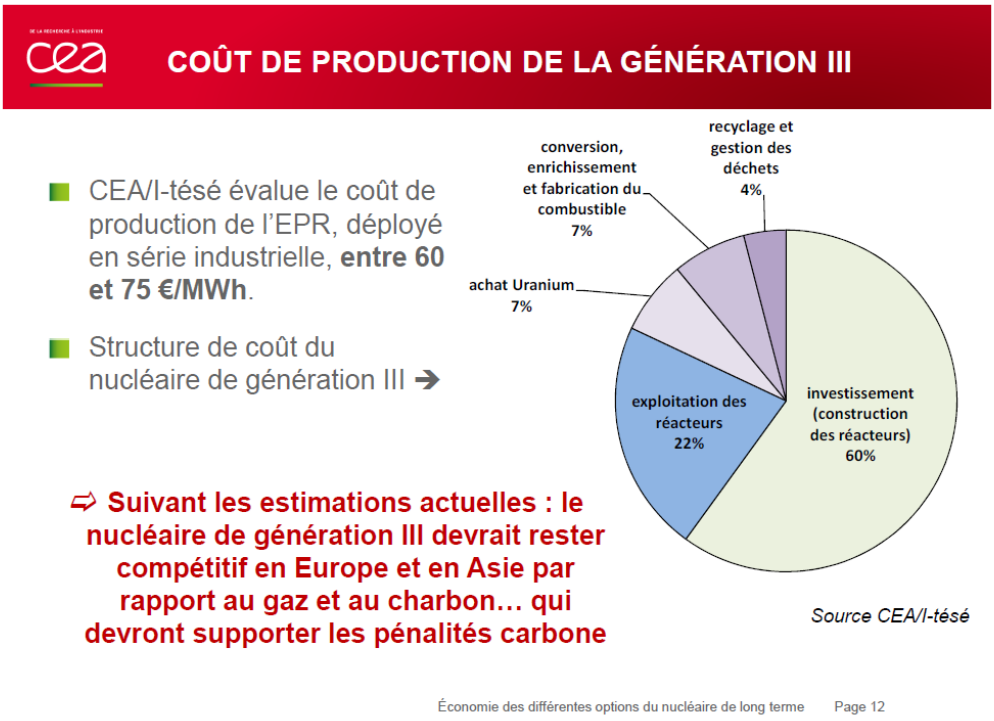
⇨ **Les têtes de série EPR montrent l'importance de la disponibilité de l'infrastructure industrielle sur les coûts de construction.**

Économie des différentes options du nucléaire de long terme Page 11

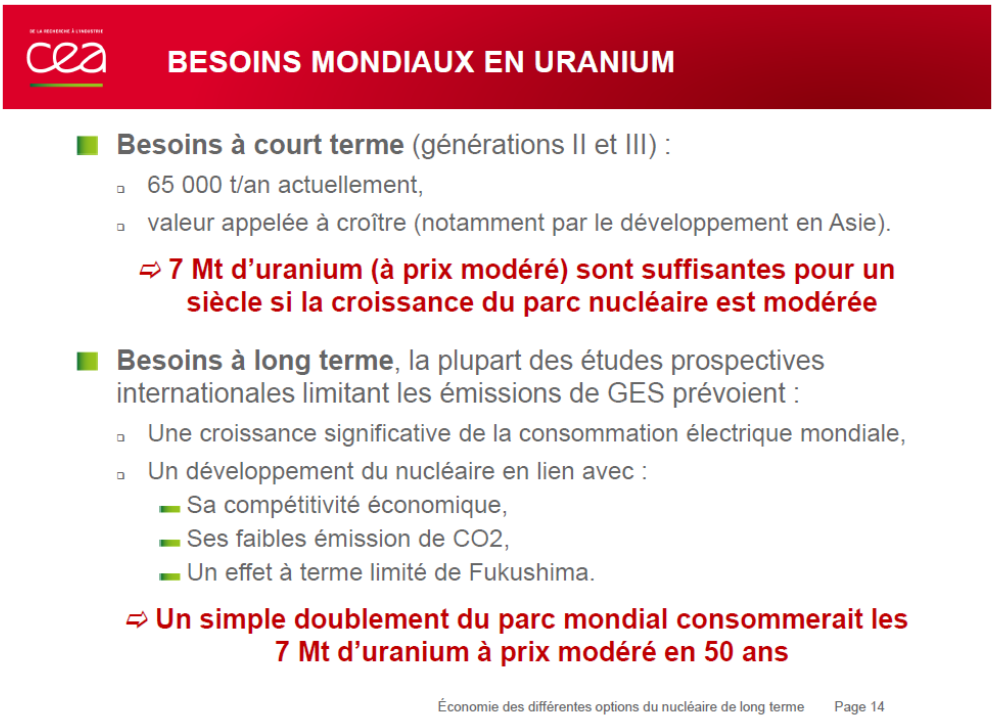
Plus techniquement, maintenant, examinons le coût de production des réacteurs de génération III.

Aujourd'hui, les têtes de séries Olkiluoto et Flamanville ont un coût de construction entaché par la remobilisation d'un tissu industriel et par tous les problèmes liés à une nouvelle conception de réacteur. La construction des EPR de Taishan montre des durées de construction nettement réduites, donc des coûts certainement réduits en proportion. Une chose à signaler est que l'EPR est conçu pour un taux de disponibilité beaucoup plus élevé que pour celui des réacteurs actuels. Il y aura un retour bénéfique sur les coûts d'exploitation même si la part investissement est effectivement plus élevée. De plus, il est directement dimensionné pour une durée d'exploitation d'une soixantaine d'années.

Cela a aussi été dit tout à l'heure, l'offre génération III comprendra une gamme de réacteurs et pas uniquement des EPR, il y aura des réacteurs de moyenne puissance voire de faible puissance. L'enseignement que l'on en tire pour les filières futures est l'importance de la disponibilité du tissu industriel, l'infrastructure industrielle, dans le coût de construction des réacteurs.



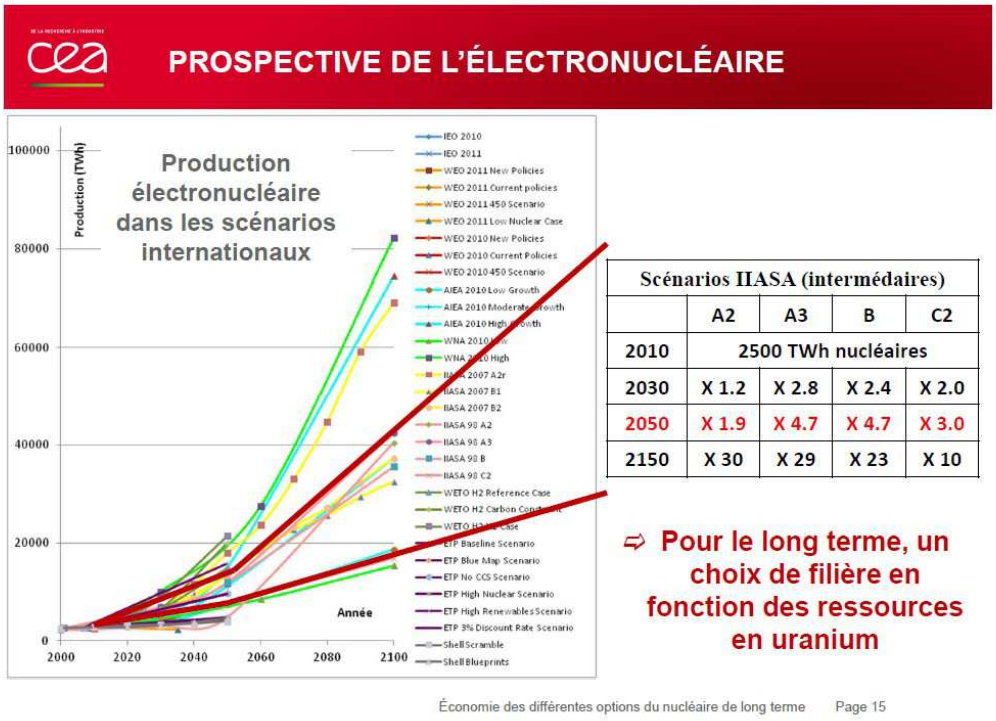
La structure du coût de production réacteurs de génération III montre une part investissement plus importante, 60 %. Nous estimons une fourchette qui est aux alentours de 60-75 € du mégawattheure, coût de production qui peut être jugé dans la zone de compétitivité par rapport au gaz et au charbon, en Europe et en Asie et sans tenir compte de l'effet d'un prix du CO_2 alors que ces deux énergies devraient normalement supporter cet effet carbone.



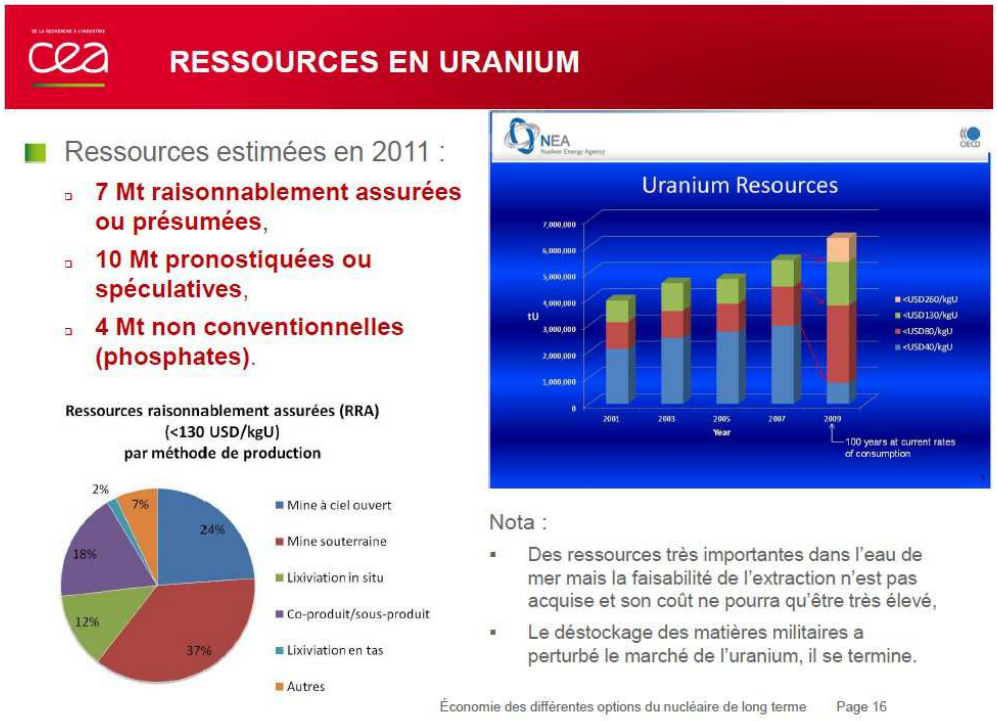
Le long terme : génération IV

La génération IV concerne le long terme.La première question à se poser est celle de la ressource en uranium. Aujourd'hui, il n'y a pas de problème, la consommation mondiale est à peu près de 65 000 tonnes d'uranium par an sur une réserve a prix modéré de 7 millions de tonnes, il y en a donc pour un siècle. J'oserais dire qu'il n'y a pas de question dans le cadre actuel. Par contre, si l'on suit les études internationales, notamment celles qui visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, le nucléaire est appelé à contribuer au mix électrique mondial dans une plus large mesure et, outre le fait qu'il a peu d'émissions, sa compétitivité économique est également reconnue. Ces arguments font qu'une augmentation de la production électronucléaire mondiale, je ne parle pas de la France mais à l'échelle mondiale, est tout à fait envisageable.

Un simple doublement de cette production électronucléaire ferait passer la durée de disponibilité de l'uranium à faible coût de cent ans à cinquante ans, ce qui est la durée prévue pour le fonctionnement d'un réacteur ; au moment d'un nouvel investissement, la réserve en uranium correspondrait tout juste à la durée d'exploitation.



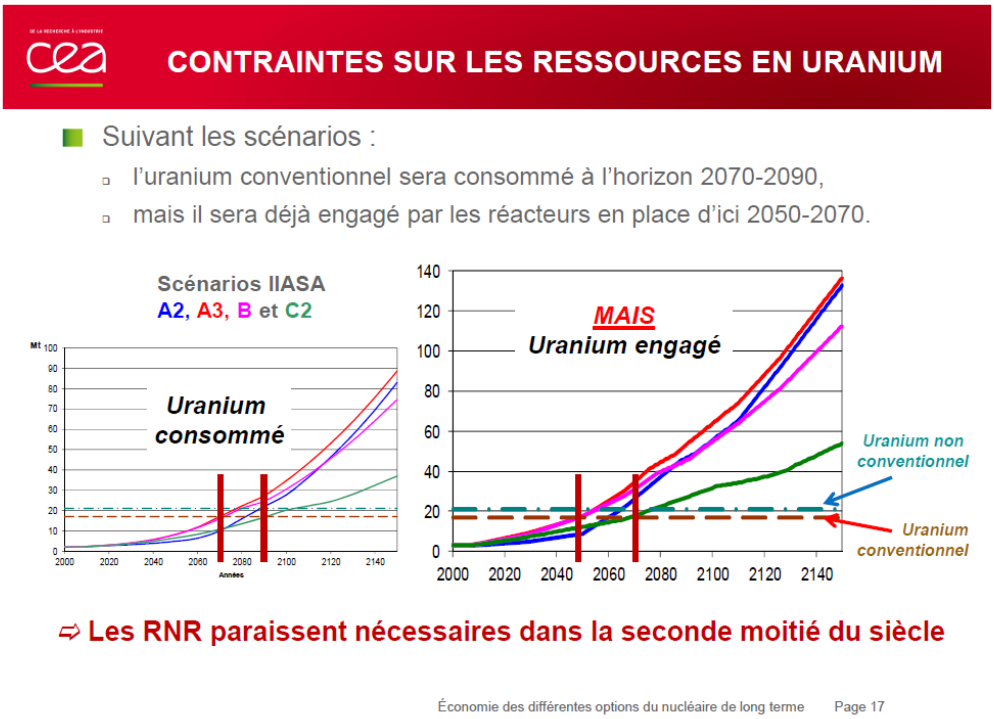
Si l'on creuse cette question de prospective de la production électronucléaire, vous avez sur ce graphique l'ensemble des scénarios d'études prospectives internationales sur la production électronucléaire. Nous avons retenu une tranche intermédiaire correspondant à des scénarios de l'IIASA qui est un institut d'analyse prospective autrichien. Cette fourchette met en évidence qu'à l'horizon 2050 un doublement est tout à fait possible, c'est même un scénario qui n'est pas très élevé, et qu'à l'horizon 2150 ce serait une multiplication par 10.



La question des ressources en uranium se pose donc de façon pertinente dès aujourd'hui. Les ressources sont estimées aux 7 millions de tonnes dont je viens de parler et qui sont dénommées « raisonnablement assurées » ou « réserves » suivant la terminologie utilisée ce matin au sujet du gaz.

La partie identifiée est, grosso modo, de 21 millions de tonnes, 7 millions de tonnes assurées, 10 millions de tonnes pronostiquées et 4 millions de tonnes non conventionnelles qui résulteront de l'exploitation des phosphates.

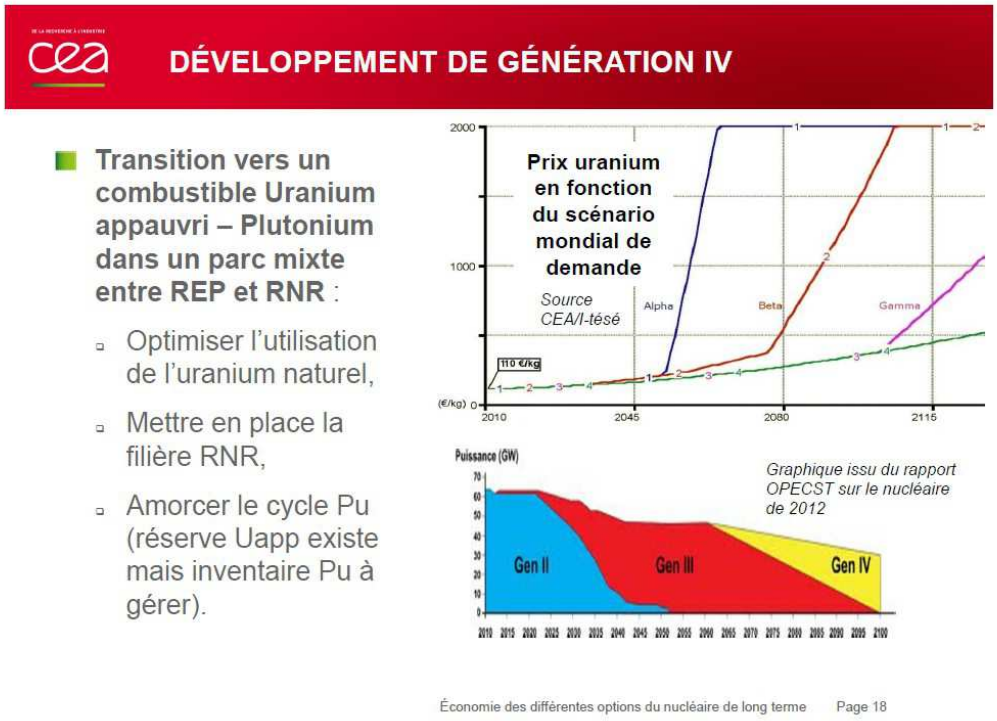
Je ne vais pas entrer dans le détail des autres diagrammes, en synthèse, ils montrent une disponibilité de l'uranium à faible coût qui diminue très rapidement.



Les ressources de 17 millions de tonnes conventionnelles et de 21 millions de tonnes au total sont reportées sur les diagrammes où sont repris les quatre scénarios électronucléaires identifiés comme médians. Les ressources seront consommées avant la fin du siècle, vers 2090, dans ces prévisions d'augmentation du parc mondial.

Mais un élément à intégrer dans les raisonnements est qu'entre 2050 et 2070 suivant les scénarios l'ensemble de la ressource sera déjà engagée par les réacteurs en fonctionnement à ce moment-là. La filière sera complètement bridée, les électriciens auront sécurisé leurs approvisionnements à cette échéance, sauf si d'autres réponses sont apportées en termes de filière nucléaire.

Les réacteurs à neutrons rapides, qui utilisent différemment l'uranium, sont nécessaires *a priori* dans la seconde moitié du siècle, pas forcément pour remplacer les réacteurs à eau pressurisée mais, au moins, faire un contrepoids à l'accroissement de la demande en uranium.



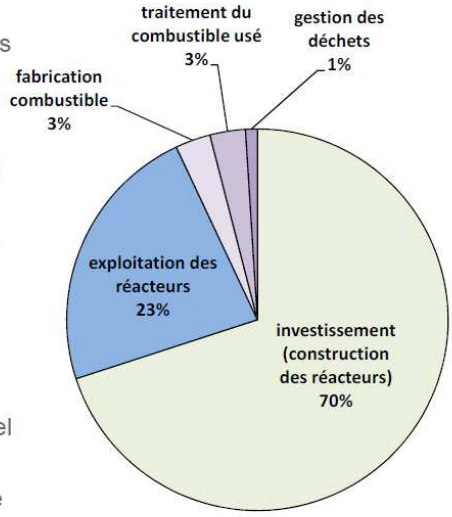
Sur le diagramme en haut à droite, vous avez les hypothèses d'évolution du prix de l'uranium en fonction des différents scénarios, la courbe dénommée béta est la plus plausible. Elle correspond aux scénarios médians et fait apparaître une forte tension sur le prix de l'uranium à partir de 2070.

La mise en place d'une filière prenant quelques décennies et pour un point de basculement aux alentours de 2070, le déploiement des RNR devrait commencer vers le milieu du siècle comme schématisé sur le diagramme qui suit et qui est extrait du rapport de l'OPECST de 2012 sur la filiale nucléaire.

Une phase de transition est nécessaire entre le cycle du combustible actuel à l'uranium enrichi et le cycle à l'uranium appauvri plus plutonium des RNR. Cette transition étant nécessaire pour, à la fois, optimiser l'utilisation de l'uranium naturel, c'est-à-dire gérer au cours du temps l'offre-demande sur l'uranium, mais également pour mettre en place toute la filière RNR. Comme nous l'avons vu au début de l'exposé, quelques décennies seront nécessaires pour mettre en place les moyens industriels de construction des réacteurs mais aussi toute l'industrie du cycle du combustible et obtenir également l'inventaire en plutonium suffisant pour amorcer la filière.

COÛT DE PRODUCTION DE LA GÉNÉRATION IV

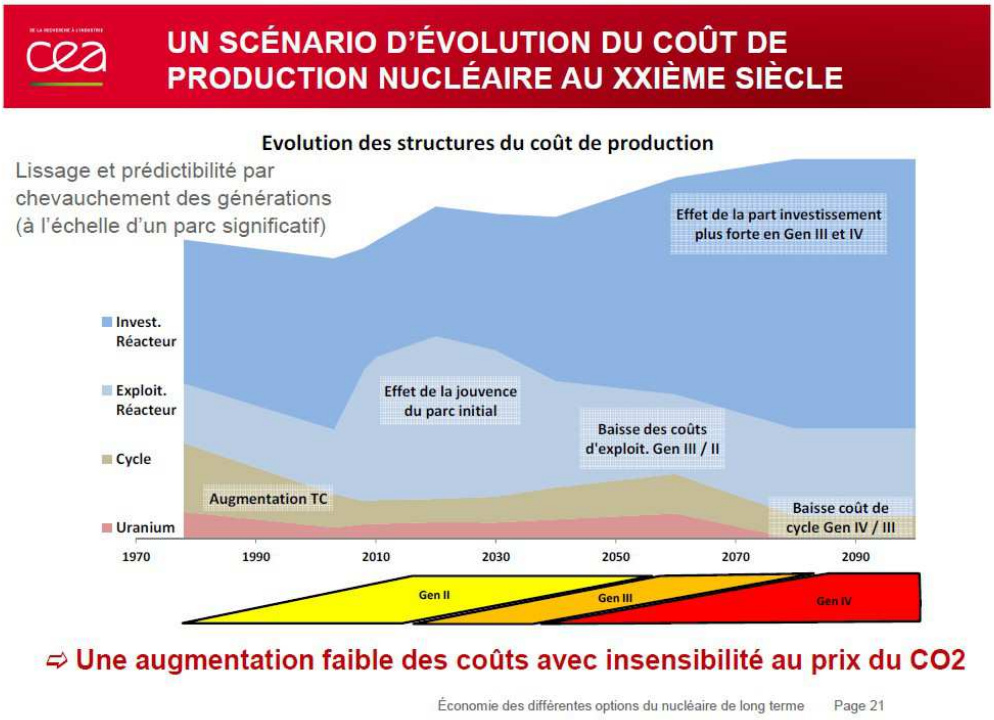
- Coût de construction des réacteurs :
  - Plus élevé (~30%) que les REL dans l'hypothèse du déploiement d'une filière industrielle,
  - Tissu industriel à constituer avec le démonstrateur technologique Astrid puis les prototypes et tête de série.
- Coût d'exploitation relativement stable
- Part cycle du combustible et gestion des déchets plus faible que les REL
- Compétitivité économique : date en fonction du prix de l'uranium
- Prédictibilité des coûts si tissu industriel national
- Potentielle position de leader française si marché international



Économie des différentes options du nucléaire de long terme Page 19

La structure du coût de production de ces réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides comporte une part investissement encore plus importante, 70 %. Par contre, la part exploitation, ici en bleu à 23 %, est en diminution. La compétitivité économique de ces réacteurs de quatrième génération est indépendante du prix de l'uranium.

Les avantages sont, principalement, d'aboutir à des coûts prévisibles, on s'affranchit de tout effet de marché de matière première et même des effets liés au tissu industriel s'il est national. Potentiellement, le développement de cette nouvelle filière peut également permettre d'acquérir une position de leader sur un marché international.

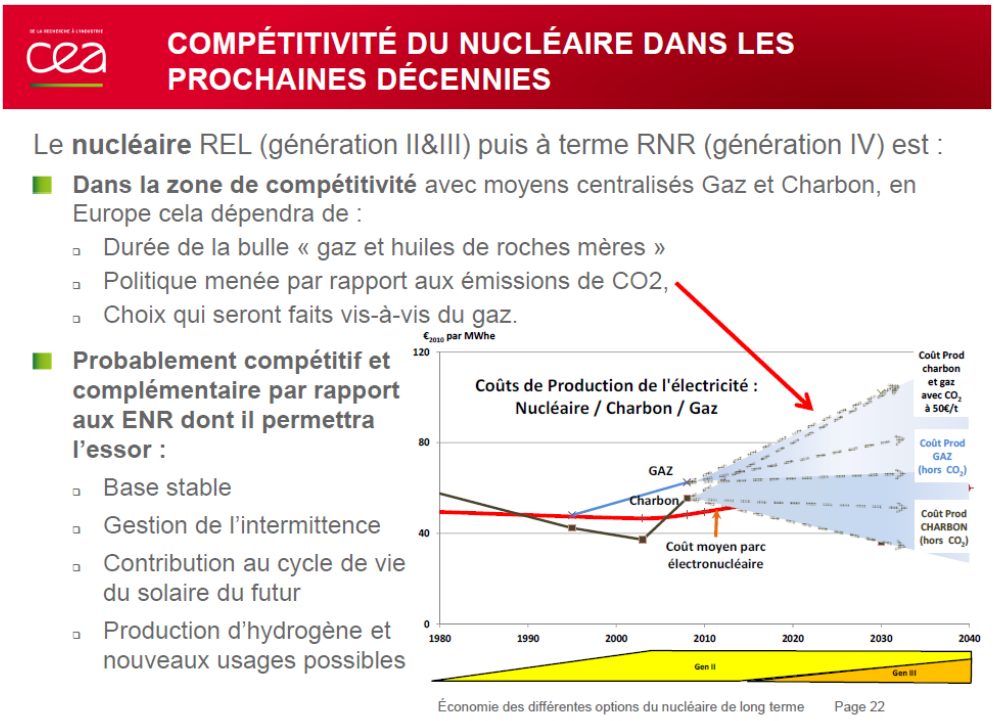


Conclusion

En conclusion, voici un graphique très sommaire qui montre ce que pourrait être l'évolution de la structure de coût de l'électronucléaire dans la cascade des générations II, III et IV.

Actuellement, nous sommes dans la partie où la génération II supporte des coûts de jouvence avec une augmentation notable des coûts d'exploitation. Après, il y aura une augmentation limitée du prix de l'uranium. La transition vers la génération III va conduire à une part des investissements plus importante et toujours une sensibilité au prix de l'uranium. Ensuite, le passage à la génération IV devrait conduire à une augmentation supplémentaire de la part d'investissement mais aussi à une stabilisation par l'arrêt de la sensibilité aux prix des matières premières et de l'uranium.

On passerait d'un système énergétique sujet aux tensions sur les ressources à un système énergétique complètement insensible aux effets des matières premières et non émetteur de CO_2.



Deux planches pour terminer très rapidement sur une comparaison à plus court terme, les prochaines décennies, entre les différentes énergies de base.

Pour le nucléaire, la projection montre une augmentation prévue du coût de production, elle est juste au-dessus des coûts projetés pour le charbon et inférieure au coût de production du gaz hors effet de prix du CO_2. On est dans la même zone de compétitivité et tout dépendra de la politique menée par rapport au CO_2. Si l'on prend une valeur de 50 € la tonne, vous voyez que le gaz et le charbon sont alors sur des courbes nettement plus élevées, ce qui renforce la compétitivité du nucléaire.

Un élément à signaler est que le nucléaire est également compétitif par rapport aux énergies renouvelables et surtout qu'il peut y avoir synergie entre énergies renouvelables et nucléaire.

CONCLUSION

- **Le nucléaire historique** :
  - Est un moyen de production très compétitif,
  - Tempère les effets des marchés sur la balance commerciale,
  - Présente des synergies avec le développement des EnR,
  - Prépare les prochaines générations dont le développement de la production électrique mondiale pourrait avoir besoin.
  - En sortir de façon « précipitée » serait onéreux et émetteur de CO2,
- **Les nucléaires du futur** (génération III puis IV) :
  - Se déclinent en un jeu ouvert de systèmes diversifiés
  - Prennent en compte le retour d'expérience, sûreté accrue,
  - Offrent des synergies vis-à-vis des autres énergies bas carbone,
  - Offrent des marges de manœuvre au système énergétique,
  - Présentent un coût de production prédictible.

⇨ **Maintenir les options ouvertes face à un avenir incertain**

⇨ **R&D pour être prêt à déployer des filières industrielles**

Économie des différentes options du nucléaire de long terme Page 23

En toute dernière conclusion, le nucléaire historique est très compétitif et tempère les effets des marchés sur la balance commerciale. Des synergies existent entre le nucléaire et les EnR. Une sortie de façon prématurée ou précipitée du nucléaire serait onéreuse et émettrice de CO_2.

L'évolution progressive du nucléaire vers la génération III puis la génération IV est envisageable dans des systèmes énergétiques diversifiés. La prise en compte du retour d'expérience international est systématique dans le nucléaire, la sûreté des réacteurs est en croissance constante. La synergie avec les énergies bas carbone est toujours vraie, et ces systèmes de génération III et de génération IV donnent des marges de manœuvre au système énergétique.

Il semble judicieux de maintenir toutes les options ouvertes face à un avenir incertain ainsi que de mener les actions de R&D nécessaires pour être prêts à déployer des filières industrielles.

Session 4 : « Énergies renouvelables, les conditions de réussite d'une utopie mobilisatrice »

Présentation de la session 4 : « Énergies renouvelables : les conditions de réussite d'une utopie mobilisatrice », par Béatrice Cointe, p. 242.

« Promesses de la biomasse et conditions d'une mobilisation durable », par Sylvie Alexandre, p. 245.

« Quelles limites à l'essor des énergies renouvelables ? », par Cédric Philibert, p. 267.

« Le coût de l'insertion d'ENR intermittentes à grande échelle dans les réseaux », par Jan Horst Keppler, p. 289.

« Les territoires éoliens : une analyse de la trajectoire de développement de l'éolien terrestre en France », par Alain Nadaï, p. 298.

Présentation de la session 4 : Énergies renouvelables, les conditions de réussite d’une utopie mobilisatrice

Par Béatrice Cointe.

Quelles que soient les sources d’énergies considérées, les réflexions sur la transition énergétique s’appuient généralement sur des projections et des déplacements de pensée vers ce qui pourrait être. Pourtant, seules les énergies renouvelables sont qualifiées d’utopies, comme si leurs promesses étaient trop idéales pour avoir une chance de se réaliser. Les présentations ont permis d’interroger ce statut utopique si souvent attribué aux énergies renouvelables. Paradoxalement, il en ressort une approche pragmatique et réaliste des énergies renouvelables, qui met en évidence la complexité que recouvre cette catégorie et s’attache à comprendre les problèmes suscités par leur développement et la façon dont ils sont abordés actuellement. Finalement, contrairement à ce que laisse entendre la notion d’utopie, les énergies renouvelables telles qu’abordées dans cette session sont loin d’être « sans lieu », puisque les enjeux qu’elles soulèvent ont trait à leur localisation et leur implantation dans des territoires, des réseaux et des marchés.

Le caractère territorialisé des énergies renouvelables, souligné par Pierre Charbonnier, qui les a qualifiées « d’énergies visibles » lors de la session précédente, comme par Sylvie Alexandre, qui souligne qu’elles viennent se poser sur des territoires et ont des conséquences sur leur vie, se traduit par une diversité des approches utilisées dans les différentes présentations. Deux des interventions abordent les énergies renouvelables dans leur ensemble ; les deux autres se penchent au contraire sur les spécificités du développement de deux d’entre elles en France : la biomasse et l’éolien terrestre.

L’intervention de Cédric Philibert est certainement celle qui se rapproche le plus d’une « utopie mobilisatrice ». À partir de scénarios de l’Agence internationale de l’énergie, elle expose les possibilités offertes par le développement potentiel des énergies renouvelables à court, moyen et long terme. En particulier, l’un des exercices de prospectives présenté vise à tester les limites du développement des renouvelables à l’horizon 2050, dessinant les contours d’un futur aux émissions de CO_2 divisées par dix. Si les scénarios présentés tendent à montrer que la part des énergies renouvelables dans la production électrique pourrait rejoindre celle du charbon d’ici à 2035 et qu’une transformation profonde du mix électrique est possible à l’horizon 2050 sous l’hypothèse de politiques climatiques fortes, un des intérêts majeurs de la présentation est de les mettre en regard avec les évolutions récentes et à court terme. Cédric Philibert souligne ainsi que

la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité a doublé au cours des cinq dernières années, leur développement s'étant répandu de l'Europe et des États-Unis au reste du monde, et devrait de nouveau doubler dans les cinq prochaines années.

La présentation de Jan Horst Keppler visait, comme il l'a précisé en introduction, « à rappeler les utopistes à l'ordre » en examinant les conséquences sur les marchés de l'injection de quantités croissantes d'électricité d'origine ENR renouvelables par des équipements entrés hors marché dans les systèmes électriques. Cette intervention attire l'attention sur les coûts de systèmes générés par le développement des énergies renouvelables, du fait des surcoûts de renforcement des réseaux, des coûts d'équilibrage à court terme et du paiement de capacités de réserve pour garantir la sécurité d'approvisionnement. Elle resitue donc l'électricité ENR dans la complexité des marchés électriques européens où elles viennent s'insérer, mettant en relief les liens entre les énergies renouvelables et les autres composants du système d'approvisionnement en électricité. Ainsi, à court terme, le développement de l'électricité renouvelable a, dans les scénarios présentés, un impact sur le prix des marchés horaires et les facteurs de charge des autres énergies en les limitant et en conduisant les équipements récents à une bien moindre rentabilité ; à long terme, il entraîne un besoin de réinvestissement dans des capacités de back-up. Le développement des énergies renouvelables entraîne également une déconnexion croissante entre prix de gros de l'électricité et coûts privés de production, ainsi qu'une divergence des marchés électriques qui remet en cause leur intégration récente. Jan Horst Keppler a donc rappelé qu'au-delà des potentiels théoriques des énergies renouvelables il faut prendre en compte dans toute sa complexité leurs effets dans un système dont elles peuvent déstabiliser l'équilibre technique, et donc d'internaliser les coûts de système.

Les deux autres présentations ont également mis en lumière la complexité du développement des renouvelables et la nécessité de prendre en compte les systèmes dans lesquels elles viennent s'insérer. En particulier, elles montraient la non-évidence des ressources renouvelables et le caractère souvent controversé de leur développement.

Sylvie Alexandre a présenté un panorama des controverses liées à la biomasse en France, qu'il s'agisse du bois-énergie ou des biocarburants. Elle ne s'intéresse pas à la place de la biomasse dans la transition énergétique, mais aux controverses qui structurent l'usage de la ressource en France, soulignant la nécessité de prendre en compte la biomasse dans la diversité de ses usages et la complexité des systèmes qui les mobilise. La biomasse semble susciter des controverses particulièrement virulentes que l'on ne peut comprendre que si l'on s'intéresse à la grande diversité d'enjeux qui se nouent derrière : stratégies régionales, stratégies d'acteurs, perception des espaces ruraux, croisement d'échelles… La quantification de la ressource, sa disponibilité et sa neutralité carbone sont également loin d'être stabilisées. Non seulement de nombreuses incertitudes

persistent, mais les règles de comptabilité du carbone ne permettent pas en l'état de prendre en compte de façon satisfaisante l'utilisation de la biomasse et les changements d'usages des sols. Les confits potentiels d'usage (terres cultivables, bois) obligent à prendre en compte les chaînes économiques liées à la biomasse dans leur ensemble.

L'intervention d'Alain Nadaï a elle aussi mis en évidence le caractère controversé et complexe des potentiels de ressources renouvelables. En retraçant l'évolution des politiques éoliennes françaises, depuis 2000, il montre à quel point le mode de développement et la mise en politique de l'éolien, mais aussi les ressources disponibles sont modelés par la réglementation. La territorialisation de l'éolien apparaît ainsi particulièrement problématique, car la réglementation et le mode de gestion des paysages font évoluer les territoires disponibles et les autorités compétentes pour administrer et réglementer l'éolien. À cela s'ajoute le rôle structurant des tarifs d'achat, qui favorise un portage privé des projets qui réduit finalement l'intéressement des acteurs à l'éolien à des enjeux économiques. Il en résulte un mode de développement à la fois régionalisé et libéralisé qui amène l'éolien à se poser sur des territoires et rend plus difficile de le rattacher à des institutions collectives locales. En présentant brièvement les résultats d'une série d'études de terrain et du retour sur ces terrains, Alain Nadaï a également fait ressortir la complexité des enjeux que croisent les projets éoliens et la diversité des configurations qui se sont développées.

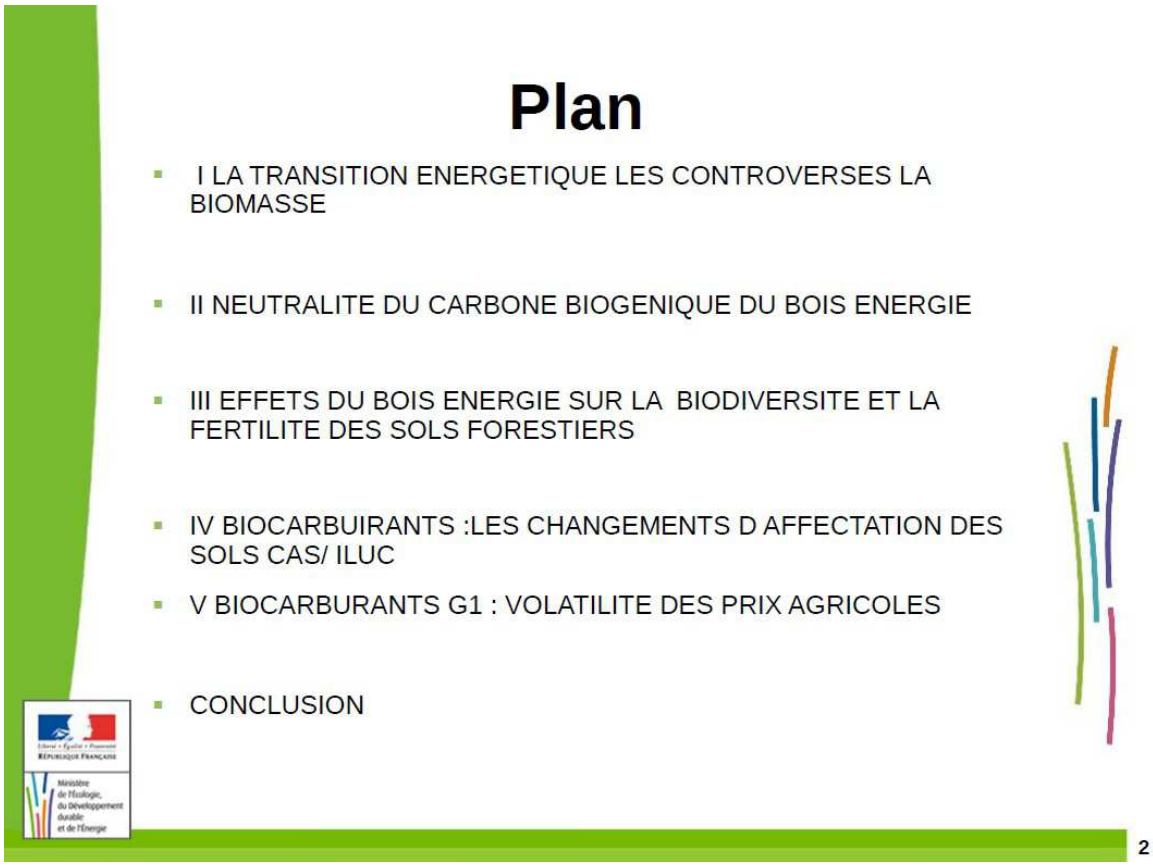
Cette session, en réunissant quatre perspectives très différentes sur les énergies renouvelables, a ainsi permis de dépasser la seule perspective « utopique » en donnant des exemples des effets qu'ont les énergies renouvelables lorsqu'elles s'implantent sur un territoire ou un marché. Les énergies renouvelables, parce qu'elles croisent des catégories et des enjeux de façon inédite, prennent finalement les acteurs à front renversé et sont plus compliquées à saisir qu'il n'y paraît.

Sylvie Alexandre : Promesses de la biomasse et conditions d'une mobilisation durable

Sylvie Alexandre est ingénieure général des Ponts, des Eaux et des Forêts.

Sylvie Alexandre : Je ne suis pas scientifique, je suis une modeste ingénieure. J'ai eu quelques responsabilités dans l'administration qui m'ont amenée à m'intéresser à la biomasse et pas seulement aux aspects énergétiques de la biomasse d'ailleurs, puisque j'étais à la direction des Forêts entre 2005 et 2008.

Et puis j'ai coordonné une mission interministérielle sur les valorisations non alimentaires de la biomasse en 2012 et je suppose que c'est pour cela que je suis là aujourd'hui.

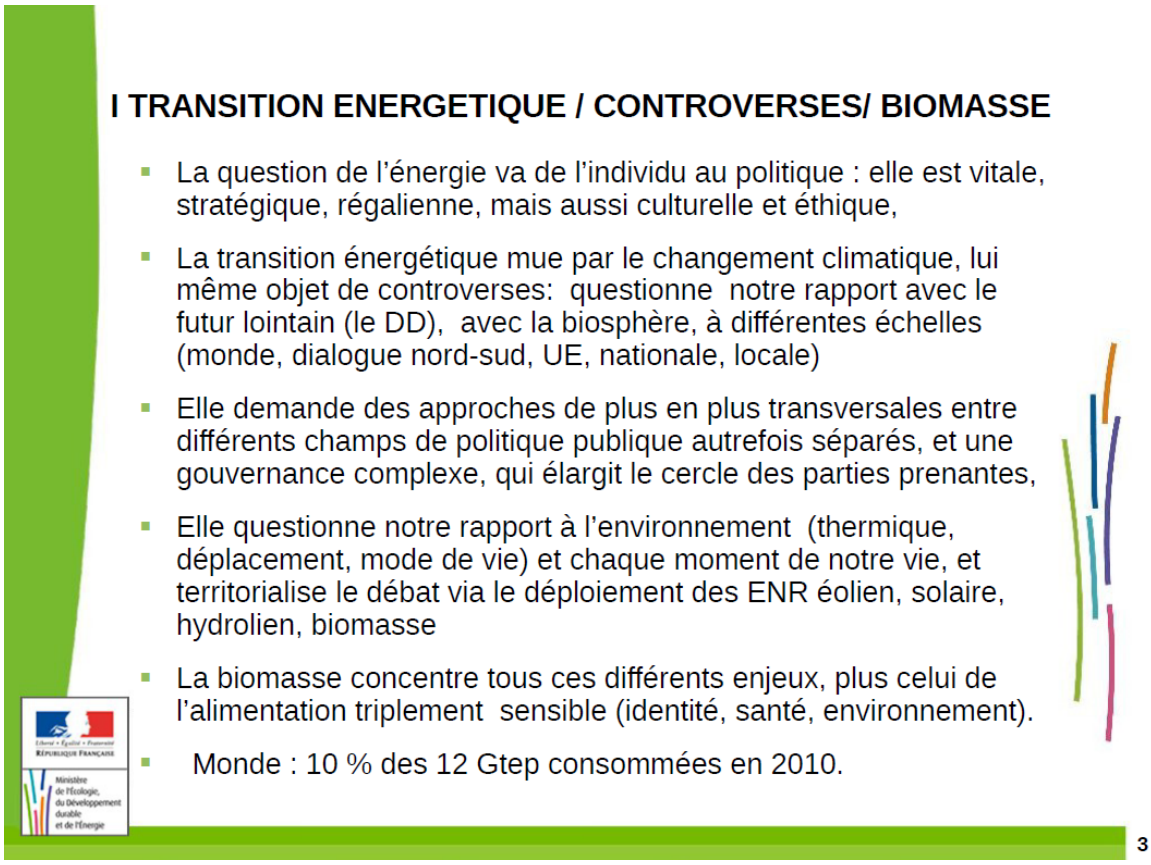


Avant de commencer mon propos, je voudrais dire plusieurs choses. La première est que j'ai centré ma présentation sur les principales controverses sur les usages énergétiques de la biomasse. Je ne parlerai pas de la place de la biomasse dans la transition énergétique qui fait l'objet d'un certain nombre de scénarios, plus ou moins ambitieux, mais qu'on peut fixer en ordre de grandeur. D'après les travaux du groupe d'experts entre +17 millions de tep et 40 millions de tep entre 2010 et 2050. Il faut dire que +40 millions de tep, c'est beaucoup.

Et puis je voudrais faire une autre observation préliminaire, c'est par rapport aux 4° C : j'invite les personnes qui ne connaissent pas forcément bien l'agriculture et la forêt à regarder sur Internet les résultats d'un exercice de prospective qui a été fait par l'Inra en 2009 et qui s'appelle « Climator », car, je pense, qu'avant de se résoudre gaillardement à accepter l'idée qu'un scénario à 4° C est un scénario acceptable, il faut faire l'effort de regarder ce qu'est la projection de Climator. Et peut-être allons-nous tous se dire, comme la personne qui est intervenu juste avant, qu'il faut finalement faire tous ces efforts pour limiter à 2° C la hausse des températures moyennes terrestres. Mais c'est une prise de position tout à fait personnelle.

D'abord, je vais vous parler des facteurs qui expliquent finalement une certaine virulence des controverses sur l'usage énergétique de la biomasse. Je passe très rapidement, parce qu'il y a des choses qui ont été dites depuis ce matin sur les controverses d'ordre, sur les énergies. Et ensuite je parlerai de deux controverses sur le bois-énergie

principalement et puis de deux sur les biocarburants. Puis j'essaierai de tirer quelques conclusions de tout ça, sachant que je ne suis pas là pour préconiser tel type de scénario ou tel autre, mais pour éclairer peut-être à travers ma modeste expérience des secteurs agricole et forestier.



Des controverses, il y en a évidemment sur l'énergie parce que l'énergie ça nous ramène à des questions qui sont à la fois planétaires et individuelles, qui sont notre futur lointain, notre rapport avec la biosphère et puis avec, finalement, une prise de décision politique qui devient de plus en plus complexe avec des approches de plus en plus transversales. C'est un peu ce qui a été dit tout à l'heure par le philosophe qui est intervenu. On a donc un nouveau mode de raisonnement de l'énergie, qui territorialise beaucoup plus le débat à travers le déploiement des énergies renouvelables, qui sont toutes beaucoup plus territoriales. Il a parlé de visibilité et d'invisibilité. Je parlerais plutôt de territorialisation. Les énergies renouvelables, ce sont des énergies qui se posent sur les territoires, qu'on voit effectivement et qui vont avoir des conséquences sur la vie de ce territoire.

Et la biomasse concentre tous ces enjeux, et en plus celui de l'alimentaire qui est sensible à un triple titre. D'abord parce que c'est l'enjeu de l'identité, je suis ce que je mange. L'enjeu de la santé (« Est-ce que ce que je mange est bon pour ma santé ? » Et « est-ce que ce que je mange, c'est produit d'une manière respectueuse de l'environnement ? »). Donc beaucoup de sujets, de questions, de plus en plus sensibles et de plus en plus complexes, sachant qu'en France on a peut-être une approche un peu sacralisée de l'alimentation. Ce qui n'est pas forcément le cas dans tous les pays. Il y a un côté culturel important.

La biomasse aujourd'hui c'est à peu près 10 % de la consommation des énergies finales du monde. Et selon les scénarios mondiaux, on trouve à peu près tout et n'importe quoi sur la place de la biomasse dans le futur. Pour revenir au scénario de l'AIE, en général, ce qu'on peut constater c'est que le recours à la biomasse est d’autant plus important que les scénarios sont plus ambitieux.

I TRANSITION ENERGETIQUE/ CONTROVERSES/ BIOMASSE

- La virulence spécifique (explosion des études financées) des controverses sur **certains** usages énergétiques de la biomasse: des moteurs sous jacents ? Biocarburants et BE davantage controversés que méthanisation de cultures dédiées: pourquoi? quelles représentations culturelles ?quelles stratégies ?
- Grandes régions du monde (Amérique, Asie) à la conquête des marchés internationaux de MP, alimentaires et énergétiques (avantages comparatifs et mondialisation des échanges),
- Lobbies (forestiers, agricoles, alimentaires, énergétiques, industriels, ONG),
- Perception F de plus en plus urbaine des espaces faiblement anthropisés (agriculture, et surtout forêt) comme espaces naturels immuables, ignorant l'histoire de leur gestion par l'homme (ex de certaines zones N 2000) ; sacralisation de l'alimentation (# RFA)
- Un amalgame entre problématiques nationales, européennes et mondiales (ex : forêt coupe = défrichement = émission de GES pour convention climat, ex : faim dans le monde et usages énergétiques de la biomasse agricole sur des jachères)

4

Ce qui signifie, me semble-t-il, que c'est un peu la variable d'ajustement d'un certain nombre de raisonnements. Et ce n'est pas inutile de le savoir.

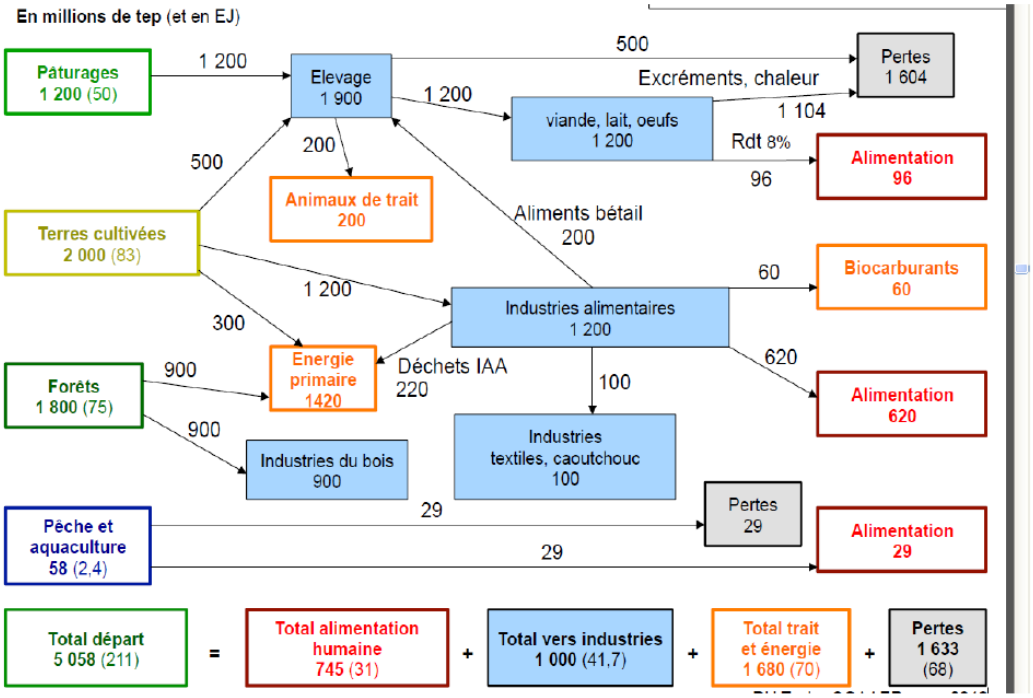
Qu'est-ce qui explique donc et comment s'explique cette virulence spécifique de certaines controverses sur certains usages seulement ? On voyait ce matin l'explosion des études financières sur certaines controverses, et là c'est exactement pareil, par exemple, sur les biocarburants. Depuis 2005, il y a eu une explosion des études sur les controverses nées de l'utilisation des biocarburants. Les biocarburants et le bois-énergie sont davantage controversés que la méthanisation, qui se fait en Allemagne à grande échelle sur des cultures de maïs dédiées. Il y a plus de 800 000 à 1 million d'hectares de culture de maïs. Personne ou très peu de personnes en Allemagne contestent cette stratégie. Elle est inapplicable en France. Elle offre l'équivalent d'un « troisième pilier » commode de la PAC aux agriculteurs allemands.

Qu'est-ce qu'il y a derrière toutes ces controverses ? Est-ce qu'il y a des stratégies à l'œuvre ? Est-ce qu' il y a des représentations culturelles ? Certainement. D'abord il y a des stratégies de grandes régions du monde. Ça, ce n'est pas nouveau, sur tous les marchés de matières premières, il y a des stratégies de groupes d'acteurs, qu'on peut appeler lobbies, ou des stratégies d'influence qui sont nombreuses.

J'ai limité mon propos écrit, mais je pense qu'on peut aussi mettre dans les groupes d'acteurs qui interfèrent avec ces controverses les distributeurs quels qu'ils soient, distributeurs de carburant ou bien distributeurs d'alimentation et puis les consommateurs bien évidemment. On a aussi un facteur culturel, c’est une perception (en France, mais probablement dans l'ensemble des pays développés) de plus en plus urbaine, des espaces faiblement anthropisés, l'agriculture et surtout la forêt qui sont des espaces de permanence, des espaces où rien ne doit se passer, des espaces où finalement on ignore que, il y a cinquante ans, le visage de ces espaces étaient considérablement différent de ce qu'il est aujourd'hui.

Enfin dernière caractéristique de la biomasse, on a souvent tendance à faire l'amalgame entre des problématiques qui ne sont pas forcément vraies à toutes les échelles. La question forestière en France est différente de la question forestière en Europe et elle est extrêmement différente de la question forestière dans le monde. Voici un exemple, de la même manière, l'amalgame qui est fait avec la concurrence alimentaire avec un lien de cause à effet direct, de la culture de biocarburant ou des cultures non alimentaires sur des jachères montrent que, on franchit des étapes très aisément en établissant des liens de cause à effet dans des faits qui sont entre eux enchaînés de manière beaucoup plus complexe.

Ressources et usages au plan mondial
Où va la biomasse récoltée?



Pour essayer de fixer un tout petit peu les ordres de grandeur, voici un tableau qui n'a pas d'autre prétention que d'être un ordre de grandeur. Dans notre rapport publié en 2012, nous avions expliqué que la biomasse qui est présente à la surface du globe chaque année, qui est produite, équivaut à 80 gigatep. Et sur ces 80 gigatep, on en récolte 5. Et sur ces 5 gigatep, voici ce qui se passe en matière de résultat final, c'est la ligne du bas.

Donc vous avez dans le tableau en haut à gauche, en vert, les sources de la biomasse récoltée. Dans la partie médiane du tableau, vous avez en bleu les process de transformation et puis en orange ce qui va à l'énergie, soit les énergies des animaux de trait qui participent à l'agriculture, soit l'énergie primaire sous forme de chaleur essentiellement pour le chauffage et la cuisson dans les PVD, et puis à droite vous avez des débouchés.

Je ne passerai pas trop de temps à commenter ce tableau. Simplement, je m'arrêterai sur un point : les animaux de trait représentent plus de 400 millions de têtes dans le monde qui servent à l'agriculture des pays en développement, et ils consomment l'équivalent de 200 millions d'hectares de produits agricoles, soit 15 % des superficies cultivées, ceci est à mettre en relation avec les biocarburants qui sont à droite et qui concernent à peu près 40 millions d'hectares. Ces ordres de grandeur ne sont pas très souvent cités.

I TRANSITION ENERGETIQUE/CONTROVERSES/BIOMASSE

- Em. anthropiques GES comptabilisées **en flux simplifiés** dans les inventaires annuels :
- **activités** des différents secteurs de l'économie : énergie, industrie, agriculture
- **UTCF affectation et gestion sols agricoles et forestiers**: immenses réservoirs de carbone, qui peuvent fonctionner comme "puits" lorsqu'ils absorbent plus de GES qu'ils n'en émettent (boisement ou reboisement d'un sol nu), ou comme "source" en situation inverse (déboisement, retournement des prairies en cultures). **Image très simplifiée ...**
- **le bilan annuel "puits/source" est étroitement dépendant de la période de référence étudiée** (ex : prairie retournée une fois en 20 ans : bilan annuel = 100 % du CO2 émis l'année de son retournement, mais 5 % du CO2 émis/an de la période. Une périodicité courte comme celle des engagements KYOTO (5 ou 8 ans) est encore plus déformante pour les cycles forestiers plus longs (40 à 250ans).
- **et de la gestion forestière (boréale/ tempérée/ tropicale)**: un peuplement jeune continue de croître et d'absorber du carbone, un peuplement âgé absorbe de – en **-** , jusqu'à devenir émetteur net. Une forêt tempérée où l'équilibre des âges est atteint, a une pérennité assurée dans le temps et un bilan carbone proche de zéro = maintien du stock sur pied LT. Rotation du stock calée sur âge des produits finaux de la sylviculture.
- **forêts mondiales** : 80% de la biomasse aérienne, 50% de la photosynthèse, puits net annuel **4,3 Gt éq. CO2 = puits** (19% des émissions **10 Gtéq CO2**) – **source (**Déforestation drainage 11% des émissions 5,7 Gt éq CO2).
- **UE :** selon étude réçente (Nabuurs et al..2013) forêts proches de la saturation du puits (viellissement, défrichements etc..) contrastes avec JRC.

6

La question des controverses est fortement liée à la manière dont est appréhendé le cycle du carbone dans les modélisations climatiques. Et le moins qu'on puisse dire, c’est que le cycle du carbone n'est pas très bien approché, à la fois par les modélisations climatiques et par les règles de comptabilisation des émissions qui sont issues de la convention climat et qui, qu’on le veuille ou non, sont directrices des politiques publiques sur l'énergie.

Les émissions, vous le savez, sont comptabilisées en flux simplifiés dans des inventaires annuels. Tous les ans en France, le Citepa fait un inventaire des émissions de la France. Il dresse le bilan des émissions des activités : énergie, industrie, agriculture et le bilan de ce qu'on appelle l'UTCF, l'Utilisation des terres, leur changement et la forêt.

Or les terres sont d’immenses réservoirs de carbone qui peuvent fonctionner soit en source, soit en puits selon qu'on fixe par photosynthèse plus de carbone qu'on en libère par un certain nombre d'autres actions. Et arriver à simplifier ce bilan est extrêmement complexe. La comptabilité offre donc une image extrêmement simplifiée, jusqu’à être distorsive.

Pourquoi distorsive ? J'en donne deux exemples. Parce que le bilan annuel est étroitement dépendant de la période de référence : si vous calculez les bilans du retournement d'une prairie sur vingt ans ou sur l'année où vous l’avez retournée, vous n'avez évidemment pas le même bilan annuel. Et puis les cycles forestiers, par exemple, sont des cycles de production longs, quarante, cinquante, soixante, deux cent

cinquante ans sur les cycles les plus longs, en métropole en tout cas. Il est évident qu’une période de cinq à huit ans ne peut pas représenter une gestion forestière durable et l'ensemble des effets qu'elle a sur le cycle du carbone. Enfin la gestion forestière durable ou le maintien du stock de carbone sont extrêmement dépendants de la nature même des forêts. Et sans doute que la forêt boréale, la forêt tempérée, la forêt tropicale ne présentent pas les mêmes conditions de gestion forestière durable. Je passe rapidement sur les autres considérations parce que je voudrais arriver aux controverses.

I LA TRANSITION ENERGETIQUE ET LES CONTROVERSES

- BOIS ENERGIE : LA NEUTRALITE DU CARBONE BIOGENIQUE
- BOIS ENERGIE:EFFETS SUR LA BIODIVERSITE ET LA FERTILITE DES SOLS FORESTIERS
- BIOCARBURANTS G1 : LES CHANGEMENTS D' AFFECTATION DES SOLS CAS/ILUC
- BIOCARBURANTS G1 : EFFETS SUR LA VOLATILITE DES PRIX AGRICOLES

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

7

II BE ET NEUTRALITE CARBONE

- Règles de comptage Convention Climat et PK : biomasse = 100 % des émissions GES à la récolte, donc pas de double comptage lors de la combustion de biomasse = Zéro émission; base des politiques énergie biomasse renouvelable qui privilégient la substitution d'énergie à celle de matériau recyclable puis brûlable ;
- Puits de C forestier dans UTCF: coupe = émission nette, la « gestion durable » (renouvellement du stock dans le LT) et la temporalité (bilan différent pour bois de 20, 50, 100 ans) maîtrisées ni scientifiquement, ni politiquement (périodes de 5 à 7 ans, différences entre régions du monde) or la neutralité C dépend du renouvellement.
- F : Rapport LETURCQ (mars 2011) conteste cette approche simplificatrice: bois faible PCI, fortement émetteur, garder le bois en forêt ou l'exporter sous forme de matériau qui séquestre plus durablement et se substitue à matériaux énergivores.
- **Usage en cascade est en effet plus intéressant (Suède, Suisse) : matériau/recyclage/énergie. Insuffisances de modélisation en France. PP= déséquilibre en faveur du BE.**

8

La neutralité carbone du bois-énergie, les effets sur la biodiversité et, pour les biocarburants, le changement d'affectation des sols et puis les effets sur la volatilité des prix sont les principaux sujets.

Pour la neutralité carbone du bois-énergie, c'est compris dans ce que je vous ai dit tout à l'heure. On a des règles qui sont très simplifiées. Du coup, il y a un certain nombre de personnes en France mais dans le monde aussi qui la contestent. J'ai cité le rapport de M. Leturcq parce que je pense que c'est celui qui fait état du raisonnement qui va le plus loin. Il conteste la neutralité carbone du bois-énergie en disant que le bois a un faible PCI – ce qui est vrai –, que c'est fortement émetteur de gaz carbonique quand ça brûle – c'est tout à fait vrai – et qu'il vaut beaucoup mieux garder le bois en forêt ou l'exporter sous forme de matériaux. Parce que ce sont des modalités beaucoup plus intéressantes que de le substituer à de l'énergie fossile. Il a partiellement raison. C'est vrai qu'un usage en cascade avec un effet d'optimisation sur l'ensemble du système bois-matériaux, recyclage, puis énergies serait bien meilleur à long terme que la simple substitution du fossile par de l'énergie-bois. Le problème c'est, comme on vient de le dire, qu'on n'est pas capable de rendre compte de cet intérêt et on manque certainement de modélisation.

En tout cas, il y a des déséquilibres des politiques publiques en faveur du bois-énergie par rapport aux autres usages que pourraient avoir la forêt et le bois.

II BOIS ENERGIE ET NEUTRALITE CARBONE

- D'où discussion de **critères de durabilité des biocombustibles** dans la Directive2009/28/CE (ACV) et de révision des méthodes de comptabilisation qui garantiraient la neutralité carbone...Or les méthodes de comptabilisation « empreinte carbone » ne sont toujours pas harmonisées, différences selon le niveau de simplification de la réalité complexe, la question posée, le projet (MDP du PK= plusieurs dizaines de méthodos) :
- neutralité carbone biogénique : âge, origine, cycle de production et de valorisation nécessite de prendre en compte le temps long (?)
- stockage dans les produits, stockage dans les sols, éventuel CAS, émissions évitées déduites ou non
- A ce stade, les bilans GES Grenelle et collectivités (art 75 loi Grenelle II) n'évaluent pas les puits faute de méthodologie
- La règle de neutralité C reste appliquée par défaut dans les projets énergétiques. Développement volontaire de méthodes professionnelles de bilans énergétiques (cf. travaux CIBE)
- **Accroître l'offre de bois/ complémentarité BO/BI/BE pour optimiser l'effet carbone du « système forêt bois » pas considérée : manque d'outils de modélisation**

9

D'où l'introduction demandée de critères de durabilité, c'est là que ça commence à devenir compliqué dans la directive « énergies renouvelable » parce que les méthodes de comptabilisation ne sont pas harmonisées. Les résultats dépendent des hypothèses qui sont prises.

Résultat, la neutralité du carbone biogénique, grosso modo, cela dépend de la manière dont il est renouvelé, juste avant ou juste après la coupe et cela dépend d'un certain nombre de facteurs. Comme on n'est pas capable à ce stade de travailler de façon systématique là-dessus. Les bilans Grenelle ne comptabilisent pas, n'évaluent pas les puits de carbone, et la règle de neutralité carbone de l'énergie contenue dans le bois est appliquée faute de mieux, par défaut, car c'est la seule sur laquelle s'accorde le Giec. Les émissions sont comptées lors de la coupe et sont donc nulles lors de l'utilisation énergétique.

III BOIS ENERGIE/ BIODIVERSITE/ FERTILITE DES SOLS FORESTIERS

- Contestations ONG internationales post PK sur centrales électriques biomasse dénoncent l'artificialisation des forêts et effets biodiversité et sols des rotations rapides de résineux ou des TCR
- F: grande vigilance ex avis FNE : « intégrer dans les plans d'approvisionnement des installations l'évaluation et la prise en compte des impacts écologiques des prélèvements de bois et des activités induites »
- Ressource : taux de récolte environ 50 % de la production annuelle ; forte augmentation du stock (**+650 Mm3** depuis 1990), grande variabilité annuelle (canicule de 2003), produits non valorisés par gestion courante : fraction non exportée (rémanents) et forêt peu ou pas gérée, coupures incendies, zones d' enfrichement,
- Manque de résultats de recherche et d'outils opérationnels à ce jour, études BE et biodiversité.
- **Limiter les risques : cahier rémanents ADEME, protéger ZH, cloisonner pour prévenir tassement, éviter le bruit, assurer le retour de minéraux (cendres?)**

10

En revanche, la filière énergie renouvelable, bois-énergie s'en préoccupe. Il y a des travaux du comité interprofessionnel du bois-énergie, de l'Ademe, qui se préoccupent de façon appliquée aux différents circuits logistiques, de développer des méthodes de bilan énergétique qui permettent de rassurer sur la durabilité et sur la neutralité carbone.

L'autre controverse importante c'est la controverse sur la biodiversité et la fertilité des sols forestiers. En France, on a un taux de récolte annuel d'à peu près 50 % de ce qui pousse en forêt chaque année. Donc la forêt française est largement sous-exploitée. La contestation ne se porte pas sur le niveau potentiel de la ressource qui est, semble-t-il, suffisant par rapport aux projections qui sont faites. Mais elle se porte beaucoup plus sur les itinéraires de production et sur les process qui permettent d'éviter un certain nombre de désagréments, parce que les conditions sont extrêmement différentes d'un massif forestier à l'autre et que ce qui peut être tout à fait tolérable pour un milieu en termes d'exportation de matières organiques et minérales peut ne pas l'être dans un milieu voisin qui sera plus fragile. Donc le problème de cette controverse, c'est qu'en réalité la science est pour le moment dans l'incapacité de fournir les outils d'aides à la décision publique. Et on est obligé d'avoir une approche de limitation des risques et c'est ce qui se fait, je crois, assez bien.

IV BIOCARBURANTS CHANGEMENTS D' AFFECTATION DES SOLS CAS

- **Politiques de soutien sécurité énergétique puis GES** : 70' Brésil+ 2000' USA (Am = 77 % de la prod. mond.) maj. éthanol/essence; 2003 UE (= 19 % de la p.m.) maj. biodiesel., obligation d'incorporation, bilans GES
- **Effets UE** : 25,5Mtéq CO2 évitées, 220.000 emplois, 4,5 % (7 % en F)
- **Contestations ONG**, explosion des études depuis 5 ans : le CAS d et ind annulerait le gain d'émissions/ fossiles, voire émettrait plus ; en particulier conversion de tourbières et déforestation Indonésie/ Malaisie (huiles).
- **UE** demande d'un facteur CASi règles de calcul ACV des biocarburants
- **Doutes nombreux sur nature et ampleur du CAS:**
- définitions: CAS d conversion de terres, CAS i conversions *« qui n'auraient pas lieu sans développement des biocarburants »*; or les déterminants des équilibres économiques sont très nombreux,

Impossible d'isoler les effets indirects: modèles très imparfaits à retracer la complexité des interrelations ; jeux d' hypothèses...

On pourra y revenir si vous avez des questions mais c'est une approche préventive et pas du tout un approche raisonnée sur des résultats scientifiques.

Sur les biocarburants, le « changement des affectations des sols » ou CAS, c'est évidemment le cas emblématique. J'ai donné les chiffres de la répartition mondiale de la production de biocarburants pour l’essence et le diesel, entre l'Amérique et l’UE en gros. Puisque, à ce stade, ce sont quand même les deux grands bassins de production. La contestation des études et des ONG conclut que c’est par les politiques de soutien aux biocarburants qu’on est arrivé à l’époque de 2005 à 2006 à une période de forte instabilité des prix et de renversements des conditions de marché des matières agricoles et énergétiques. Et on a commencé à voir les courbes économiques changer, et on a mis en cause la demande nouvelle et rigide que constituaient les politiques publiques d'incorporation obligatoire dans les biocarburants.

Là-dessus, dans notre rapport que vous pouvez télécharger sur Internet, on a émis un certain nombre de doutes sur les approches des très nombreuses études, et je remercie d'ailleurs l'Ademe d'avoir financé une étude par l'Inra qui était une étude de bibliométrie qui présentait un très grand nombre d'études parues sur ce sujet. Les doutes que nous avons eus, ce sont des doutes sur la définition même de ce que c’est que le changement des affectations des sols indirect.

IV BIOCARBURANTS CHANGEMENTS D' AFFECTATION DES SOLS CAS

- **Doutes nombreux :**
- ACV fossile de référence : mieux intégrer les bilans GES des exploitations nouvelles plus émettrices,
- Surfaces inférieures aux terres cultivables non cultivées : moins de 2 % des surfaces mondiales en 2010 ; moins de 2,5 % en France, 8,4 % en Allemagne, 2,5 % UE ; 3,5 % aux EU, 1,9 % au Brésil (2011),
- Demande alimentaire majoritaire (98 % palme; 93 % soja en 2010), en forte croissance avec le rattrapage des modes de consommation, sans aucune exigence de durabilité...
- Réintégrer les co-produits d'alimentation animale : libère des ha de soja en Argentine et au Brésil (autonomie F de 25 % à 55%) et réduit la part des cultures qui va réellement aux biocarburants; peu d'études initiales en tenaient compte (FAO/OCDE 2011) ;
- Analyser tous les facteurs du CAS : urbanisation, infrastructures, alimentation et traction animale, gaspillage (30% de la production) ce n'est pas fait faute de données et **de demande**

Évolution de la directive: rapportage mais pas de critère ILUC

12

Le fait qu'il est impossible, compte tenu de la complexité des mécanismes mis en œuvre, d'isoler ces effets et que donc on est obligé de modéliser avec tout un jeu d'hypothèses, qui sont rarement explicités jusqu'à la dernière.

Le fait qu'il y a moins de 2 % de surfaces agricoles dans le monde qui sont consacrées aux biocarburants. Je vous ai mis les chiffres tels qu'ils sont par grandes régions de production.

Le fait qu'un très petit nombre d'études fait état dans les calculs de la réintégration des coproduits de l'éthanol et du biodiesel, dans l'alimentation animale, qui est un marché alimentaire ; cette complémentarité est très peu soulignée.

Et qu'un certain nombre de facteurs de changement d'affectation des sols, qui nous paraissaient importants à nous agronomes, et qui sont cités là, ne sont pas étudiés par la recherche tout simplement parce que les études ne sont pas financées. Il nous semblait donc qu'il y avait une asymétrie qui était un peu gênante par rapport à l'effet de lien direct entre ce qu'on appelle le « changement d'affectation des sols » et puis la question des biocarburants ; cela ne veut pas dire que nous nions tout impact des politiques de biocarburants sur les changements d'affectation des sols. Ce que nous avons dit, et je le dirai en conclusion, c'est que nous souhaitions que ça fasse au contraire l'objet de travaux de recherches scientifiques plus nombreux et plus coordonnés avec peut-être aussi de meilleures données parce

que les données de superficies de sols agricoles ne sont pas toujours de très bonne qualité dans le monde.

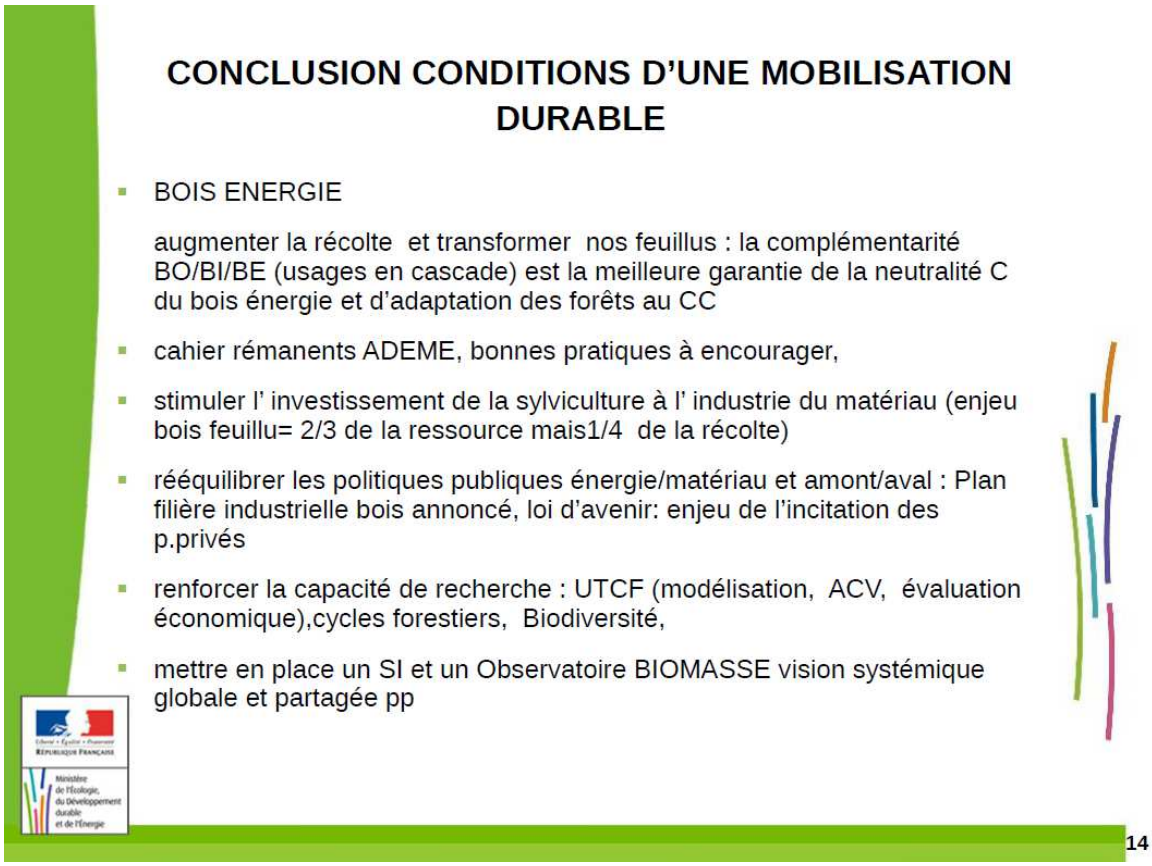
V BIOCARBURANTS VOLATILITE DES PRIX SECURITE ALIMENTAIRE

- **Augmentation générale et structurelle des prix des MP depuis 2005:** énergie, engrais, métaux, volatilité forte des prix agricoles : pics en 2008/2011 (maïs, blé, riz, palme, soja), donnant lieu à controverses sur son origine : spéculation, biocarburants, compétition food/ non food ciblée sur biocarburants « crime contre l'humanité » ; Campagnes 2008 « **manger ou rouler » « food-fuel debate »**; publications très nombreuses sur ce thème Rapport BM 2008: Biocarburants responsables de 75 % de l'augmentation des prix,
- grand nombre de paramètres : variabilité des récoltes/ région, coût de l'énergie fossile, cours du dollar, importance du ratio stock/utilisations,
- spécificité des marchés : faible part du commerce mondial, très faible élasticité offre/demande, élasticité-prix décroissante, contexte de libéralisation et de réduction des capacités de stock, démantèlement des outils européens de gestion PAC, baisse des investissements agricoles dans le monde,
- **Dernières études 2013: une influence très relativisée des biocarburants**
- ECOFYS: pas de corrélation entre prix agricoles et biocarburants, la sécurité alimentaire des PED dépend plus du développement de la production domestique facilitée par des prix élevés..comme le disent les ONG
- BM cause n°1 de l'évolution = prix du brut et non pas ratio stock/utilisations
- FAO gaspillage alimentaire = 35 % des surfaces agricoles 1,4 Md ha...

13

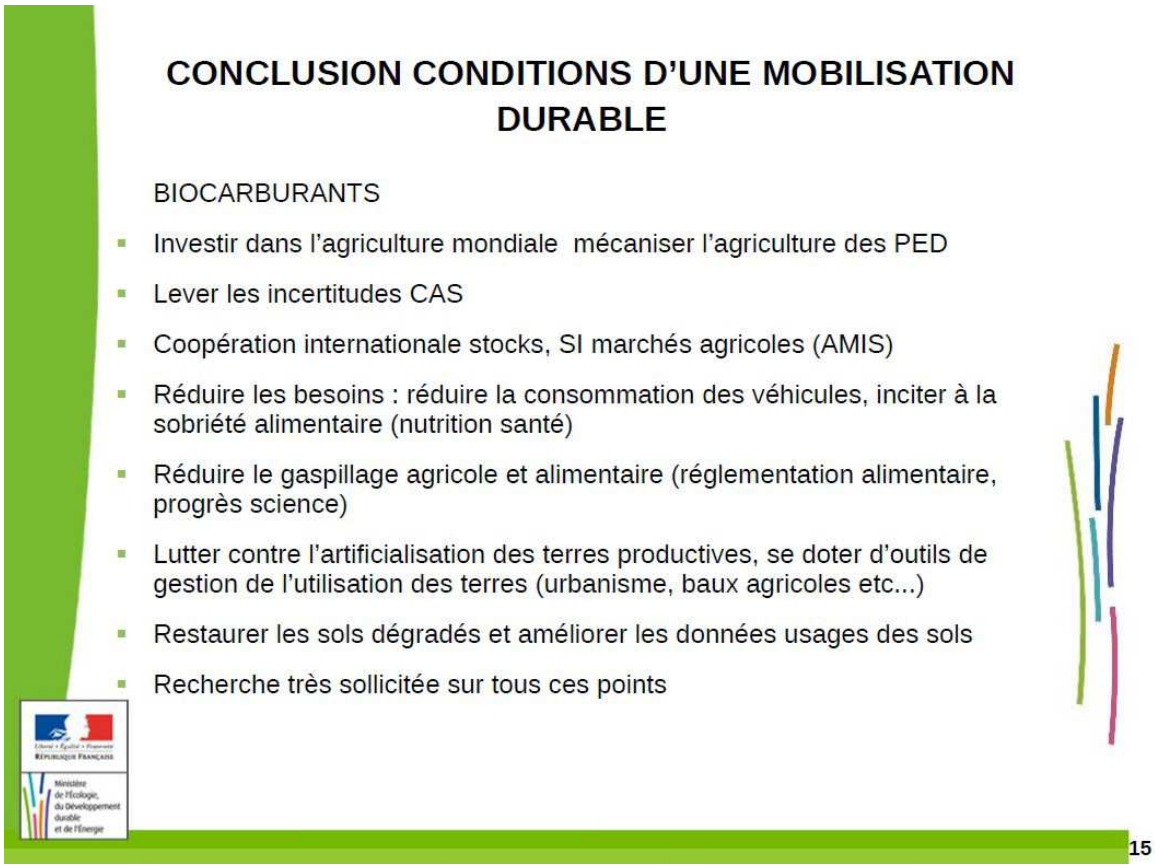
Dernière controverse, c'est celle sur la volatilité des prix. Il y a eu des controverses à partir de 2005 et ce jusqu'en 2008. Je crois que le pic a été en 2008 et 2011 où l'on a traité les biocarburants de crime contre l'humanité en disant que ça renchérissait considérablement les prix des matières premières principales : blé, maïs, riz, soja. Et que c'était la cause des famines.

Nous avons analysé très modestement un certain nombre de ces argumentaires et ce que nous avons dit, c'est qu'il y a une très grande spécificité des marchés agricoles, qui sont des marchés avec une très faible élasticité offre-demande, avec une élasticité de prix décroissante, qui ont vu se démanteler un certain nombre d'outils de marché, notamment les outils de gestion de la PAC dans les années qui ont précédé la crise de volatilité. Et surtout, on est dans un contexte de baisse des investissements agricoles dans le monde depuis des décennies : tout ça devait être pris en considération. Je cite quelques études qui viennent d'être publiées et qui relativisent l'influence des biocarburants à une place qui reste importante mais qui n'est plus la première. Ensuite quelques conclusions pour une stratégie sans regrets.



Au sujet du bois-énergie : la conclusion c'est qu'il faut s'intéresser, non pas au bois-énergie, qui est un sous-produit, mais à l'ensemble du système forêt, bois-matériaux, bois-énergie. Sinon, on a une vision totalement partielle et erronée du système global et du jeu d'acteurs qui va fonctionner. Je vous laisse lire les différentes recommandations. Il est certain qu'étant donné que le bois-énergie est un sous-produit il ne peut dans l'état actuel de la situation de la filière être mobilisé sans un regain de politique publique lié à des investissements qui doivent être faits au niveau des producteurs de la sylviculture, au niveau de la transformation et notamment de la transformation matériaux.

Actuellement, le bois de construction c'est quand même le deuxième poste déficitaire de notre balance commerciale, et on ne transforme pas notre forêt. Mais des investissements doivent être aussi faits dans la recherche, parce que nous manquons, je pense, d'outils scientifiques pour optimiser le système forêt-bois en France du fait de ces approches scientifiques qui manquent.



Et puis sur les biocarburants, il s'agit de controverses sur la première génération G1.

La première chose serait de passer déjà à la G2, ça permettrait d'éviter un certain nombre de controverses, mais cela semble complexe d'arriver au marché sur la G2.

Je souhaite juste insister sur le point 2. Il faut absolument lever les incertitudes sur le changement d'affectation des sols. Je sais que l'Ademe est train de constituer un groupement d'intérêt scientifique avec l'Inra sur cette question. C'est une question qui dépasse largement les biocarburants, qui devrait d'ailleurs inciter tous les pays du monde à faire attention à leur potentiel productif agricole et forestier, à ne pas le dilapider comme on le dilapide en France depuis quarante ans par artificialisation galopante des sols. Toutes les réserves de capital de sols productifs de biomasse dans une vision de long terme et de gestion durable devraient être connues, suivies et préservées.

Bibliographie

Rapport CGAAER CGEDD CGEIET « Les usages non alimentaires de la biomasse », septembre 2012.

Rapport du projet de recherche CLIMATOR (2007-2010), Inra.

AIE, Scénarios énergétiques 2013.

Citepa, « Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto », 2012.

Leturcq (P.), « Forêt, bois, CO_2 : Mise en question des politiques de développement des usages énergétiques du bois ».

Ademe FranceAgriMer, « ACV appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France », février 2010.

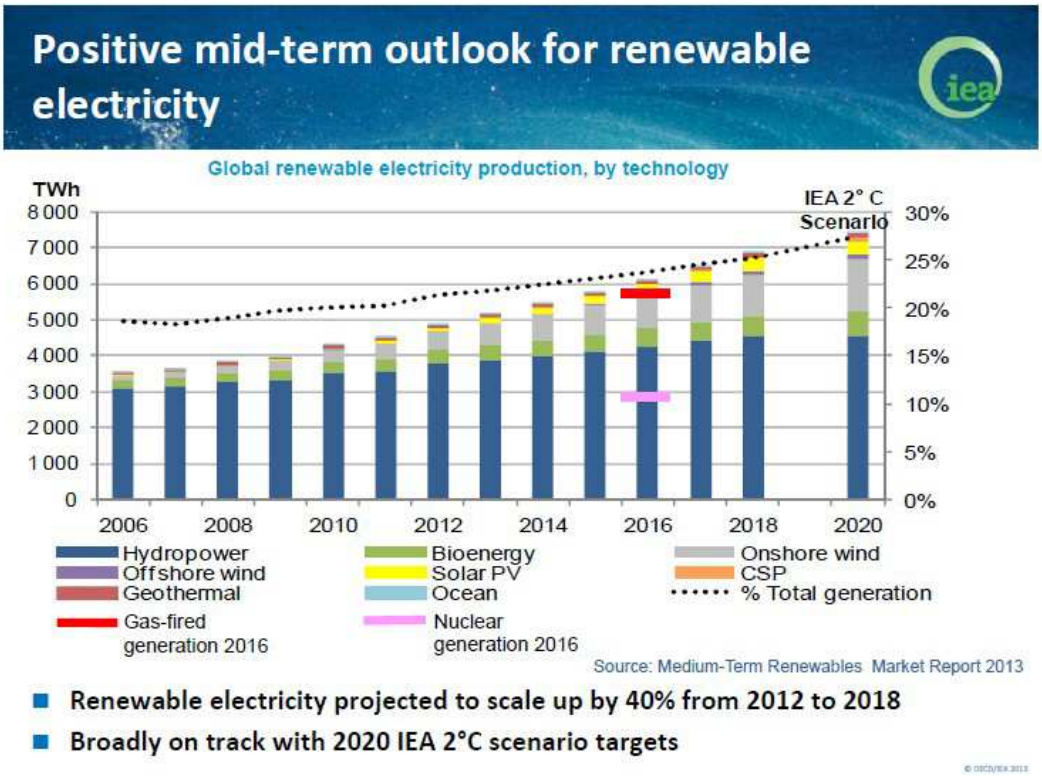
Baffes (J.), Dennis (A.) (2013), “Long-Term Drivers of Food Prices”, The World Bank Development Prospects Group & Poverty Reduction and Economic Management Network, Trade Department, May 2013, WPS6455.

Ecofys (2013), “Biofuels and Food Security: Risks and Opportunities”.

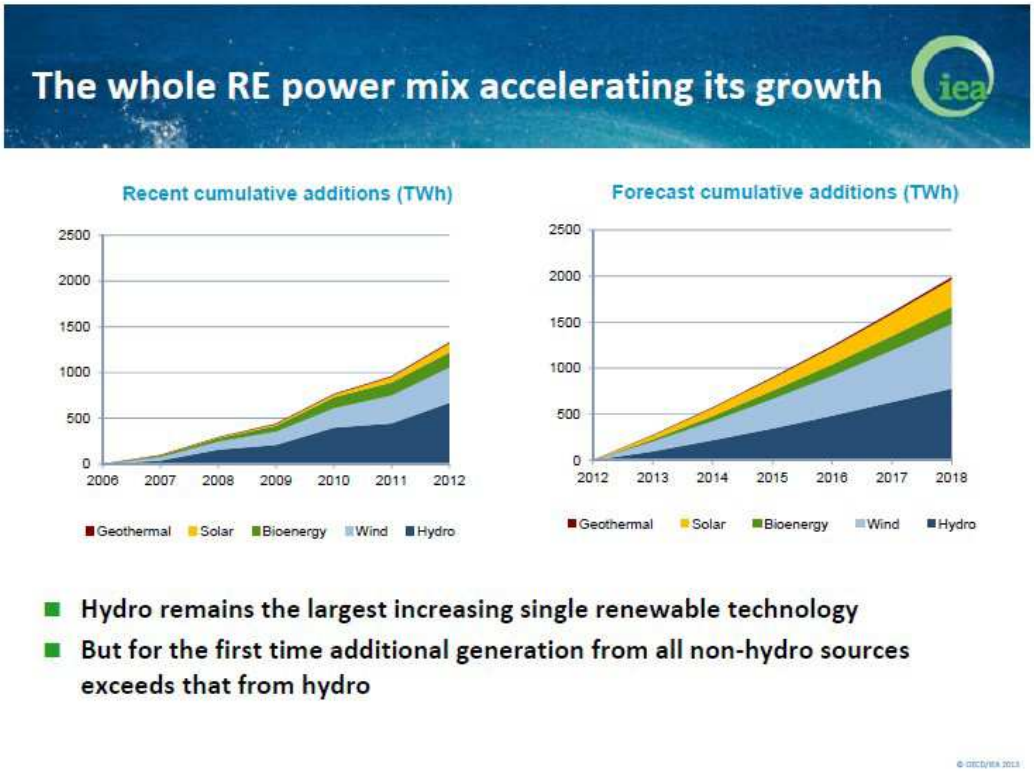
FAO (2013), “Food Wastage Footprint Impacts on Natural Resources”, Summary Report.

Cédric Philibert : Quelles limites à l'essor des énergies renouvelables ?

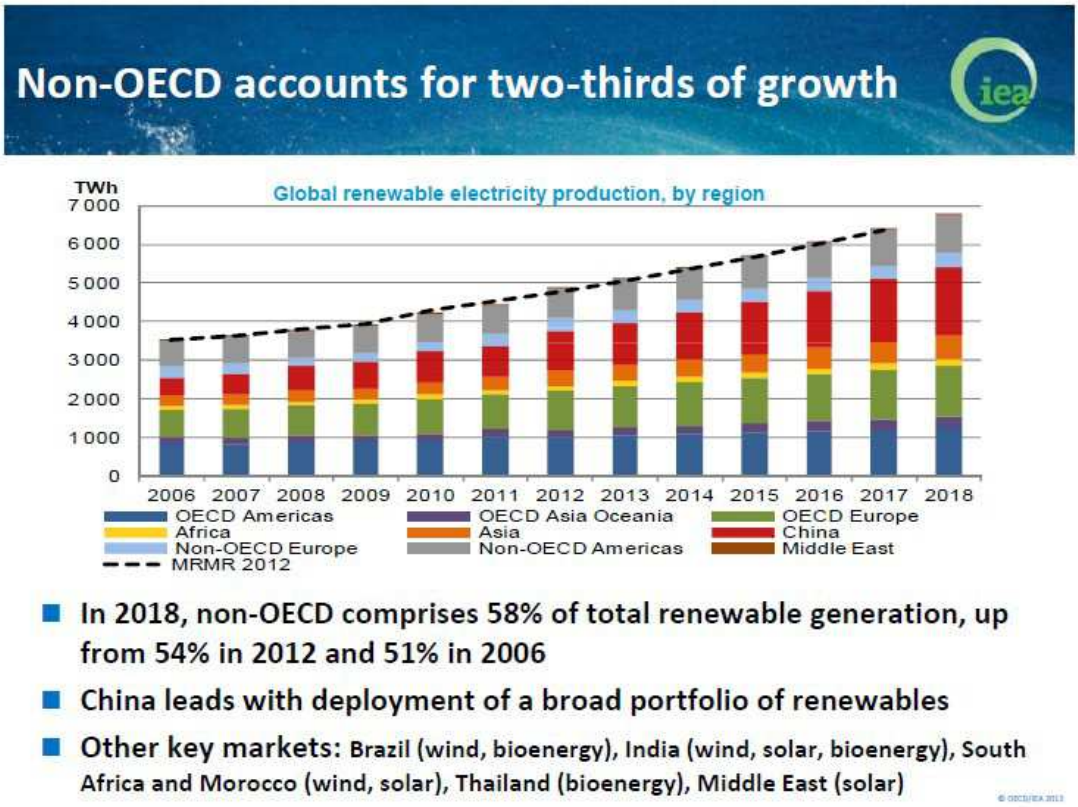
Cédric Philibert est analyste senior à l'Agence internationale de l'énergie.



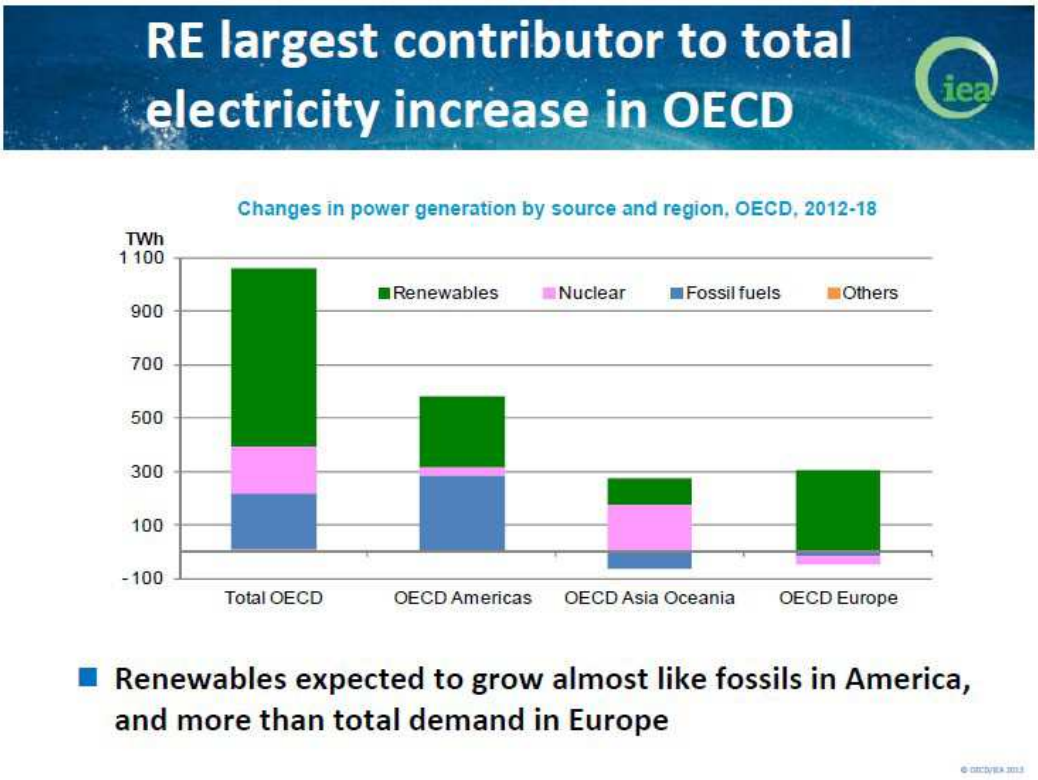
Commençons par nos prévisions à cinq ans qui sont assez solides. Elles sont étayées sur les projets en cours, les politiques suivies dans les différents pays, etc. On voit que l'électricité d'origine renouvelable va progresser de 40 % entre 2012 et 2018. Quelque chose d'intéressant se passe vers 2015 ou 2016. Nous avons mis 2016 parce que nous sommes prudents : l'électricité renouvelable fait plus que l'électricité à partir du gaz malgré la révolution des gaz de schiste et fait deux fois plus que l'électricité nucléaire dans le monde.



C'est important d'avoir ces ordres de grandeur. Évidemment, la plus grande masse reste l'hydroélectricité mais les autres énergies renouvelables non hydrauliques progressent très rapidement. Elles ont doublé au cours des cinq dernières années, elles vont doubler encore au cours des cinq prochaines années. Je ne crois pas que ce sera comme cela tous les cinq ans mais pour l'instant c'est ainsi. Ce qu'on voit aussi c'est que l'hydraulique qui au cours des cinq dernières années a représenté plus en addition de térawattheures que l'ensemble des autres renouvelables perd ce statut-là ; elle est quand même la technologie qui progresse le plus en térawattheures mais elle est talonnée par le vent qui progresse plus vite en gigawatt, en mégawatt. Et, pour la première fois, l'ensemble des autres renouvelables va progresser plus vite que l'hydraulique seul. Donc c'est moment important.

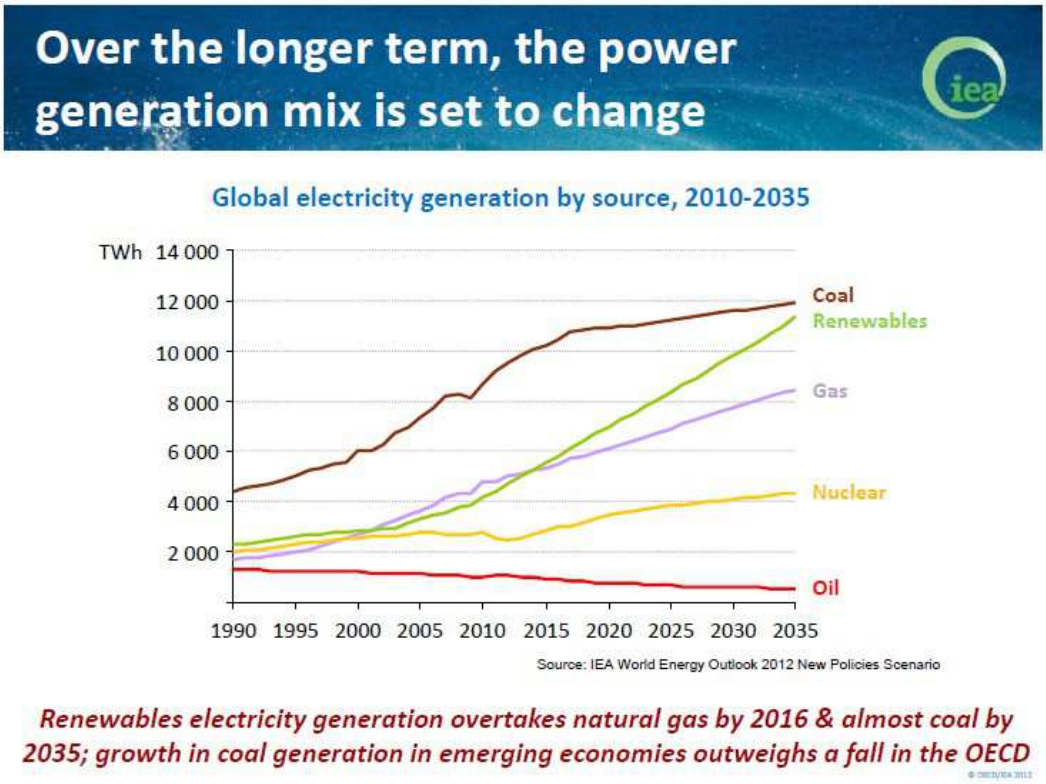


Par région, j'entrerai dans les détails, mais vous voyez évidemment le rôle primordial de la Chine en matière de renouvelables comme en matière de nucléaire et de beaucoup d'autres choses. Ça n'a rien pour vous étonner.



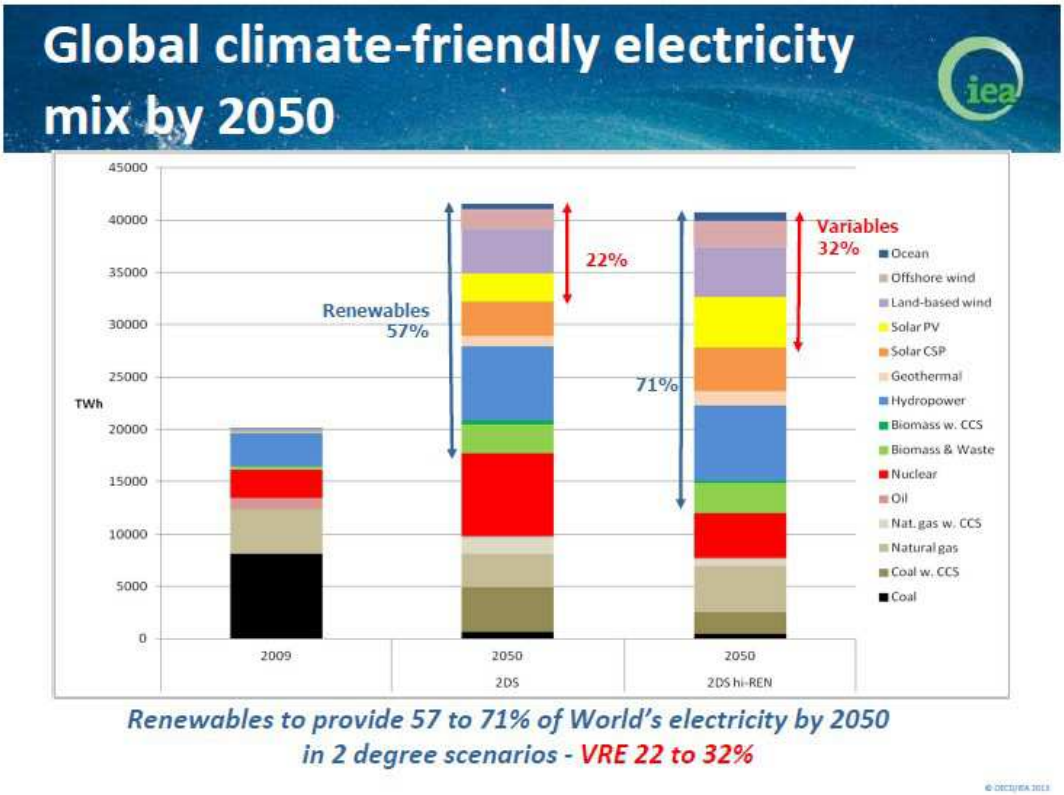
Ce qui est intéressant c'est que tout ce qui était non hydraulique est parti de l'Europe, des États-Unis, sur des volontés politiques fortes et c'est en train de se répandre dans le monde entier. Donc l'utopie ce n'est pas nulle part, c'est plutôt partout actuellement.

Dans les pays de l'OCDE où la croissance est beaucoup plus faible, il y a quand même une progression importante et nous voyons que, du fait du manque de croissance, les renouvelables seront en térawattheures l'énergie qui progresse le plus vite dans les pays de l'OCDE, plus que l'ensemble des combustibles fossiles.



Maintenant, notre projection à 2035. Évidemment, plus on s'éloigne dans le temps, plus les projections sont incertaines. C'est le scénario « Nouvelles politiques ». Ce n'est pas le scénario le plus amical pour le climat, ce n'est pas le scénario 450. C'est le scénario central du World Energy Outlook. Et qu’est-ce qu'il montre ?

Il montre que les renouvelables, après avoir dépassé le gaz, sont tout près de rejoindre le charbon dans la production mondiale d'électricité vers 2035. Évidemment, dans le scenario 450, ça se produit avant 2035. Si l'on regarde dans le plus long terme et qu’on est dans les scénarios amicaux pour le climat cette fois.

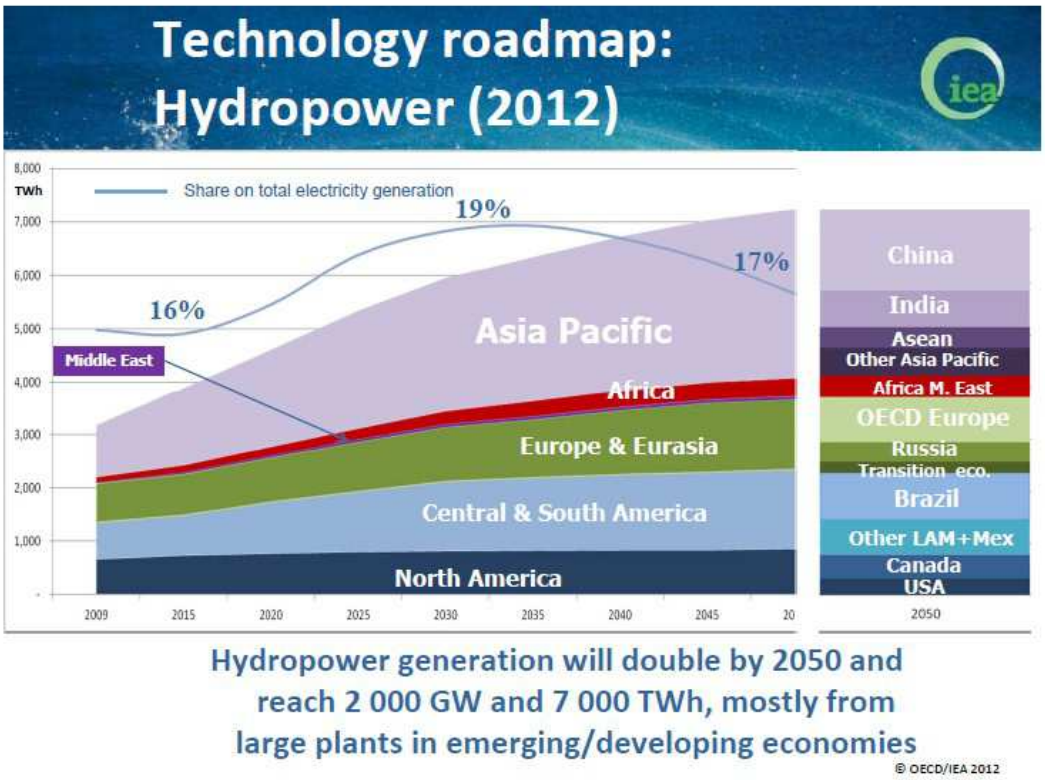


On voit qu'on assiste en quarante ans à une transformation extrêmement profonde du mix électrique proprement dit puisqu'on passe d'un monde dominé par le charbon, le gaz, le nucléaire, l'hydraulique, à un monde où il y a très peu de charbon sans capture et stockage du carbone, un peu de gaz naturel, significativement plus de nucléaire – un peu plus de deux fois plus qu'aujourd'hui – et puis deux fois plus d'hydraulique, et puis, en masse à peu près égale, du solaire et du vent. Cela c'est dans le scénario central, celui qui est le scénario de « least cost » tel qu'on pouvait l'évaluer il y a bientôt deux ans. Dans le prochain scénario de « least cost », vous verrez qu'il y a des petits changements intéressants mais ça sera en mai prochain.

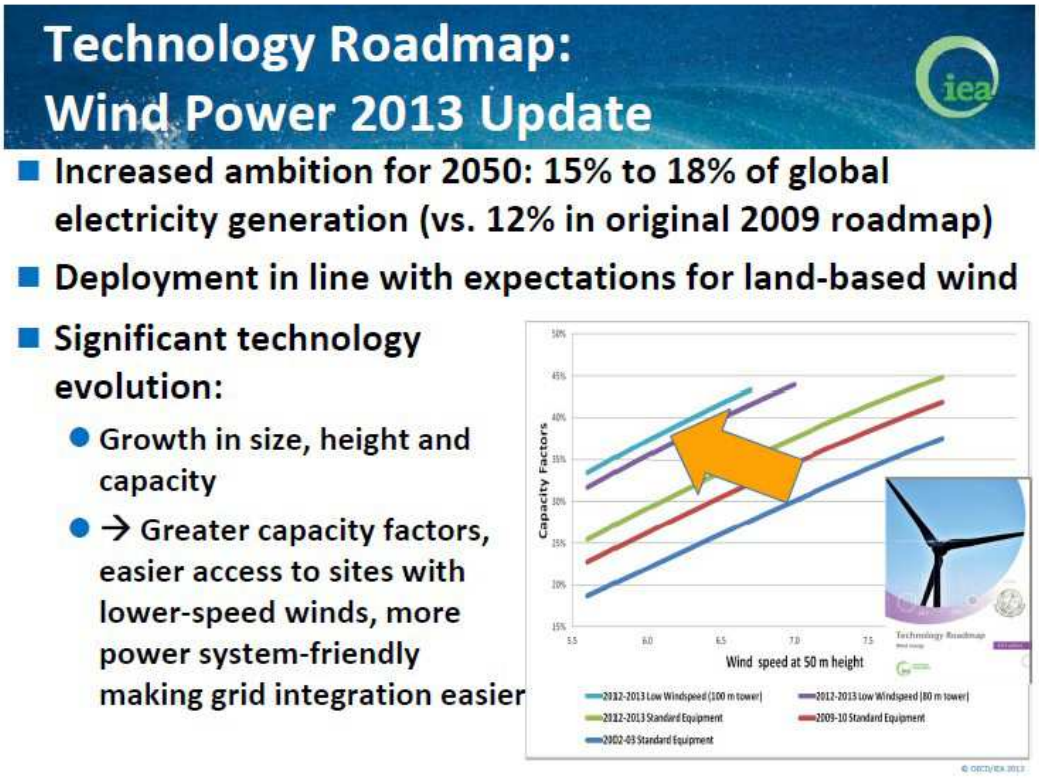
Dans le scénario, on a un scénario « Plus de renouvelables » qui suppose une progression moins rapide du stockage et de la capture du CO_2. Une progression moins rapide du nucléaire pour toutes les raisons que vous pouvez imaginer. À ce moment-là, on arrive à un ensemble de renouvelables qui n'est plus de 57 % mais qui est de 71 %, donc une quantité de renouvelables variables c'est-à-dire l'éolien terrestre ou maritime et le solaire photovoltaïque de 32 %. C'est important parce que, dans certaines régions du monde, c'est plus de 32 %.

En Europe, on ne peut pas faire du solaire thermodynamique, sauf un peu à la marge, en Italie, en Espagne, surtout en Espagne pour l'instant. Il y a deux centrales qui viennent d'être décidées en France. Il est évoqué 2 à 9 mégawatts, donc on n'est pas encore dans les grandes masses parce que on n'a pas l'irradiation solaire directe qu'il

faut. On aura beaucoup de variables, beaucoup plus que ce 32 % qui est une moyenne mondiale.

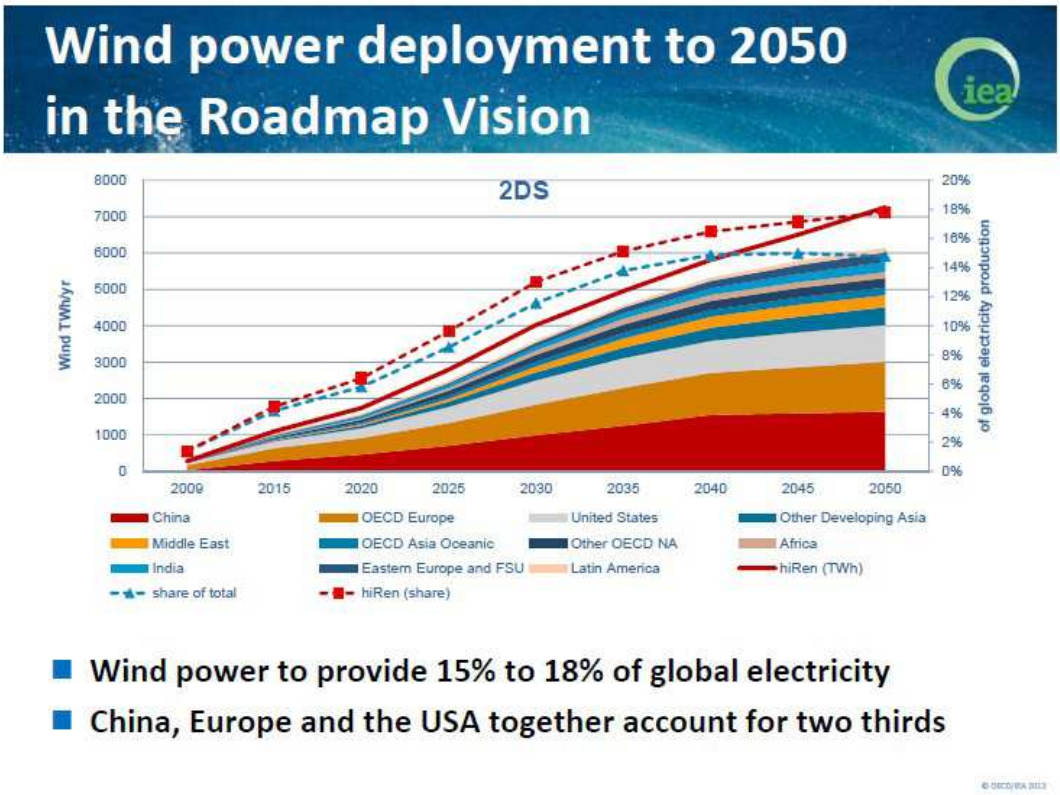


Quelques mots sur nos « road maps » qui ont illustré ces potentiels techniques et les évolutions technologiques passées et requises pour y arriver. L'hydraulique : on dit toujours que celui-ci est saturé, que c'est une vision de vieux pays. Mais dans les pays neufs, il y a énormément à faire pour l'hydraulique. Et vous voyez ici encore le rôle primordial de l'Asie dans le développement attendu de l'hydraulique. On va doubler et la capacité en gigawatt et la génération en térawattheures de l'hydraulique essentiellement par des grandes centrales dans des pays émergents.

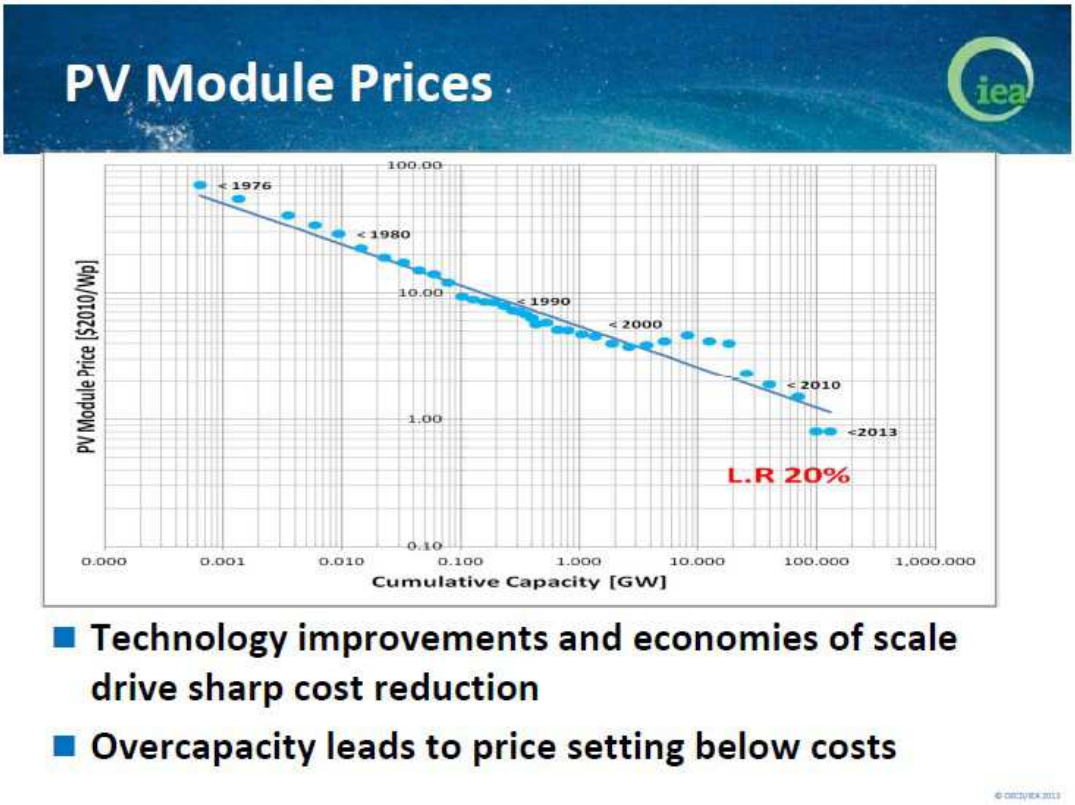


Un mot sur la « road map » Wind Power. On vient de sortir un update, il est sur le site de l'AIE depuis aujourd'hui. L'ambition qui était affichée en 2009 pour cette technologie était de 12 % en 2050, elle passe entre 15 % et 18 %. Pourquoi ? D'abord à cause des changements généraux du contexte, mais, plus spécifiquement, à cause des changements dans la technologie. Et je regrette que l'intervenant précédent soit parti, cela l'aurait sûrement intéressé.

Les éoliennes depuis deux-trois ans sont en train de vivre une vraie révolution silencieuse. Elles grandissent en taille mais le font depuis vingt ans. Aujourd'hui, ce qui a changé, c'est le rapport entre la surface balayée et la capacité électrique, ce qui donne des facteurs de capacités bien plus importants. Et une production électrique plus régulière. Cela ne veut pas dire qu'elle n'est plus variable, ça veut dire qu'elle est nettement plus régulière. Il n'y a plus des grands pics de production, il y a un espèce de plateau qui est assez fréquent. Et on pense que ça va faciliter l'intégration des éoliennes récentes de deux façons, d'une part en permettant d'accéder à des tas de sites un peu moins ventés, donc de quitter les sommets des montagnes, les bords des océans pour aller plus dans les plaines industrielles où l'on exploitera mieux des régimes de vent un peu moins bon, mais aussi en donnant un output plus régulier et en facilitant l'intégration dans les réseaux, sujet favori de mon ami Jan Horst Keppler qui en parlera tout à l'heure.



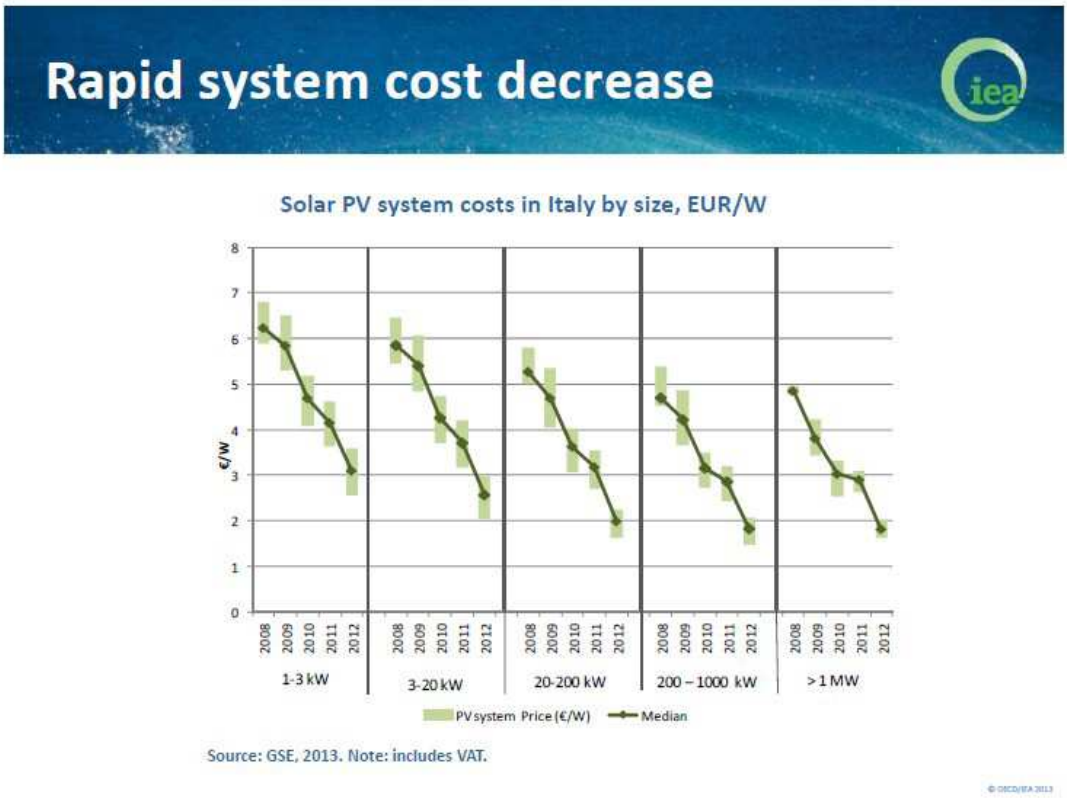
Le “Wind Power Deployment”. Je vais vous dire : ça se passe aussi beaucoup en Chine. Vous ne serez pas surpris. On se dirige vers, en rouge, le scénario « Plus de renouvelables », 15 % à 18 % en 2050.



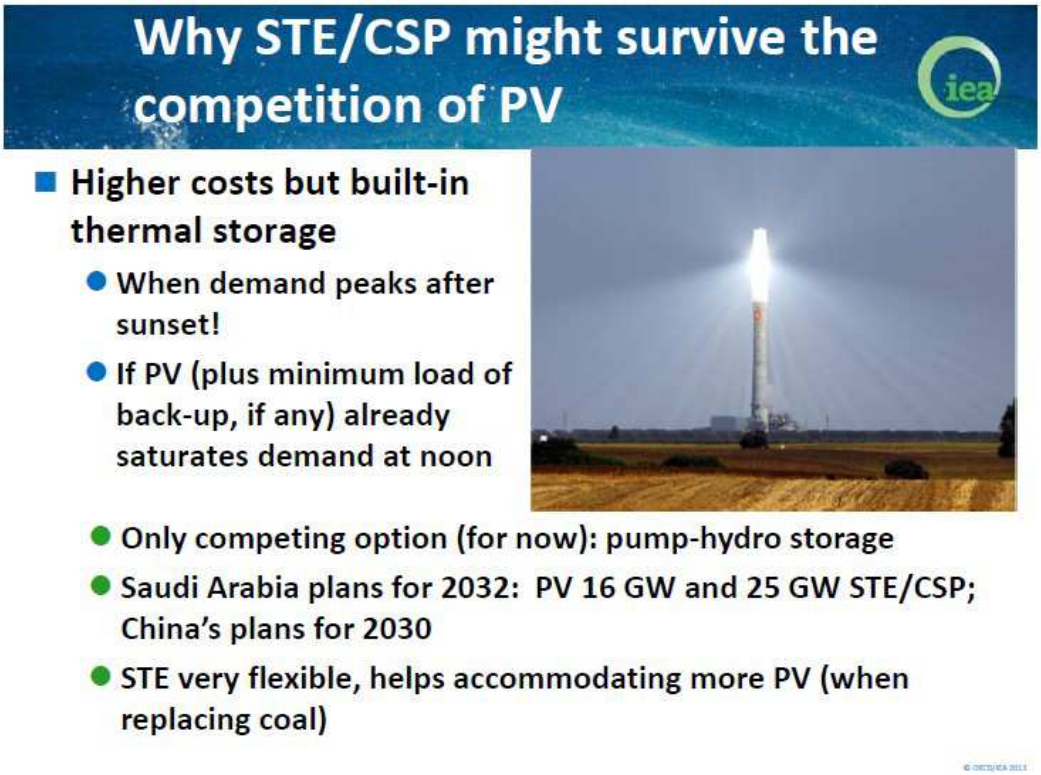
Quelques mots sur le photovoltaïque, dont la baisse des coûts récente a été extrêmement forte. Elle est due en partie à la surcapacité et à une guerre économique, mais en partie seulement. Elle est aussi largement due à des améliorations technologiques et des économies d'échelle. Et nous pensons que ce processus va absolument continuer même s'il est pour l'instant plus ou moins stoppé depuis un an. Et encore il faut le dire assez vite. En réalité, nous avons toute raison de penser que ce processus va se poursuivre dans les prochaines années et qu'on va encore baisser de coût. Si on regarde les systèmes, c'est intéressant de voir que les systèmes ont baissé aussi vite que les modules. Donc ce ne sont pas seulement des modules chinois, ce sont les systèmes partout. Cela comprend l'installation, la pose, tous les « soft costs », dès que les marches « maturent », qu'il y a une densité importante d'acteurs.

Rémi Chabrillat : C'est une courbe d'apprentissage.

Cédric Philibert : C'est une courbe d'apprentissage qui n'est pas seulement pour les cellules photovoltaïques, c'est pour l'ensemble des systèmes. C'est ça qu'il est important de voir.

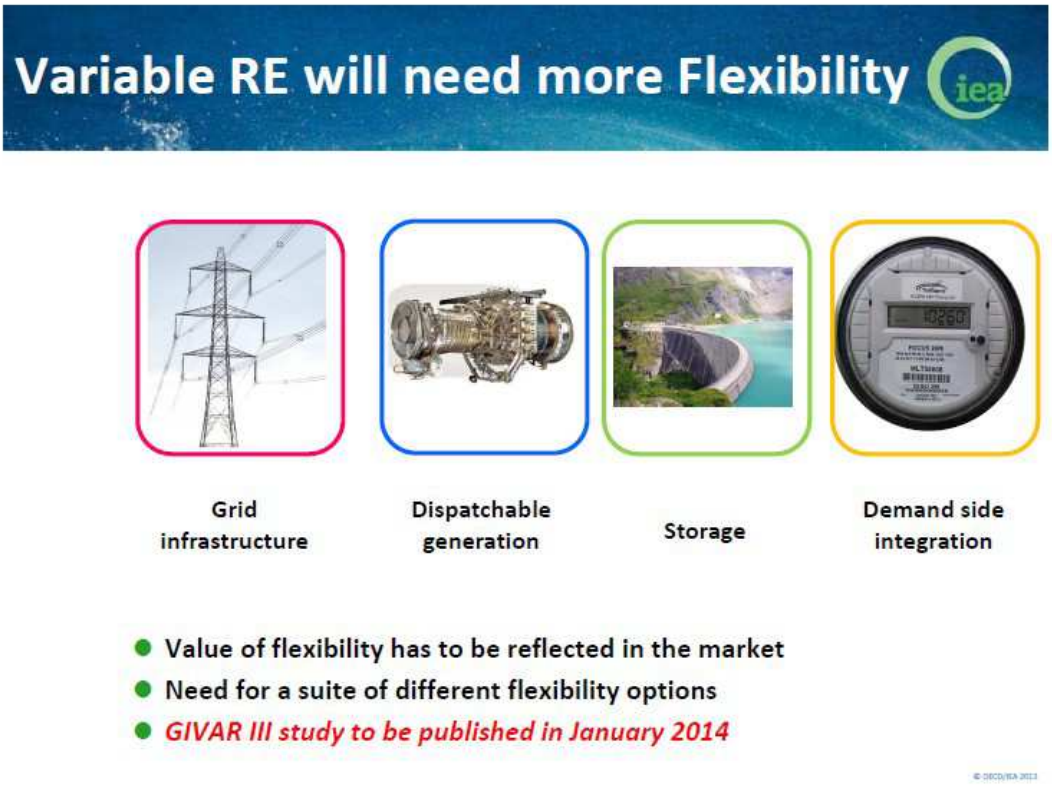


Et vous voyez en Italie, c'est par GSE. Ce sont des chiffres qui concernent des milliers et des milliers d'installations. En gros, quelle que soit la taille du système, le prix a été divisé par deux en quatre ans.

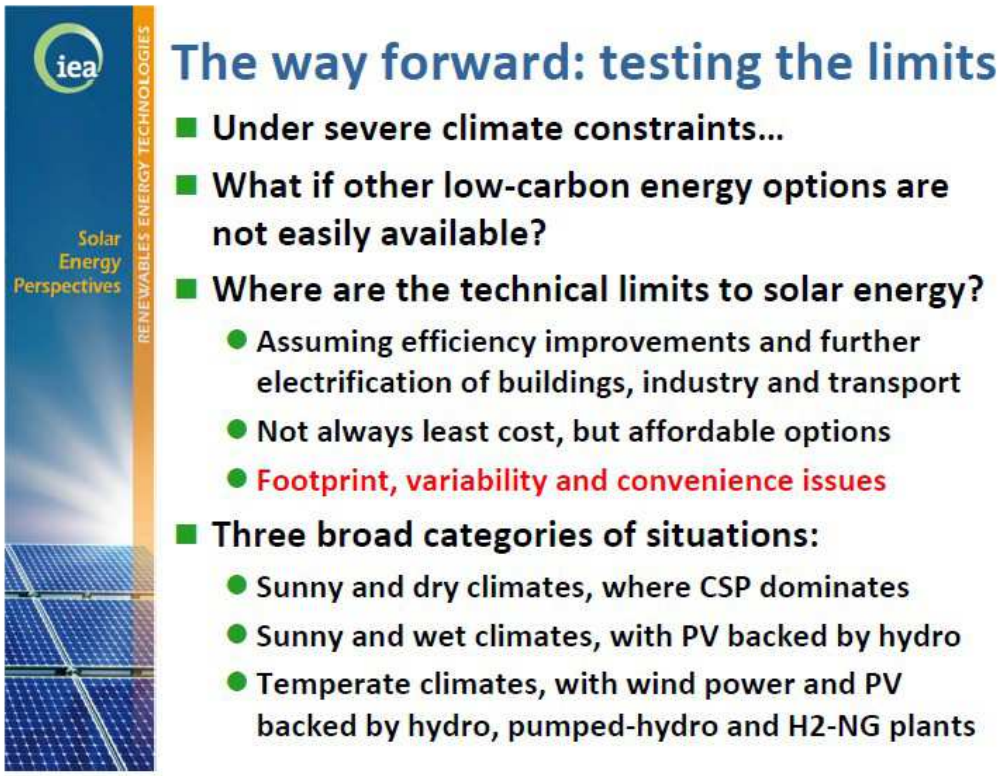


Cela dit, vous avez vu que sur le mix on avait aussi, dans notre mix futur, beaucoup de solaire thermodynamique à concentration qui aujourd'hui représente quelque 2,5 gigawatts dans le monde alors que le PV est passé à 120 aujourd'hui. Donc on est très loin en arrière. On pense que c'est d'un grand potentiel parce que la capacité de stockage est intégrée et que donc on peut générer de l'électricité quand on en a besoin.

Donc ce n'est pas variable, en tout cas pas variable sur un même pas de temps que le photovoltaïque ou que l'éolien. Et l'on pense que là où partout la pointe de demande se situe après le coucher du soleil, ce qui est le cas dans beaucoup de pays en développement, ou quand le photovoltaïque aura saturé la demande diurne, notamment la demande de milieu de journée, alors le solaire thermodynamique aura un grand rôle en produisant de l'électricité après le coucher du soleil. Et peut-être aussi pour une petite pointe nette qui va apparaître le matin. Au fond la seule option réelle, solaire, qui peut être en compétition avec ce solaire thermodynamique c'est l'alliance du photovoltaïque et du stockage d'énergie, qui n'est pas économique en tout cas par des batteries aujourd'hui, mais qui est plus ou moins économique avec des stations de transfert d'énergies par pompage. Mais vous voyez les plans de l'Arabie Saoudite, par exemple, sont très intéressants : 16 gigawatts de photovoltaïque, 25 gigawatts de solaire thermodynamique à concentration. C'est une ressource flexible qui permet en fait d'accommoder plus de photovoltaïque dans les réseaux et non pas moins. Donc ce n'est pas un compétiteur, c'est un complément.



Plus d'énergies renouvelable dans les réseaux va demander plus de flexibilité, à la fois par les réseaux, les interconnections, par la génération « dispatchable », par les stockages et surtout, on devrait commencer par ça, par la réponse de la demande et le fait de faire varier la demande en fonction de la disponibilité et pas uniquement en abaissant la demande. Nous allons publier une importante étude en janvier à ce sujet.

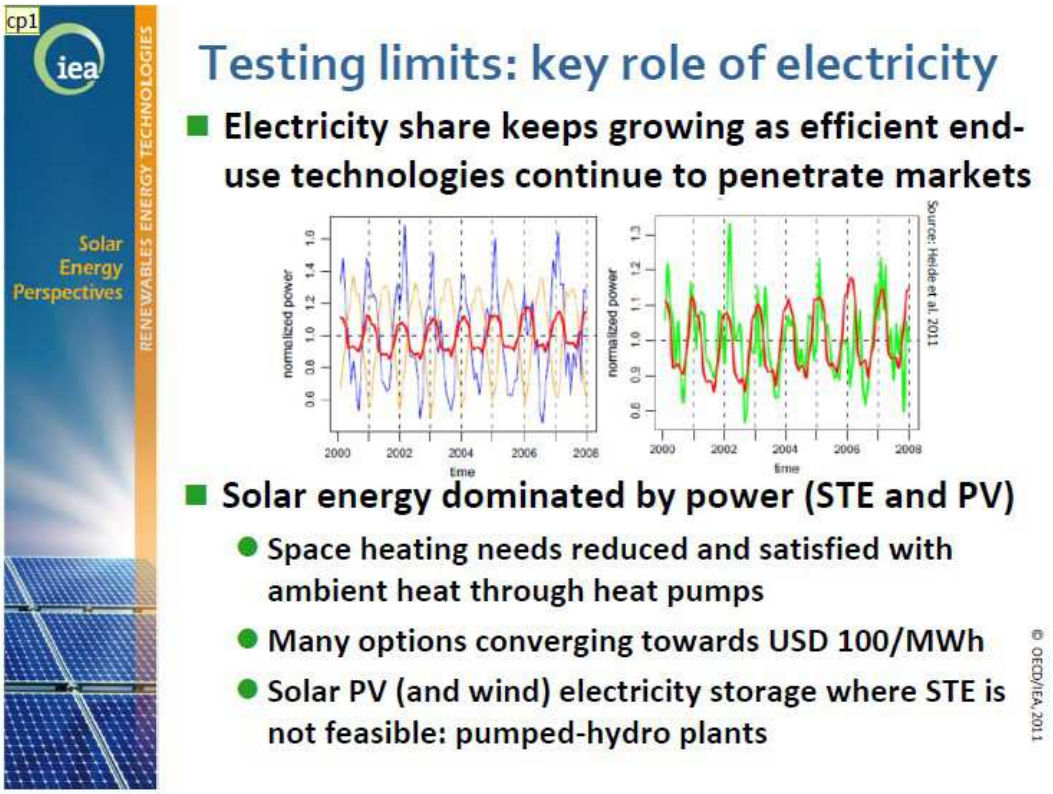


Pour terminer sur les limites, on y arrive vraiment. Où sont les limites ? On a fait dans cette publication en 2011 une expérience de pensée pour voir où étaient les limites aux renouvelables et en particulier au solaire. Si l'on a des contraintes climatiques très sévères, il ne faudra pas seulement diviser par deux les émissions de CO_2, il faudra les réduire autant qu'on peut. Et si l'on n'a pas beaucoup de stockage de carbone et de nucléaire disponible, où sont les limites techniques ?

On fait l'hypothèse qu'on arrive à faire progresser l'efficacité énergétique mais aussi l'hypothèse d'une forte électrification des bâtiments, de l'industrie et des transports. Les bâtiments par des pompes à chaleur ; l'industrie par des tas de procédés que je ne vais pas tous mentionner ici ; et le transport par véhicule électrique et plug-in hybrides de toute nature. Ce ne sont pas toujours les options les moins coûteuses, on n'est plus dans l'optimisation du moindre coût, mais on a cherché des coûts abordables. Donc on a éliminé les options futuristes et très coûteuses. Et là on trouve qu'il y a trois grandes catégories de situations : les climats chauds et secs où l'on aura énormément de solaire thermodynamique, les climats chauds et humides où l'on aura une alliance souvent de l'hydraulique et de photovoltaïque, et puis les climats tempérés où c'est plus compliqué, on aura une alliance de photovoltaïque, d'éolien avec de l'hydraulique, du stockage par pompage et des centrales à gaz avec éventuellement un peu de « solar fuels » dedans.

Donc ce rôle clé de l'électricité est évidemment très important dans ce scénario. On a dit que c'était 21 % de la demande finale. Dans les scénarios "Energy Technology Perspectives", c'est 25 % à peu près en

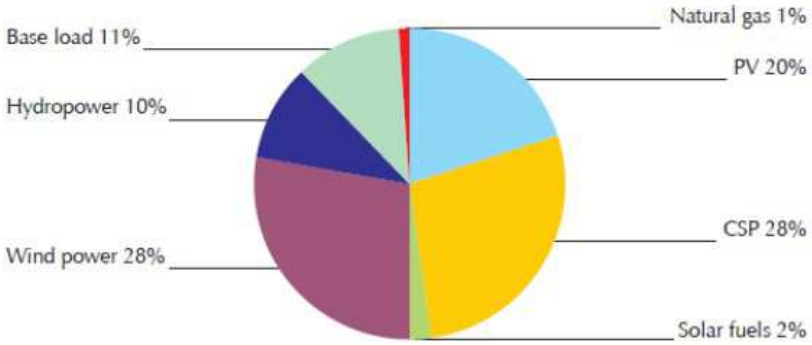
2050. Là, on a imaginé qu’on réussissait à aller jusqu’à 60 % de la demande finale en électricité grâce à ces substitutions massives de véhicules électriques, de pompe à chaleur et de procédés électrogènes dans l'industrie. On tâchera d'illustrer ça dans le détail ultérieurement.



Ici, on voit la complémentarité du vent et du solaire en Europe et comment un mix de 40 % de solaire et 60 % d'éolien permet de suivre les courbes saisonnières de demande. Cela suppose évidemment pour ces proportions élevées qu'il y ait aussi des moyens de types de stockage et de pompage, mais ce sont des stockages limités en taille pour suivre les variations quotidiennes ou horaires.

Ce n'est plus un problème de coût, en tout cas pour la génération elle-même. Après nous parlerons des coûts des réseaux. Par avance, je ne suis pas d'accord avec tout ce qui sera dit, mais c'est un détail. Mais ce n'est plus un problème de coût si l'on accepte de ne pas être dans le moindre coût absolu mais d'être dans l'abordable, plus ou moins 20 % de coût. De toute façon, toutes les options tombent vers 100 $ le mégawattheure. On le voit avec le nucléaire nouveau. On le voit avec beaucoup d'autres options.

Testing the limits: Electricity by 2060

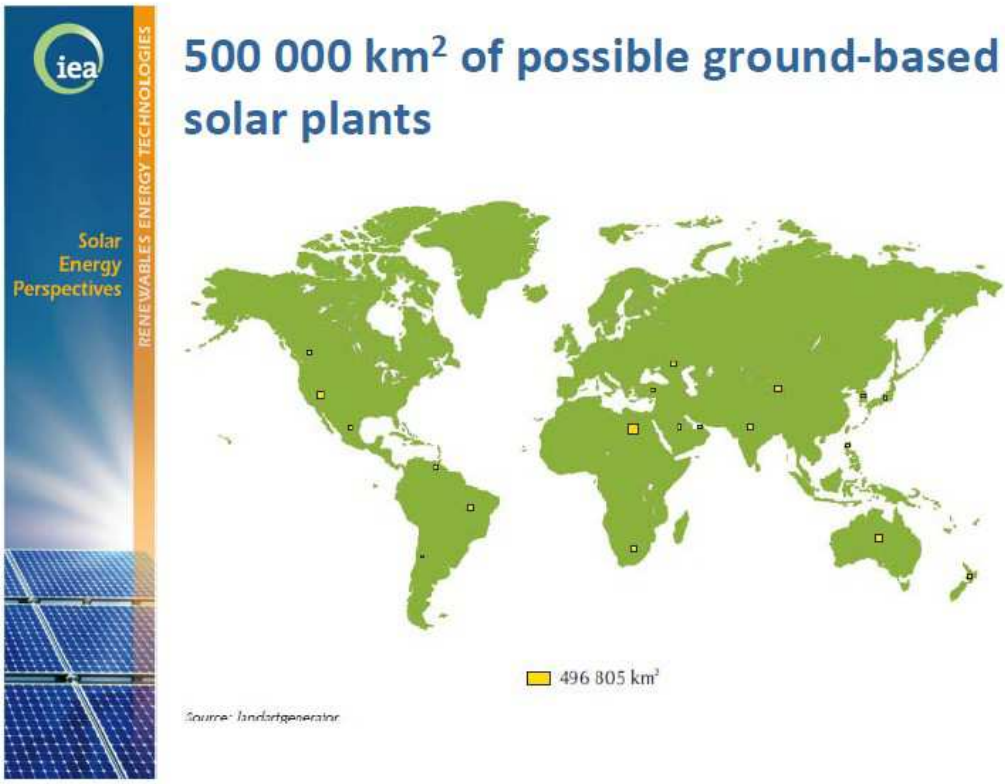


Technology	Capacity (GW)	Electricity generation (TWh/y)
PV	12 000	18 000
CSP	*6 000	25 000
Solar fuels	**3 000	2 000
Wind power	10 000	25 000
Hydro power and marine	~~1 600~~ 3000	9 000
Base load (Geothermal, nuclear, solid biomass w. CCS)	1 200	10 000
Natural gas	**3 000	1 000
Total		90 000

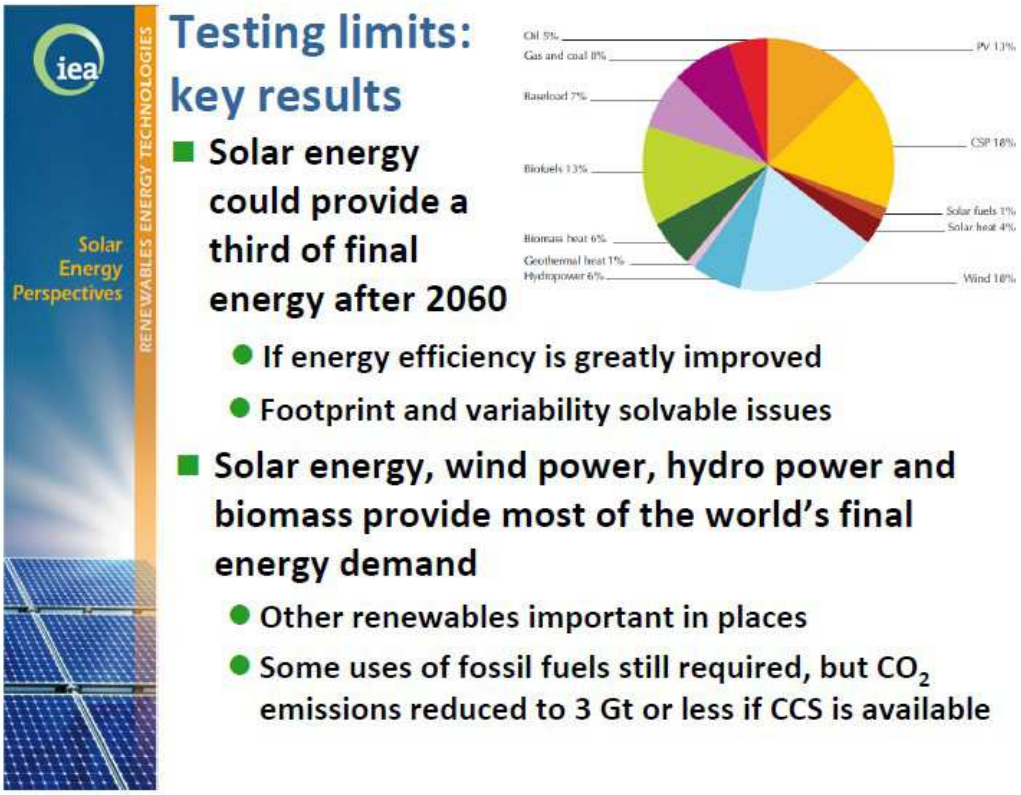
*Thermal storage would give CSP plants an average capacity factor of almost 50%. **Shared capacities.

© OECD/IEA, 2012

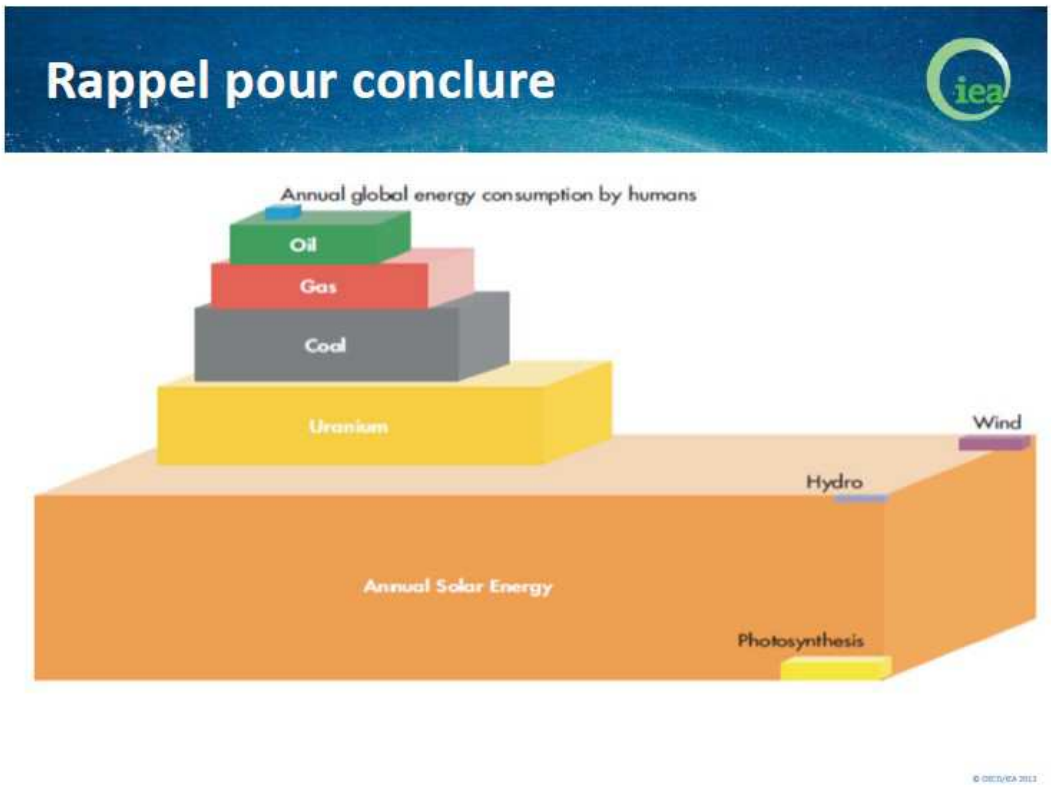
Qu'est-ce que cela donne en électricité ? Un mix électrique aussi renouvelable que possible. D'abord on arrive à quelque chose d'assez important quand même puisque, avec 10 % d'hydraulique, ça, on ne peut pas le monter encore plus parce qu'il y a des problèmes géographiques, on peut avoir jusqu'à 28 % d'éolien, 20 % de photovoltaïque, 28 % de solaire thermodynamique. Évidemment, il faut du « base load ». Cela peut être de la biomasse avec de la capture de carbone, du nucléaire, de la géothermie, des énergies de l'océan, etc. Et puis, on a besoin d'un peu de gaz naturel pour équilibrer tout ça, à cause de sa très grande flexibilité.



Le problème de l'emprise au sol n'est pas un vrai problème. On peut mettre une moitié de ces installations sur des toits et non pas au sol ou au-dessus de parkings. Et puis quand on a beaucoup d'électricité dans l'énergie finale, on s'aperçoit que l'électricité est un formidable vecteur pour les renouvelables. Et par exemple, dans bien des cas, l'alliance de l'éolien et de la pompe à chaleur est plus efficace pour donner de la chaleur dans l'habitat dans les pays froids que le solaire thermique. Donc le solaire thermique se cantonne à l'eau chaude et à des usages industriels pour lesquels il a une justification économique. Mais dans l'habitat et le tertiaire c'est beaucoup plus de l'électricité et de la pompe à chaleur qui fonctionnent.



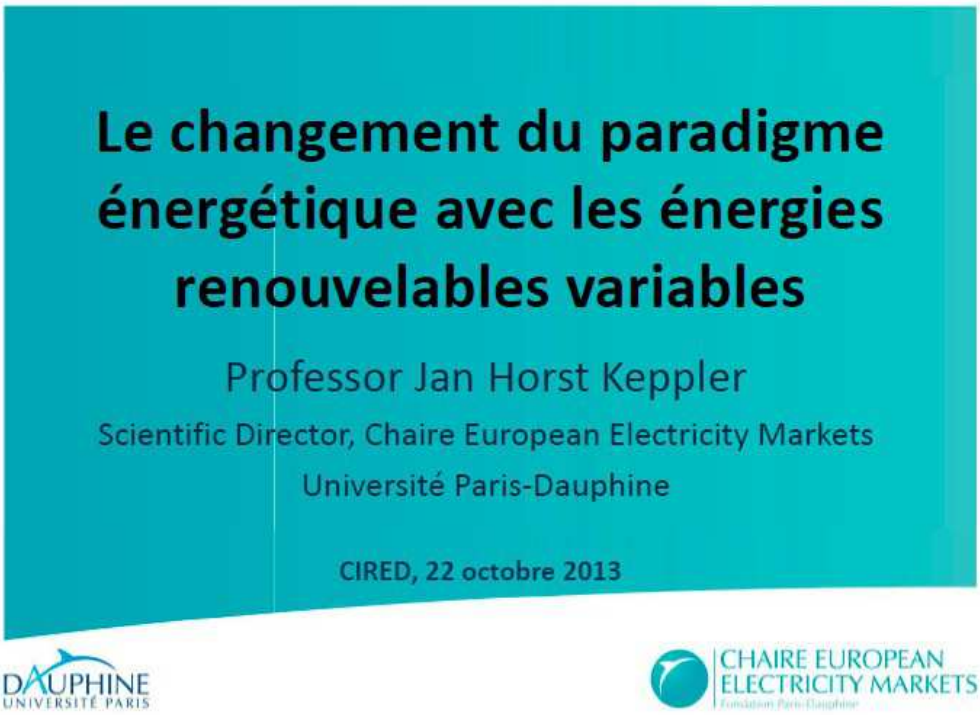
Et là on arrive à un mix d'énergies finales quand on est à des pénétrations importantes de renouvelables. L'énergie primaire n'a plus beaucoup d'importance. D'ailleurs, elle « tombe » sur l'énergie finale. Donc ce qui importe de voir c'est l'énergie finale. Là on a encore du charbon, du gaz, du pétrole. Le pétrole est très difficile à substituer dans tous les usages de transports, on ne peut pas le substituer dans tous et certainement pas totalement. On a de la biomasse, des biocarburants limités par les impactes sur la compétition alimentaire et la biodiversité. Mais on pourrait arriver à ramener les émissions à un dixième du niveau actuel dans ce schéma et sous réserves de ces hypothèses.



Pour finir, ce dernier rappel : la consommation globale de l'humanité annuelle, en haut en bleu, les réserves totales de pétrole, de gaz, de charbon et d'uranium et l'apport annuel de l'énergie solaire interceptée par la Terre avec ces variantes hydrauliques, éoliens et la photosynthèse.

Jan Horst Keppler : Le coût de l'insertion d'ENR intermittentes à grande échelle dans les réseaux

Jan Horst Keppler est professeur titulaire à l'Université Paris-Dauphine, co-directeur du Master Énergie, Finance, Carbone (EFC) de l'Université Paris-Dauphine et chercheur au Centre de Géopolitique de l'Énergie et des Matières Premières (CGEMP).



Jan Horst Keppler : « Utopie concrète ». Je crois qu'en bon hégélien Ernst Bloch n'aurait pas dédaigné cette définition que je vais donner ici qui est : « L'utopie est le moteur de la dialectique de l'histoire. » « Le moteur de la dialectique de l'histoire » parce qu'il y a l'utopie qui s'écrase, qui se modifie, dans ce processus dialectique avec une réalité très retorse. Notre rôle est un peu de rappeler les utopistes à l'ordre avec ce travail sur l'intégration des renouvelables dans les systèmes électriques.

CHAIRE EUROPEAN ELECTRICITY MARKETS

DAUPHINE UNIVERSITÉ PARIS

Key Issues

The influx of significant amounts of intermittent renewables (wind, solar) creates two sets of interacting issues:

1. **The increasing disconnect of wholesale prices and costs (private and social)**
   - Issues are declining average prices, increased volatility, decreasing load factors (the disappearance of baseload) and profitability for conventional production, capacity reductions and investment delays, tension on the security of supply and the increasingly recognised need for capacity remuneration mechanisms (CRMs) and demand management (load shifting).
2. **The declining integrity of established market areas**
   - Issues are internal congestion with *de facto* regional market areas, spill-overs into neighbouring markets, more frequent saturation of interconnections, *decreasing* price convergence.

Together, the two sets of issues demand an in-depth discussion of the overall **market architecture** for European electricity for the next five years in parallel to further geographic integration.

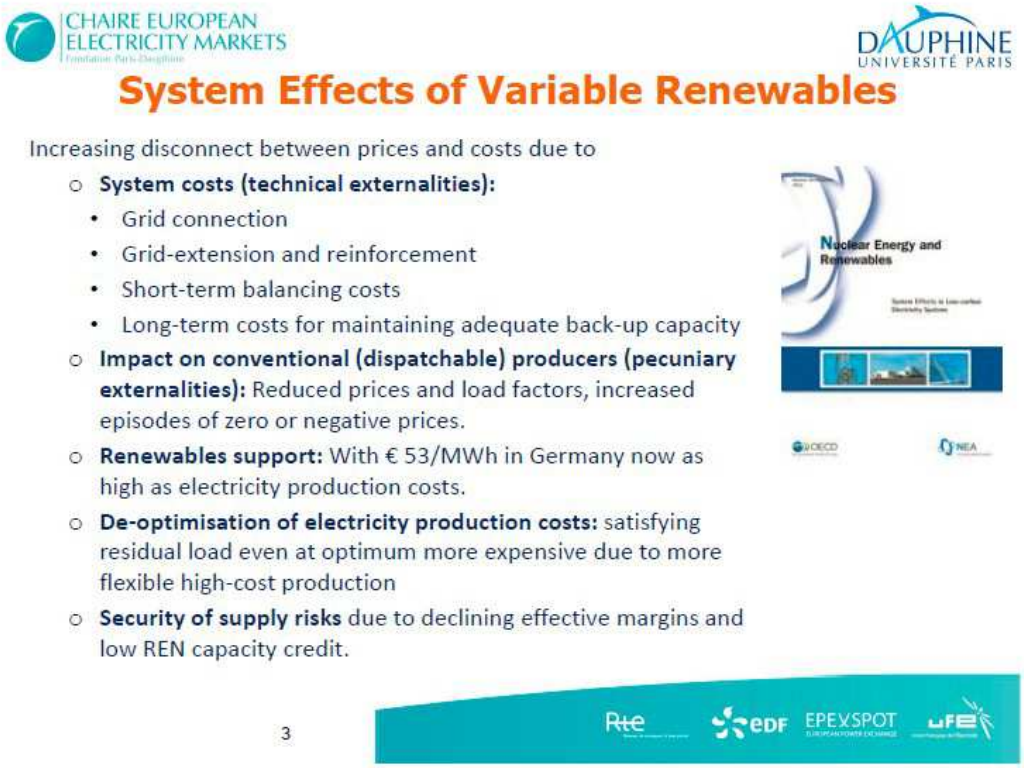
At stake is ultimately the claim that well functioning electricity markets are the most efficient manner to ensure least-cost pricing and adequate investment.

2

Rte EDF EPEXSPOT UFE

Nous avons une déconnexion croissante entre les prix de l'électricité et les coûts. Pour les coûts privés ce sont les subventions qui sont deux, trois, quatre fois plus élevées que les prix de marché aujourd'hui. Les prix sont aussi déconnectés des coûts sociaux au niveau du réseau. Nous en discuterons plus en détail. Les utopistes des renouvelables ont tendance à l'oublier de moins en moins.

Le second point est peut être plus spécifique pour les spécialistes de l'électricité : aujourd'hui, nous voyons à nouveau une divergence des marchés électriques à cause des renouvelables après que l'Europe a connu un mouvement de convergences pendant plusieurs années. Dans la première partie, les coûts de système vont se baser sur l'étude que Cédric a déjà mentionnée. C'est une étude qui était sortie à la fin de l'année dernière, intitulée "Nuclear Energy and Renewables" dont je suis l'un des deux coauteurs, l'autre coauteur étant Marco Cometto. Ce rapport a été écrit sous l'égide de l'agence nucléaire de l'OCDE.



Comment définir ce que nous appelons les coûts de système de l'intégration des renouvelables ?

D'abord il s'agit des surcoûts pour les connexions et les renforcements pour les extensions des réseaux, des coûts de rééquilibrage à court terme vu que la production à la fois éolienne et photovoltaïque est difficilement prédictible et, finalement, du paiement pour des capacités des réserves au cas où aucun des deux ne serait disponible pour garantir la sécurité des approvisionnements en électricité.

Nous avons également, et c’est peut-être la partie la plus intéressante de l'étude, un impact très important sur la compétitivité des autres énergies programmables donc surtout le nucléaire en France. Mais également le charbon et le gaz, et une dé-optimisation de la structure productrice ou de la structure de génération de l'électricité.

CHAIRE EUROPEAN ELECTRICITY MARKETS

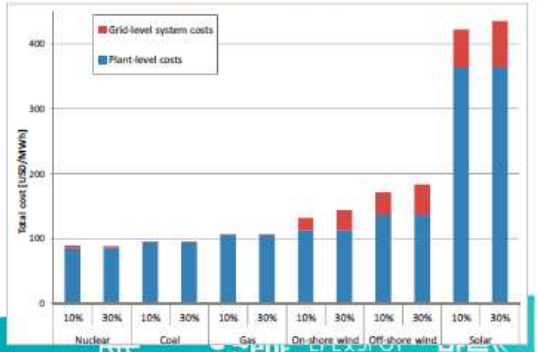
DAUPHINE UNIVERSITÉ PARIS

Total System Effects

System Costs at the Grid Level (average of 6 countries - USD/MWh)

	System Costs at the Grid Level [USD/MWh]											
Technology	Nuclear		Coal		Gas		On-shore wind		Off-shore wind		Solar	
Penetration level	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%
Back-up Costs (Adequacy)	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	6.03	7.38	5.71	7.67	15.88	18.04
Balancing Costs	0.53	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	4.19	8.34	4.19	8.34	4.19	8.34
Grid Connection	1.71	1.71	0.94	0.94	0.51	0.51	6.24	6.24	18.68	18.68	13.71	13.71
Grid Reinforcement and Extension	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	6.28	1.51	3.82	4.46	13.55
Total Grid-Level System Costs	**2.24**	**2.05**	**0.99**	**0.99**	**0.51**	**0.51**	**18.69**	**28.24**	**30.11**	**38.51**	**38.25**	**53.64**

- Six countries, Finland, France, Germany, Korea, United Kingdom and USA analyzed
- Grid-level costs for variable renewables at least one level of magnitude higher than for dispatchable technologies
  - Grid-level costs depend strongly on country, context and penetration level
  - Grid-level costs are in the range of 15-80 USD/MWh for renewables (wind-on shore lowest, solar highest)
  - Average grid-level costs in Europe about 50% of plant-level costs of base-load technology (33% in USA)
  - Nuclear grid-level costs 1-3 USD/MWh
  - Coal and gas 0.5-1.5 USD/MWh.



6

Vous avez là nos estimations faites sur des études disponibles. C'est une étude bibliométrique des coûts de système dans six pays de l'OCDE : la Finlande, la France, l'Allemagne, la Corée, le Royaume-Uni et les États-Unis. Il y a donc là des coûts de système, à la fois comme je disais les réserves nécessaires à cause d'intermittences, la nécessité d'équilibrage, pour la raison des mauvaises prévisibilités et finalement les investissements nécessaires dans les réseaux.

Vous voyez les totaux en bas : pour le nucléaire, autour de 2 $, disons pour faire simple autour de 2 € par mégawattheure. C'est un peu moins pour les charbons et les gaz. Les coûts de connexion au réseau du nucléaire sont plus élevés parce que les unités sont plus grandes que pour le charbon et pour le gaz. Et finalement les coûts sont beaucoup plus élevés, pour le vent onshore, le offshore et le photovoltaïque.

Le NIA et l'AIE parlent ici de la partie bleue. Et là, nous sommes d'accord, elle est aujourd'hui beaucoup plus basse, on ne sait pas exactement où elle est, mais divisée par deux, ça me va bien. Donc je suis vraiment d'accord. Là où nous ne sommes pas d'accord, où nous insistons effectivement, c'est sur la partie rouge.

Et donc ça c'est un premier résultat sur ces coûts de système. Nous avons également fait ici des études sur la France, à nouveau avec le solaire mais là ce sont les coûts totaux, de la génération d'électricité, le scénario de référence aujourd'hui, avec 30 % d'éolien terrestre, avec 30 % d'éolien offshore. Je crois qu'aujourd'hui l'éolien offshore on dirait plutôt qu'il est ici.

Et l'éolien terrestre serait légèrement plus bas et le PV est quelque part plus bas aussi. Mais ceci veut juste dire que tout scenario incluant une forte composante des renouvelables va effectivement augmenter le coût total du système. Ce qui inclut évidemment les coûts de production privés plus élevés, plus les coûts de système.

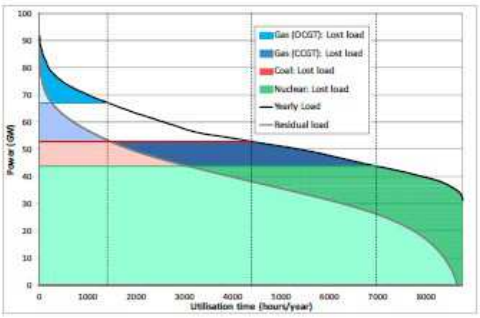
CHAIRE EUROPEAN ELECTRICITY MARKETS

Short-Term Impacts

DAUPHINE UNIVERSITÉ PARIS

At given capacity, renewables with zero marginal costs replace conventional technologies with higher marginal costs (gas, coal and nuclear):

- Reductions in electricity produced by dispatchable power plants (lower load factors, *compression effect*);
- Reduction in the average electricity price on wholesale power markets, *merit order effect* (up to 33% at 30% penetration);



		10% Penetration level		30% Penetration level	
		Wind	Solar	Wind	Solar
Load losses	Gas Turbine (OCGT)	-54%	-40%	-87%	-51%
	Gas Turbine (CCGT)	-34%	-26%	-71%	-43%
	Coal	-27%	-28%	-62%	-44%
	Nuclear	-4%	-5%	-20%	-23%
Profitability losses	Gas Turbine (OCGT)	-54%	-40%	-87%	-51%
	Gas Turbine (CCGT)	-42%	-31%	-79%	-46%
	Coal	-35%	-30%	-69%	-46%
	Nuclear	-24%	-23%	-55%	-39%
Electricity price variation		-14%	-13%	-33%	-23%

- Declining profitability especially for OCGTs and CCGTs;
- Insufficient incentives for new investment;
- Security of supply risks as gas plants close; HIS CERA estimate up to 110 GW no longer cover AC and 23 GW will close until end 2014.

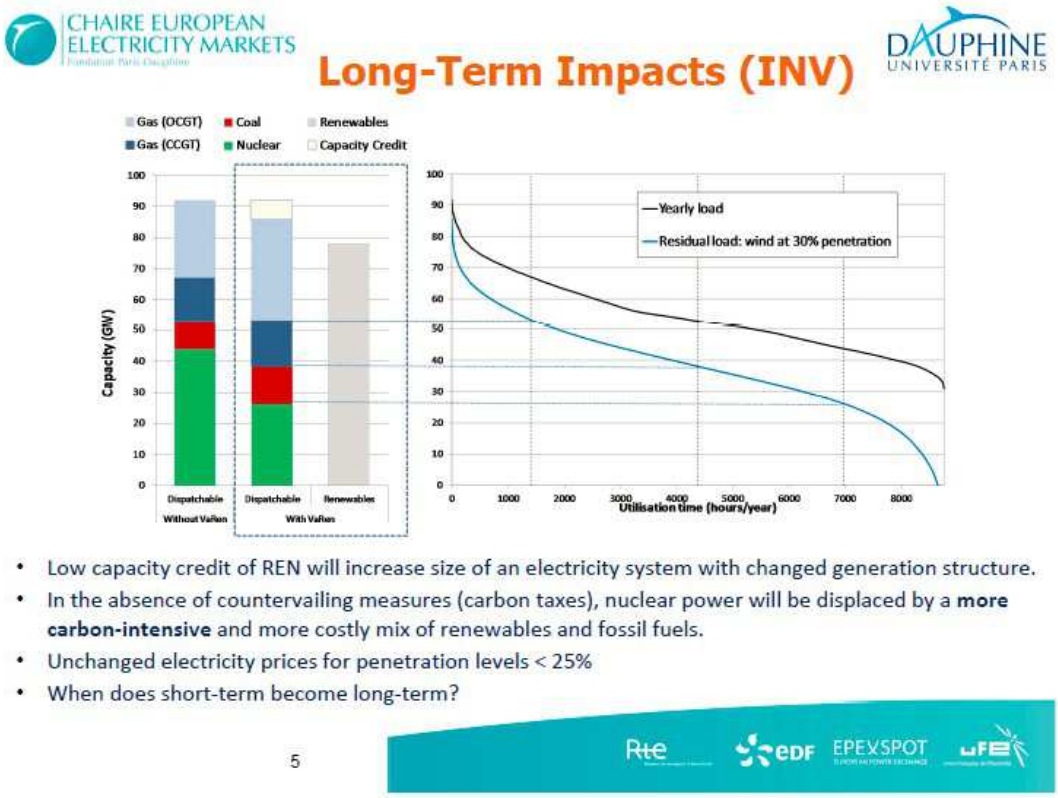
4

Rte EDF EPEXSPOT UFE

Quels sont les impacts à court terme sur les prix et les facteurs de charges dans les marchés où nous avons 30 % de productions renouvelables ? En Allemagne, pour l'éolien et le solaire, on est à 12-13 %. Donc ce n'est plus une utopie. Nous sommes dans le concret.

Vous perdez dans le court terme, à capacités installées identiques, une partie de votre production. C'est ce que vous voyez ici : les pertes de charge, de « load », qui sont pour le TAC, turbine à combustion, très importantes. 50 % déjà à 10 % de pénétration d'éolien, ou 40 % si c'est du solaire.

Nous avons effectivement une baisse de 15 % en Espagne et au Portugal des prix de l'électricité. Cela fait une baisse de la profitabilité. Nous voyons sur le marché que les turbines à gaz, les TAC et les CCGT sont en train de fermer à cause de ces effets-là.



Dans le long terme, les effets sont renversés dans le sens où c'est le nucléaire qui est le plus affecté, alors que les TAC et dans une moindre mesure les cycles combinés sont moins affectés ou plus positivement impactés.

Pourquoi cela ? Parce que le nucléaire se vend à un facteur de charges très important, ce qui serait incompatible avec cette courbe de charges résiduelle et donc sa part dans un mix optimisé va se réduire. Par contre vous auriez plus de moyens qui tournent bien à des « facteurs de charges » faibles et donc vous allez plutôt investir dans des turbines à combustion.

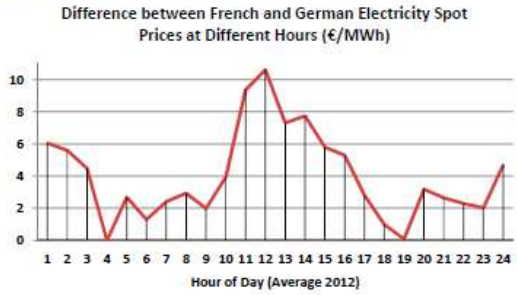
Le charbon reste à peu près pareil (en rouge sur la figure). Avec un scénario à 30 % d'éolien, nous construisons tout ça en éolien, et on a pratiquement besoin du système actuel en réserve, parce que les crédits de capacités sont effectivement très petits entre 5 et 10 %.

CHAIRE EUROPEAN ELECTRICITY MARKETS

DAUPHINE UNIVERSITÉ PARIS

Adequacy of Infrastructures

- Flows by intermittent renewables, in particular solar, lead to more frequent saturation of internal grids in Germany and external interconnections;
- More frequent saturation leads to increasing price differences and declining market efficiency (mutually advantageous trades not being made).



- **In 2012, with ca. 60 TWh traded on EPEX Spot France price differences between France and Germany (annual average of € 4,27/MWh, volume-weighted) amounted to losses for French electricity consumers of € 253 million per year.**
- **The average for first two months 2013 was € 8.63/MWh slightly higher than 2012 (€ 7.36/MWh neutralizing 6-11 February 2012).**

11

Rte EDF EPEXSPOT UFE

Pourquoi les renouvelables intermittentes contribuent-elles à une désintégration ? Là c'est le marché franco-allemand. Vous voyez les différences entre les prix allemands et français en moyenne sur l'année 2012, à différentes heures de la journée. Et vous voyez que les différences les plus grandes sont toujours à l'heure de midi. Pourquoi ? Parce que quand la production du PV allemand est au plus fort, alors les interconnexions France-Allemagne sont saturées et les prix dans les deux marchés divergent. Cet exemple illustre que les renouvelables intermittentes créent des problèmes dans la gestion de l'intégration des marchés européens. Une solution serait bien évidemment de construire plus d'interconnexions.

CHAIRE EUROPEAN ELECTRICITY MARKETS

DAUPHINE UNIVERSITÉ PARIS

Conclusion

Issues highlighted not only offer challenges but also opportunities:

1. **The increasing disconnect of wholesale prices and costs (private and social)**
   - The need for new flexibility and capacity instruments allowing for the integration of short-term demand-side and (perhaps) energy efficiency measures. Intraday development step in the right direction but may not be enough (specific demand-side products?).
2. **The declining integrity of established market areas**
   - Better management of existing infrastructures (flow-based mechanism); linking of capacity markets may require return to reserved capacity or priority dispatch; more attention and better communication on the need for adequate investment in new transport infrastructures (internal and external).

Awareness is increasing and discussions are under way, much of it however in a piecemeal manner looking for quick fixes and stop-gaps.

Overall understanding of new needs of electricity market participants, producers and customers, as well as fast-changing business models in the new environment will be key to success.

12

Rte EDF EPEXSPOT UFE

En conclusion, attention à ne pas négliger ces coûts de système dans les débats.

Alain Nadaï et Olivier Labussière : Le paysage éolien, décentralisation énergétique et paysagère

Alain Nadaï est chercheur au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired).
Olivier Labussière est Maître de Conférences en géographie et aménagement - Institut de Géographie Alpine – PACTE.
À paraître dans « Les paysages de l'électricité » (Peter Lang, coll. « Histoire de l'énergie »).

Introduction

Le processus international de Kyoto et les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont permis d'imposer progressivement la réalité d'un réchauffement d'origine anthropique aux conséquences économiques et sociales possiblement majeures (GIEC, 2007). Les scénarios tendanciels et d'adaptation au changement climatique sont multiples et restent débattus mais traduisent certaines tendances lourdes, dont la nécessité d'une maîtrise de la demande et la diversification du bouquet énergétique vers les énergies renouvelables (EREC & Greenpeace, 2007 ; AIE, 2007 et 2008).

Du fait de leur caractère décentralisé, ces énergies (éolien, solaire, énergies marines, biomasse, biocarburants) génèrent des liens perceptibles et multiples aux ressources énergétiques. Elles induisent une recomposition de notre lien socio-technique à ces ressources et contribuent à une prise de conscience des conséquences, notamment environnementales, de notre demande d'énergie. Le caractère décentralisé des nouvelles énergies met les décideurs face au défi de résoudre des enjeux qui sont à la fois énergétiques et spatiaux, appelant ainsi à revisiter nos liens aux paysages.

La politique de développement de l'éolien en est un exemple. De par leur présence et leur effet d'échelle, les éoliennes suscitent d'importantes recompositions paysagères qui invitent à réviser nos représentations et nos pratiques sociales des paysages. L'examen détaillé des processus de planification et/ou de mise en site des nouvelles énergies permet de mieux comprendre les processus sociaux qui président à la constitution de ces nouveaux « paysages de l'énergie » et de les relier à la politique d'ouverture et de libéralisation du secteur de l'énergie dans l'Union européenne, en ce qu'elle sous-

tend le déploiement de politiques des énergies renouvelables dans la différents États-membres.

Nous nous intéressons dans cette contribution à la portée des changements de paysages et leur relation à la libéralisation du secteur de l'énergie. L'analyse soutient que l'éolien soulève, en France, un double enjeu de décentralisation, de la politique de l'énergie et de la politique du paysage. Elle procède en trois temps.

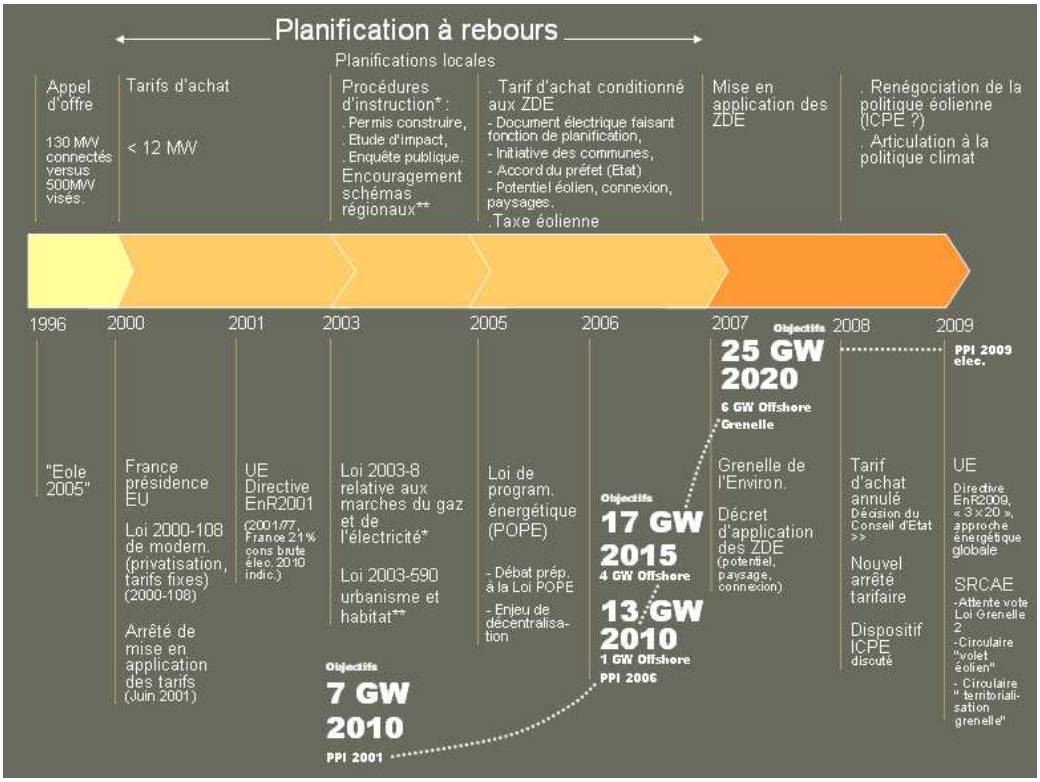


Illustration 1: Chronogramme de la politique éolienne française (schéma des auteurs).

Nous analysons dans un premier temps les enjeux qui ont jalonné le développement de la politique éolienne française, pour montrer que ceux-ci renvoyaient à un enjeu de délégation de compétences et de pouvoir – du centre vers la périphérie et de l'État vers des acteurs non étatiques – concernant les autorisations de projets éoliens et leur planification spatiale. Dans un second temps, nous pointons l'inévitable dimension de paysage de tout projet de développement éolien et discutons la capacité de la tradition française de protection des paysages – une tradition formelle, visuelle et centralisée, que nous appelons « paysage d'État » – à prendre en compte et réguler la présence éolienne dans le paysage. La dernière partie montre à partir des résultats de deux cas d'études en quoi la décentralisation énergétique, même contrariée, qui est à l'œuvre au travers du développement éolien, appelle une décentralisation de notre politique du paysage.

Éolien et décentralisation énergétique

L'Union européenne a initié un processus politique et réglementaire de redéploiement énergétique et climatique depuis la fin des années 1990. En près d'une décennie, le passage du Livre Blanc (UE, 1997) au Programme européen sur le changement climatique, aux directives « électricité renouvelable » (UE, 2001) et « biocarburants » (UE, 2003a), puis aux « 3 x 20 » de la directive « énergies renouvelables » (UE, 2009a) traduit l'articulation croissante entre politique de l'énergie et politique climatique dans l'Union européenne.

Outre que cette mise en contexte progressive des politiques d'offre énergétique se traduit par leur ouverture à des enjeux plus territorialisés, comme l'atteste par exemple le modèle de plans d'action nationaux qui accompagne la directive de 2009 (UE, 2009b), elle est aussi étroitement liée à un processus de libéralisation du secteur de l'énergie (gaz et électricité) (UE, 1996 & 2003b), mis en œuvre à partir de juillet 2007.

Le « troisième paquet énergétique » s'articule autour du principe d'une concurrence loyale entre les différents types d'énergie. La libéralisation du marché de l'électricité accompagnée d'une internalisation des externalités est supposée, selon ces principes, mettre fin aux subventions cachées aux énergies conventionnelles et favoriser le décollage des renouvelables. Du niveau européen au niveau local, la mise en œuvre de cette politique voit cependant le cadrage économique initial concurrence/externalité se reformuler en termes de décentralisation des politiques énergétiques au niveau national, d'enjeux de planifications territoriales et d'acceptabilité des nouvelles infrastructures privées de production d'énergie (e.g. éoliennes, panneaux ou centrales solaires).

En transposant progressivement ce cadre réglementaire, la France a découplé la production électrique de la gestion de son réseau (RTE), en même temps qu'elle a initié un processus de diversification de ses moyens de production d'électricité, notamment au travers de l'adoption de tarifs d'achat de l'électricité issue des renouvelables (FR, 2000 ; FR, 2003), de la réforme de sa politique énergétique (loi POPE : FR, 2005) et du Grenelle de l'Environnement (COMOP10, 2007 ; FR, 2008 ; FR, 2009c et a). Il en résulte un double objectif d'augmentation de la production des EnR (maintien de l'éolien, soutien au solaire et création d'un fond chaleur), d'abord au travers de politiques énergétiques « sectorielles » (tarifs éoliens, puis solaires) puis de l'intégration de leur développement dans une démarche à « haute qualité environnementale». Ces évolutions marquent un tournant culturel vis-à-vis d'une gestion traditionnellement centralisée et structurée autour du choix de l'énergie nucléaire. En ce sens, elles témoignent de l'émergence progressive d'une décentralisation de la politique énergétique et posent avec acuité la question de sa gouvernance territoriale.

Les modalités d'émergence de la politique éolienne française depuis le milieu de la décennie 1990 attestent des enjeux de décentralisation

qui sont à l'œuvre (cf. Figure 1). Après quelques années d'un développement éolien peu concluant dans le cadre du système d'appel d'offres publics « Éole 2005 » (1995-2000), la France a progressivement changé son cadre politique national pour des tarifs d'achat, en décembre 2000 (FR, 2000), et des zones de développement éolien, en juillet 2005 (applicable à partir de juillet 2007) (FR, 2005). Si ce nouveau cadre a permis un décollage progressif de la capacité éolienne installée qui atteint aujourd'hui 4,6 GW, son élaboration a vu l'énergie éolienne susciter une véritable controverse – on se souvient des articles de presse dénonçant des « amendements éolicides » – au cours du débat parlementaire relatif à la nouvelle Loi de Programmation Énergétique, dite Loi POPE. L'énergie éolienne occupa soudain le devant de la scène dans un débat qui portait sur le futur de l'ensemble du mix énergétique de la France, auquel elle ne contribuait pourtant que de manière infinitésimale. L'analyse détaillée de ce débat parlementaire et des positions successivement défendues par ses protagonistes a montré que la question éolienne, au-delà des enjeux explicitement invoqués de paysage et d'opposition locale, posait le problème d'une possible décentralisation de la politique énergétique (Nadaï, 2007a) : qui, de l'État central, des régions, des départements ou des communes, pouvait ou devait autoriser l'implantation des parcs éoliens ? Le combat a été mené au travers de la manipulation d'un ensemble de variables qui déterminent le poids de l'Etat central dans la planification ou la mise en site des projets éoliens. Ces variables ont été : la taille des parcs éoliens (par l'intermédiaire de seuils de puissance pour le bénéfice des tarifs), l'attribution de pouvoir de décision (institutions étatiques ou non), l'échelle territoriale pour la prise de décision (nationale, régionale, départementale ou locale) et le contrôle du public sur le développement éolien (par exemple le droit de veto ou le pouvoir consultatif des commissions locales, la taille et les seuils de capacité pour le déclenchement d'étude d'impact et d'enquête publique, etc.). Deux lectures parlementaires débouchèrent sur des propositions successives et contrastées en la matière, allant d'une décentralisation totale de ce pouvoir, à sa centralisation au niveau national, pour converger, en commission mixte paritaire, vers un compromis, avec l'adoption d'un dispositif de « Zone de Développement Éolien » (ZDE) stipulant que les communes et les intercommunalités doivent se grouper pour proposer à l'approbation des préfets des zones dans lesquelles elles souhaitent voir se développer de l'éolien. Le soutien financier de l'Etat au travers des tarifs d'achat est dès lors conditionné à l'inscription des projets dans ces zones.

Dans l'esprit, la ZDE renouvelait la territorialisation des parcs éoliens, qui, depuis l'adoption des tarifs d'achats en 2000, avait manqué d'un cadre de planification. Elle tient compte des enjeux de connexion au réseau, d'environnement et de paysage, et se présente comme un dispositif ouvert à des acteurs non étatiques, ce qui la met au plus près des enjeux locaux et territoriaux de l'éolien. Dans les faits, sa portée paraît plus modeste. Tout d'abord, la ZDE n'a d'autre statut que celui de « document électrique » destiné à la gestion des tarifs d'achats du

KWh éolien. Il ne s'agit pas, comme pour les dispositifs analogues allemand ou danois, de documents d'urbanisme adoptés et validés par les communes dans le cadre de leurs institutions de démocratie locale. La ZDE fait donc figure d'exception française, témoignage d'une décentralisation contrariée de la politique énergétique.

Le décalage temporel des ZDE par rapport à l'adoption des tarifs d'achat traduit une planification à rebours, symptomatique de la difficulté de la France à décentraliser sa politique éolienne pour la mettre en politique au niveau local. Entre 2000 et 2007, la tâche fut extrêmement ardue pour les administrations déconcentrées, les collectivités territoriales et les populations locales : très peu de machines étaient présentes sur le territoire national et les tarifs d'achat français venaient d'être adoptés sans qu'aucun dispositif de planification éolien n'ait été mis en place. Les développeurs couraient les campagnes à la recherche des meilleurs sites éoliens, gagnant la confiance des élus par la promesse de bénéfices financiers considérables liés à l'implantation de machines (taxe éolienne, revenus fonciers). Les outils destinés à venir en appui aux administrations locales (permis, étude d'impact, guide de bonnes pratiques, circulaires, etc.) sont apparus progressivement, alors que, de son côté, le pouvoir politique semblait donner le change à l'Union européenne en annonçant des objectifs éoliens croissants. Si ces outils ont aidé les administrations locales dans l'instruction des projets, ils n'ont pas vraiment répondu aux délicates questions de planification territoriale et aux enjeux de politique locale. Sur la période 2000–2007, les services déconcentrés de l'État (DDE, DIREN, DRIRE, SDAP) ont constitué des plates-formes inter-administratives *ad hoc* avec la volonté de faire face à la vague des projets éoliens à instruire. Un vaste mouvement d'expérimentations s'est initié : en l'absence d'une doctrine nationale, chaque administration a élaboré sa planification éolienne pour maîtriser la répartition des aérogénérateurs sur son territoire. Entre 2000 et 2006, 46 documents de planifications éoliennes locales ont été élaborés par les régions, départements, et autres entités territoriales. Ces planifications ont souvent été fondées sur une logique zonale où prévaut une vision administrative du paysage. Elles résultèrent d'une accumulation de contraintes règlementaires (paysages protégés, patrimoine classé, avifaune, covisibilité avec les axes majeurs de circulation, etc.) et conduirent bien souvent à la production de cartes dont les secteurs sans protections recensées étaient privilégiés pour l'implantation d'éoliennes. Ces planifications par zonage ont eu des effets contre-productifs, notamment en densifiant sans réel principe de cohérence des secteurs réputés favorables. En 2007, la ZDE arriva donc sur un terrain de projets constitués, sinon déjà implantés. Nombreuses furent alors les « ZDE de projet », consistant en un recyclage (par le développeur, le plus souvent) de dossiers d'étude d'impact des projets individuels sans réel apport planificateur.

La France a donc, de par une difficulté à décentraliser sa politique énergétique, procédé à rebours. En lançant des tarifs d'achats sans dispositif de planification, elle a mis son administration locale en

situation d'inventer chemin faisant, et sans cadrage politique, des modalités de planification éolienne.

Processus éolien, processus de paysage

Le processus de développement et de planification des projets éoliens n'en reste pas moins un processus de paysage. À l'instar du projet de paysage, le projet éolien prend place dans un site pour en remodeler le paysage. La matérialité de l'éolienne, par son effet d'échelle, désigne soudainement le paysage environnant et soulève la question de son devenir. Elle constitue un prisme au travers duquel le paysage est réinterprété. Par les mobilisations collectives qu'elles suscitent, ces implantations font émerger le paysage comme une catégorie publique, instrumentale et de l'action. Le paysage est partagé. Il permet de raisonner, débattre, mettre en cohérence, défendre ou empêcher les implantations. Au-delà des implantations, c'est bien souvent l'identité d'un site, d'une région, d'un pays qui est débattue au travers du paysage et, dans le cas de la France tout au moins, la capacité de l'État à garantir le patrimoine paysager.

La France se caractérise aussi par une tension particulièrement forte de ce point de vue, du fait d'un contexte double. D'une part, le débat sur le paysage s'y est progressivement déplacé de la question de la représentation à celle du projet. Ouvert au cours des années 1970, dans un mouvement de réexamen d'un territoire marqué par un développement sans principe de cohérence (Chabason, 1995 ; Dagognet et *al.,* 1982), ce débat a cherché à fonder la spécificité d'une politique du paysage distincte de la politique de l'environnement qui, elle, était basée sur un principe de préservation (Roger, 1997). Les stratégies déployées ont été multiples, incluant notamment l'affirmation de la dimension culturelle du paysage (e.g. dimension picturale/*veduta*). Des critiques ont pointé les limites de cette assimilation du paysage à une représentation et de sa séparation d'avec le pays ou l'environnement (Berque, 1995 ; Dewitte, 2001 ; Hirsch et O'Hanlon, 1995 ; Nadaï, 2007b). Elles ont progressivement mis l'accent sur la dimension politique du paysage, sa dimension de projet et les enjeux liés aux pratiques de sa production, notamment en regard des enjeux de préservation patrimoniale (Trom, 1996 ; Besse, 2001 ; Dewarrat et *al.,* 2003 ; Nadaï, 2005 ; Pousin, 2001). Ce passage de la protection au projet est aujourd'hui un enjeu pratique et politique, avec l'adhésion de la France à la Convention européenne du paysage (CEP) (Conseil de l'Europe, 2000), la traduction de cette dernière dans le droit français. La CEP met non seulement l'accent sur les paysages du quotidien et la concertation, mais aussi sur la dimension de gestion et de développement qui doit être au cœur des politiques du paysage. Sous le terme de « *just landscape* », elle est perçue par certains analystes comme une rupture de fond dans les politiques du paysage, du fait d'un passage qu'elle favoriserait d'une gestion normative à une gestion collective des paysages (Olwig, 2007). C'est, en quelque sorte, cette possibilité pour une politique de passer de la protection au projet et à sa mise en politique au niveau local qui est mise à l'épreuve au

travers du déploiement des politiques éoliennes. La circulaire éolienne de mises en œuvre des ZDE (FR, 2006), même si elle reste très générale et indicative dans ses intentions, fait référence à la Convention d'Aarhus sur l'information et la participation des citoyens et à la Convention européenne du paysage.

Dans les faits, cependant, cette épreuve doit s'articuler à une approche de la protection des paysages qui s'enracine dans une tradition administrative de gestion des monuments et de leurs abords remontant au début du XXe siècle. Cette tradition, qui met l'accent sur la dimension visuelle, s'ouvre difficilement à une mise en politique. Trois concepts sont à son fondement : le « patrimoine » (i. e. les sites et les monuments considérés comme faisant partie du « bien commun » national), les « covisibilités » (i. e. la visibilité d'un projet depuis un monument ou un site protégés) et les « abords » (i. e. la perception d'un monument est conditionnée par son environnement immédiat et manifestée par des zonages géométriques). Cette tradition a jeté les bases de ce que l'on peut appeler un « paysage d'État », au sens d'une forme d'objectivation institutionnelle du paysage, étendue depuis les années 1970 au travers d'un corpus juridique diffus dans les lois sur l'environnement, l'architecture et l'urbanisme. Son développement a conduit à des traductions successives de l'abord sous forme de servitude d'utilité publique autour des éléments patrimoniaux. Plus ou moins contemporaines des « directives paysagères », ces zones (e. g. ZPPAU, ZPPAUP) ont connu un développement beaucoup plus important. Si leur définition a évolué d'une visée essentiellement protectrice à une approche plus ouverte (e. g. cahier des charges, enquête publique), cet arsenal législatif n'en témoigne pas moins de l'importance accordée à l'approche visuelle et à sa délimitation en plan comme mode de traduction.

Formellement, les zonages délimitent par leur tracé en plan un paysage d'abords régi par la géométrisation du regard. Le tracé a force de règle dans de nombreuses situations. Il détoure l'espace, le sous-territoire, au sein duquel certaines branches de l'administration, comme celle en charge du patrimoine et des paysages, sont investies d'un pouvoir de véto dans les procédures. Lorsque ce n'est pas le cas, ce regard d'Etat s'adosse sur les critères de covisibilité pour faire exister l'abord comme élément de paysage : « C'est une question de regard. Du monument, on regarde ce qui se passe autour et, des alentours, on regarde ce qui se passe sur le monument, ça marche ensemble… un bijou et son écrin. »[17] La logique qui sous-tend la traduction en plan de ce regard reste ainsi fondamentalement concentrique (le périmètre, le cercle, le rayon) et confère à la géométrie de l'espace – organisée à partir des multiples centres que sont les éléments de patrimoine – le pouvoir de fonder les décisions administratives en matière de paysage : « On voit ou l'on ne voit pas. »[18] Pour autant, les formes concentriques qui le sous-tendent n'acquièrent de valeur que si elles s'accordent avec l'évaluation de la situation et de ses singularités.

17 Citation d'un Service départemental de l'Architecture et du Patrimoine, interview des auteurs.
18 *Idem.*

Ce « paysage d'État », ainsi constitué de figures concentriques irradiant une protection d'État, est soudainement mis en relation – et recomposé dans sa dimension visuelle fondatrice – par les covisibilités lointaines qu'imposent les éoliennes. En ce sens, la décentralisation portée par l'éolien, contrariée dans sa traduction en tant que politique énergétique, trouve un nouveau plan d'épreuve dans la gouvernementalité du paysage. En d'autres termes, la France ne peut soutenir conjointement sa politique du paysage et sa politique éolienne sans mettre les fondements de la première à l'épreuve des nouvelles relations visuelles qu'autorise la seconde.

Décentralisation énergétique, décentralisation paysagère

L'éolien pointe ainsi le nécessité de renouveler une tradition administrative de gestion des paysages, en quittant la logique de réduction des impacts pour réfléchir, plus positivement, en termes de création de paysages et de démarches de projet. Plus qu'un enjeu d'aménagement physique de l'espace, il s'agit de trouver les moyens d'accompagner les recompositions sociales nécessaires à la définition de paysages éoliens partagés.

Les études de cas locales montrent que la situation est devenue particulièrement critique dans l'intervalle qui a séparé l'adoption des tarifs d'achat (juin 2001) de celle des premières ZDE (juillet 2007), alors qu'aucune alternative au « paysage d'État » n'était proposée. De nombreux départements français ont élaboré leur propre planification éolienne, en procédant par essai-erreur, quelquefois à l'occasion de la mise en œuvre de nouvelles ZDE. Des cas de planification innovante ont favorisé l'émergence de nouvelles pratiques et de nouvelles représentations du paysage, comme dans la Narbonnaise, en Aveyron ou en Eure-et-Loir (Labussière et Nadaï, 2011 – à paraître ; Nadaï et Labussière, 2009 ; 2010 ; en soumission). Ces cas d'études illustrent la capacité des processus de planification à mettre en suspens les zonages administratifs et les normes visuelles en place pour inventer de nouvelles catégories paysagères, cohérentes avec les entités naturelles comme avec les vécus paysagers (Labussière, 2011 – à paraître ; Nadaï, 2009). Ces évolutions ne se font certes pas sans tensions. Nous illustrons ci-après cette décentralisation paysagère sur la base de deux exemples.

Quitter la Cathédrale

Le département d'Eure-et-Loir disposait en 2007 d'une des plus importantes capacités éolienne autorisée et en service en France (respectivement 444 MW et 231 MW). Le paysage de Beauce le compose en majeure partie. Il s'agit d'un paysage d'agriculture industrielle, visuellement ouvert et qui, à l'exception de la Cathédrale de Chartres et de ses abords, n'a jamais fait l'objet de qualification patrimoniale de la part de l'administration française. Ce cas d'étude montre comment le développement éolien a suscité la remise en

question de cette protection visuelle focalisée sur la cathédrale de Chartres[19].

Plus exceptionnelles que les traditionnels zonages de protection, mais basées sur les mêmes principes, quelques « directives paysagères » se sont portées au cours des années 1990 sur la protection de grands sites, dont celui de la cathédrale de Chartres. La « directive Cathédrale » visait à protéger les vues sur et de ce monument, en imposant des zones de protection patrimoniales rayonnant, tel un paysage visuel, à partir du monument sur sa campagne environnante. Elle est restée à l'état de projet, mais n'en a pas moins percolé les documents d'urbanisme, imposant ses cônes de covisibilités comme autant de zones à ne pas développer (cf. Figure 2). Les éoliennes, en imposant une présence visuelle décentralisée équivalente en taille à celle de la cathédrale, ont produit un véritable coup d'État, appelant l'administration à se décentrer de son approche patrimoniale pour expérimenter de nouvelles approches du paysage visuel.

À vrai dire, ce coup d'État a opéré dans un premier temps au travers d'une instruction administrative fondée sur des photomontages de futurs parcs éoliens (fournis par les développeurs) et, en dépit de ses doutes, aveugle à la présence et aux rapports d'échelles engendrés par les éoliennes industrielles dans le paysage. La préoccupation première restait pour l'administration les covisibilités avec la Cathédrale, seul élément patrimonial de ce paysage et motif opposable d'arrêt potentiel des projets.

19 Pour une analyse approfondie de ce cas d'étude, voir : Nadaï et Labussière, en soumission.

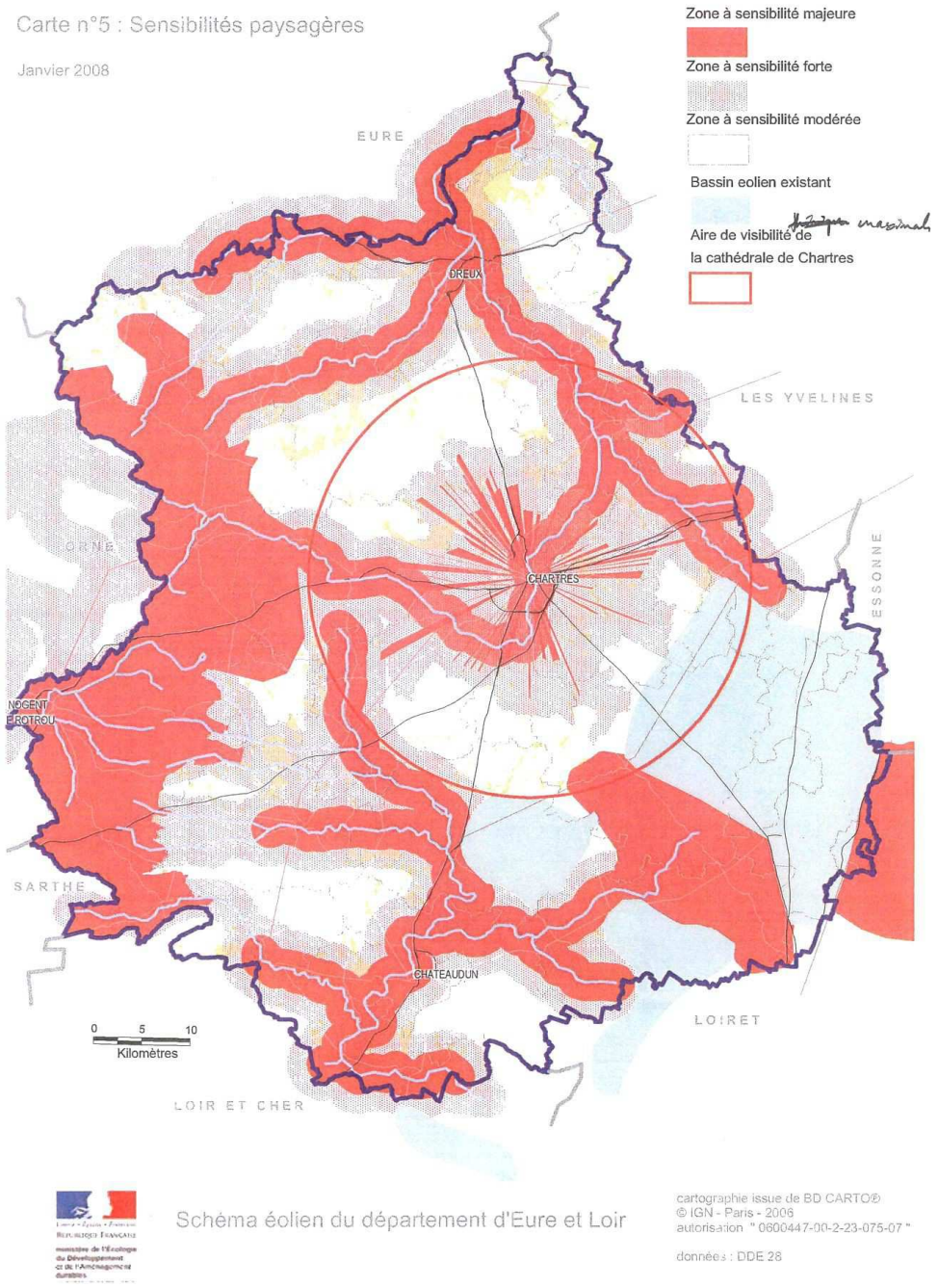


Illustration 2: Schéma éolien du département d'Eure-et-Loir, carte des « sensibilités paysagères » présentant les cônes visuels de protection de la Cathédrale de Chartres en son centre (janvier 2008).

En 2005, l'installation des premiers parcs révèle aux services déconcentrés de l'État l'aveuglement et l'erreur qui fut le leur pendant près de cinq années. Deux études témoignent de la prise de conscience de l'administration locale au cours de l'année 2005 (Diren, 2005 ; Bonneaud, 2006). La première pointe l'émergence d'une « Beauce éolienne » en s'appuyant sur une cartographie de l'impact visuel des parcs éoliens approuvés et en cours d'instruction : « Il ne restera quasiment plus de secteur de Beauce d'où on ne verra pas d'éoliennes. »[20] La seconde affine ce constat en analysant des exemples de ratés : perturbation des silhouettes des villages, présence écrasante d'éoliennes depuis l'intérieur de certains bourgs, parc sans organisation. Plus que des parcs isolés, c'est le mode même de régulation de l'éolien qui est rétrospectivement perçu comme inopérant. « L'Eure-et-Loir a essuyé les plâtres […] c'est l'exemple repoussoir dont il faut tirer les leçons. »[21] Le photomontage, même normalisé de manière à éviter les biais techniques (focale, nombre de vues, etc.), a donc été le vecteur – le Cheval de Troie – d'une capture du « paysage d'État ». Il fut aussi le symptôme de cette approche du paysage, dans sa prétention à instruire une situation sur la base d'un support visuel et à partir d'une perspective centrée sur la Cathédrale.

L'administration réagit en tentant d'analyser ses ratés et de retrouver des principes d'évaluation et de jugement sur la présence éolienne. Ce travail est réalisé dans les pas des développeurs, c'est-à-dire dans un retour des instructeurs sur le terrain, photomontages en main, pour faire l'expérience en situation des perspectives visuelles représentées dans ces visuels. La difficulté est de saisir, dans un espace sans évidence monumentale, les modes de présence des éoliennes et de les constituer en un paysage visuel vis-à-vis duquel l'intervention de l'État soit légitime (cf. Figure 3). Au-delà des multiples outils qui sont déployés (développement d'indicateurs de saturation visuelle, sévérisation du schéma de planification éolienne, observatoire photographique, portage politique par le préfet), l'analyse montre une administration qui se décentralise au sens où elle quitte doublement le « paysage d'État ». En quittant le point de vue de la Cathédrale, elle réinvente un mode de partage de la présence des éoliennes, non plus selon les seuls principes réglementaires de la géométrie des relations visuelles, mais selon une logique de la sensation de cette présence. Par exemple, la sensation de « respiration » – dixit l'administration – correspond à un grand paysage où la pression visuelle des éoliennes s'allège. Si ces sensations (densité, contraste, intimité, etc.) sont précieuses pour penser l'instruction des projets éoliens vis-à-vis d'une perception d'ensemble du paysage, la difficulté est de trouver, à travers elles, une légitimité à agir, notamment dans un département où l'éolien ne suscite pas d'opposition locale : « De quel droit, nous les administrations, on va au-delà du grand paysage où on est légitime ? […] On a toujours un doute sur notre légitimité à parler à la place des gens qui habitent la Beauce […] tous les retours qu'on a [il n'y a]

20 Rencontre avec Paysagiste-Conseil de la Région Centre, le 6 mars 2008.

21 Rencontre avec la Diren Centre, le 6 mars 2008. La Beauce couvre en effet les départements de l'Eure-et-Loire, du Loir-et-Cher et du Loiret, soit près d'1/8 de la Région Centre.

aucune opposition à voir de l'éolien s'implanter en Beauce. »[22] Ceci conduit l'administration à se resserrer progressivement sur le « grand paysage » – faisant émerger « la Beauce » comme patrimoine et paysage d'État –, car cette échelle lui permet d'intervenir au nom du « bien commun » : « Personne n'en parlera [du « grand paysage »], donc on est légitime. »[23] Ainsi, si une gouvernementalité semble bien se recomposer à cette occasion, le débordement visuel des éoliennes n'en semble pas moins faire émerger une décentralisation, au sens d'un déplacement qui va de la Cathédrale et du géométrique vers la Beauce et la sensation.

Embrasser les massifs

Le développement éolien a été amorcé en Aveyron en 1999, alors qu'aucune planification n'était adoptée[24]. Pour faire face à l'arrivée croissante des projets, les administrations se sont organisées en pôle éolien interservices dans le but d'élaborer une réflexion cadre. Initiée en 2000, cette dernière fut officialisée en 2005. Le document produit révèle une tradition administrative de gestion du paysage, consistant à réduire la problématique éolienne à une logique de zonage. Ce processus passe par plusieurs opérations : définition de catégories paysagères en lien avec la morphologie du paysage et la valeur patrimoniale, addition cartographique de couches de contraintes réglementaires, introduction de zones de protection « tampons » visant à compenser l'insuffisance des protections réglementaires vis-à-vis de la portée visuelle exceptionnelle de l'éolien. Ce glissement progressif d'une logique de paysage à une logique zonale (délimitant des zones favorables, peu favorables ou défavorables) permet de rationaliser et d'objectiver le jugement des services instructeurs sur les projets éoliens. La question n'est plus en effet « Quels paysages éoliens voulons-nous ? », mais « Où voulons-nous des éoliennes ? ».

Les premiers développements de parcs ont cependant rapidement pris en défaut cette logique zonale sur plusieurs aspects tels que : la non-maîtrise des densités d'éoliennes dans les zones jugées favorables, la non-maîtrise des covisibilités entre les éoliennes situées en zone favorable et les zones défavorables (souvent patrimoniales), ou encore la rapide obsolescence des choix paysagers par rapport aux évolutions technologiques rapides de l'éolien (montée en taille et en puissance, capacité à valoriser des zones de vent jugées non rentables quelques années auparavant). Outre les difficultés rencontrées par l'administration, cette planification a favorisé, par ses effets non maîtrisés, l'émergence d'une opposition locale à la politique et à la planification éoliennes. Cette opposition est devenue d'autant plus vive qu'elle ne se voyait offert, comme voie d'expression, que la possibilité de réagir à des projets ou des planifications stabilisés dans le cadre de procédures administratives.

À partir de 2006, l'arrivée des ZDE couplée à un changement de préfet a été l'occasion d'un tournant. La mise en place des ZDE a constitué pour l'administration un moyen d'intervenir sur des zones où les

22 Rencontre avec une administration locale, le 3 octobre 2008.

23 *Idem.*

24 Pour une analyse approfondie de ce cas d'étude, voir : Nadaï et Labussière, 2009.

projets éoliens s'étaient accumulés, pour tenter de constituer des bassins éoliens *a posteriori* et faire naître une cohérence entre les projets existants et à venir. Il s'agissait en quelque sorte d'une logique de rattrapage des effets incontrôlés issus de la planification par couches. Cependant, la ZDE a aussi fonctionné comme un dispositif novateur grâce à l'implication du PNR des Grands Causses et à un portage politique volontaire de la part du préfet, en direction des élus. D'une part, le PNRGC s'est engagé dans l'accompagnement et le soutien aux intercommunalités dans l'élaboration des ZDE, incitant au travers d'une charte et d'un soutien financier associé, au regroupement en ZDE de massifs couvrant une échelle de planification cohérente avec celle des covisibilités éoliennes. Il s'agissait là de thèmes défendus par le PNR dès 2000, à l'occasion des réunions de travail sur la première planification éolienne. Cependant, le processus était alors dominé par certaines administrations locales et n'avait pu prendre en compte l'échelle des massifs qui supposait de s'affranchir en partie des limites administratives. D'autre part, le préfet a exigé que tous les dossiers de ZDE soient remis en préfecture et instruits avant de reprendre l'instruction de permis éoliens.

Bien que ce processus ait été encore en cours à la fin de cette étude de cas, les avancées analysées montrent que la réflexion sur le paysage a pu prendre à cette occasion des distances par rapport aux seuls zonages réglementaires pour interroger la valeur des paysages du quotidien. Le processus ZDE a aussi fourni une occasion très indirecte de mise en politique d'une partie de l'opposition éolienne. Certaines communautés de communes ont dû à cette occasion prendre conscience des positions des associations d'opposants qui s'étaient multipliées, si ce n'est les prendre en compte.

Le cas de l'Aveyron illustre à la fois les aléas d'une approche quasi exclusivement administrative de la planification locale et le rôle d'ouverture et de renouvellement que peut avoir la mise en œuvre des ZDE. Le rôle central joué par des acteurs non étatique au fil de ce processus atteste d'une décentralisation par rapport au paysage. Celle-ci est ici encore impulsée par les covisibilités éoliennes étendues (échelle des massifs), mais à la différence du cas l'Eure-et-Loir, elle est aussi largement favorisée par le processus de mise en œuvre des ZDE.

Conclusion

Le développement de l'énergie éolienne soulève des enjeux de paysage dans plusieurs pays européens (Nadaï & Van der Horst, 2009 ; 2010). Nous nous sommes intéressés ici au cas de la France. Nous avons tenté de rendre compte des liens entre les enjeux de décentralisation de la politique énergétique que soulève l'éolien et ceux qu'ils soulèvent en matière de paysage, dont nous avons montré qu'ils pointent aussi vers une décentralisation de notre politique du paysage.

Comme l'a souligné Paul Selman dans une contribution récente (Selman, 2010), après les chemins de fer et de l'industrie au cours des

XIXe et XXe siècles, l'énergie pourrait bien être l'un des facteurs majeurs d'évolution des paysages au cours du xxie siècle. Cependant, alors que les changements apportés par la révolution industrielle se sont produits sur des pas de temps relativement longs, autorisant des changements culturels progressifs, y compris l'émergence et la lente constitution de nouveaux codes esthétiques, l'impératif du changement climatique appelle des recompositions beaucoup plus rapides et probablement tout aussi radicales de nos paysages.

Il s'agit donc de comprendre activement ces mutations afin de pouvoir les mettre en politique. L'éolien est aujourd'hui la plus mature des nouvelles technologies de l'énergie. Il a certainement, pour diverses raisons (e. g. rendement, foisonnement, variabilité, etc.), une contribution plafonnée, en matière de transition énergétique, en particulier si nous n'optons pas rapidement pour une réelle politique de maîtrise de la demande d'énergie. Son développement n'en préfigure pas moins des enjeux environnementaux et de paysages à venir. Il constitue en cela un terrain d'essai pour une décentralisation de nos modes de gouvernance, énergétique et du paysage, qui sera très certainement nécessaire quelles que soient les nouvelles énergies pour lesquelles nous opterons.

Le rêve technologique, celui d'une technologie de production d'énergie « asociale », nous laissant inchangé, est comme le paysage arcadien : c'est une utopie. Elle ne saurait nous dispenser du travail social et politique nécessaire au renouvellement de notre relation à l'énergie.

Remerciements

Ce travail a été réalisé avec l'appui financier du Conseil français de l'énergie, du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de la Mer (MEDDM - Programme PDD « Paysage et Développement durable »), de l'Agence française de l'environnement et l'énergie (Ademe, Convention n° 07 10 C 0019), de la Région Île-de-France (R2DS) et du Programme interdisciplinaire Énergie du CNRS.

Notices biographiques

AIE, *Renewables in global energy supply*, Paris, 2007, pp.34.

AIE *Energy technology perspectives. Scenarios and strategies to 2050*, Paris, 2008, pp.650.

Berque A. « De paysage en outre-pays », *in A.* Roger *(*dir.*) La théorie du paysage en France* (*1974-1994*), Seyssel, Champ Vallon, 2005, pp. 4346-359.

Besse, J.-M. (2001) « Cartographier, construire, inventer : notes pour une épistémologie de la démarche de projet», *Carnets du Paysage*, ENSP-Versailles, Automne 2001, pp. 127-145

Bonneaud, F. *Eoliennes et paysage. Bilan sur les premiers parcs installés en Eure-et-Loir*, DIREN Centre, Orléans, 2006, pp. 8.

Chabason L. (1995) « Pour une Politique du Paysage (entretien avec Odile Marcel) » in *A.* Roger *(*dir.*) La théorie du paysage en France* (*1974-1994*), Seyssel, Champ Vallon, 2005, pp. 260-272.

COMOP10, *Plan de développement des EnR à haute qualité environnementale*, Rapport à J.-L. Borloo, Paris, 2007, 53 p.

Conseil de l'Europe, *Convention européenne du paysage, Florence*, STE 176, Strasbourg, 2000.

Dagognet F. , Guéry F. , Marcel O., *Mort du paysage ? Philosophie et esthétique du paysage*, Seyssel, Champ Vallon, 1982, pp. 239.

Dewarrat J.P., Quincerot R., Weil M., Woeffray B. *Paysages ordinaires : de la protection au projet*, Architecture + recherche Mardaga, Belgique, 2003, pp. 94.

Dewitte J., « Pays paysage : à propos d'une difficulté théorique de l'artialisation », in Chenet F., Collot M., Saint Girons B. (dir.) *Le paysage, état des lieux*, Ousia, Bruxelles, 2001, pp. 419-441.

Diren Centre *Etude des enjeux faunistiques et paysagers liés à l'installation de parcs éoliens en Beauce.* Etude conduite par l'Institut d'Ecologie Appliquée et par le Bureau d'études Laurent Couasnon, Rennes, 2005, pp. 196..

EREC / Greenpeance *Energy [R]evolution. A sustainable global energy outlook*, 2007, Bruxelles, 212 p.

EREC, *Feuille de route des énergies renouvelables, 20 % pour 2020*, Bruxelles, 2008, pp.24.

FR, *Loi n°2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité*, Paris, 2000.

FR, *Loi n° 2003-8 relative aux marches du gaz et de l'électricité et au service public de l'énergie*, parution au J.O n° 3 du 4 janvier 2003 p265, Paris, 2003.

FR, *Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique*, parution au J.O n° 163 du 14 juillet 2005 page 11570, Paris, 2005.

FR, *Dispositions relatives à la création des zones de développement de l'éolien terrestre*, Circulaire du 19 Juin 2006, Ministère de l'Environment, Paris, 2006.

FR, *Plan national de développement des énergies renouvelables de la France*, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, 17 novembre, Paris, 2008.

FR, Projet de loi « Grenelle II » portant engagement national pour l'environnement, n° 155, déposé le 12 janvier, Paris, 2009a.

FR, Circulaire du 23 mars 2009 relative à la territorialisation de la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, Paris, 2009b.

FR, *Loi « Grenelle I »* n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement, Paris, 2009c.

FR, Circulaire du 19 mai 2009 relative à la planification du développement de l'énergie éolienne terrestre adressée par la Direction de l'Energie et du Climat, Pars, 2009d.

GIEC, *Changements climatiques*. Rapport de synthèse, Genève, 2007, pp.103.

Hirsch and M. O'Hanlon, *The anthropology of landscape: perspectives on place and space*, Clarendon Press, Oxford, 1995, pp. 268;

Labussière O. « Eléments pour une prospective du milieu. L'enjeu du sensible en aménagement ». *Cahiers de Géographie du Québec.* Montréal, 2011 - à paraître.

Labussière O., Nadaï A. « Expérimentations cartographiques et devenirs paysagers. La planification éolienne de la Narbonnaise », *Espaces et Sociétés*, Paris, 2011 - à paraître.

Nadaï A. « Site : La fabrication du paysage », in E. Rémy et al. (*dir.*), *Espaces, savoirs, incertitudes* ; Préface B. Latour, Ibis Press, Paris, 2005, pp. 206.

Nadaï A. « 'Planning', 'siting' and the local acceptance of wind power: Some lessons from the French case », *Energy Policy*, Volume 35, Issue 5, May 2007a, pp. 2715-2726.

Nadaï A. Degré zéro : Portée et limites de la théorie de l'artialisation dans la perspective d'une politique du paysage », *Cahiers de géographie du Québec*, Décembre, Montréal, 2007b, pp.333-343.

Nadaï A. " 'Innovative' Wind Power Planning", *Planning Theory & Practice,* 10: 4, 2009, pp. 543 — 547.

Nadaï A., Labussière O. « Wind power planning in France (Aveyron): from State regulation to local experimentation », *Land Use Policy*, Volume 26, Issue 3, July, 2009, pp. 744-754.

Nadaï A., Labussière O. « Birds, turbines and the making of wind power landscape in South France (Aude) », *Landscape Research*, 35:2, April, 2010,.pp. 209-233.

Nadaï A., Labussière O. « Wind power and the emergence of the Beauce landscape (Eure-et-Loir, France) », *en soumission*.

Nadaï, A., Van der Horst, D. « Wind power planning, landscapes and publics » (Guest editorial), *Land Use Policy*, 27:2, July, 2009, pp. 181-184.

Nadaï, A., Van der Horst, D., « Introduction: Landscapes of Energies » (Guest editorial), *Landscape Research*, 35:2, 2010, pp. 143-155.

Observ'er, *Eurobserv'er* **-** *Etat des énergies renouvelables en Europe* - Édition 2010, Observ'er, Paris, 2010a.

Olwig, K. The Practice of Landscape 'Conventions' and the Just Landscape: The Case of the European Landscape Convention »,*Landscape Research*, Vol. 32, No. 5, 2007, pp. 579-594.

Pousin N. « Autour du projet : Repère pour un débat », *Carnets du Paysage*, Automne, ENSP-Versailles, 2001, pp59-63

Roger A. *Court traité du paysage*, Gallimard, Paris, 1997, pp199.

Trom Danny *La production politique du paysage: éléments pour une interprétation des pratiques ordinaires de patrimonialisation de la nature en Allemagne et en France*, Thèse de Doctorat, Institut d'études politiques de Paris (P. Favre dir), Paris, 1996, pp624.

UE, Commission européenne*, Directive 96/92/CE du Parlement européen et du conseil du 19 décembre 1996 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité*, Bruxelles, 1996.

UE, Commission européenne, *« Énergie pour l'avenir: les sources d'énergie renouvelables » - Livre blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires*, COM (97) 599 du 26.11.1997, Bruxelles, Novembre 1997.

UE, Commission européenne, *Directive 2001/77/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 septembre 2001 relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité*, 301L0077, Bruxelles, 2001.

UE, Commission européenne, *Directive 2003/30/CE du Parlement européen et du conseil du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation des biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports*, Bruxelles, 2003a.

UE, Commission européenne, *Directive 2003/54/CE du 26 juin 2003 relative aux règles communes pour le marché intérieur de l'électricité*, Bruxelles, 2003b.

UE, Commission européenne, *Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables* [modifiant et abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE], Bruxelles, 2009a.

UE, Commission européenne, *Décision de la commission du 30 juin 2009 établissant un modèle pour les plans d'action nationaux en matière d'énergies renouvelables conformément à la directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil*, Bruxelles, 2009b.

Illustration 3: L'administration met les vues des photomontages à l'épreuve de la perception de terrain et recherche le juste recul pour rendre compte de l'incidence d'un parc éolien à venir sur le village : "Notre repère, c'est quand le coq du clocher repose sur l'horizon" (Diren Centre) (Photographie des auteurs).

Table ronde finale : Science, technologie et choix publics autour des nouvelles options énergétiques : comment peuvent se dessiner les bonnes orientations ?

A. Dollet (Directeur Adjoint INIS, CNRS), R. Chabrillat (Ademe), J.-C. Hourcade (Cired), E. Beeker (CGSP France Stratégie), R. Lavergne (CGDD et MEDD).

Alain Dollet : L'objet de cette table ronde finale, c'est une grande question sur laquelle nos décideurs aimeraient bien qu'on puisse les éclairer convenablement. Vous connaissez la méthode qui a été utilisée dans notre pays très récemment avec les DNTE, le Débat national sur la transition énergétique ? Est-ce que le débat a contribué à éclairer les choix politiques ou est-ce qu'au contraire il les a compliqués et obscurcis ?

En reprenant un des points importants entendu sur le sujet au cours de cette journée, je citerai Olivier Godard, qui a souligné la difficulté croissante pour les scientifiques de faire passer leurs analyses, leurs connaissances distanciés et de les porter à la connaissance du public et des décideurs dans la société d'aujourd'hui où jouent les médias, relais des groupes de pression, occupant une place croissante. C'est quelque chose de nouveau sur lequel on aura l'occasion de revenir, donc qu'il faut souligner. Dans le débat sur la transition, on parle de gaz de schiste. Dans *Le Monde* daté de dimanche-lundi, on soulignait que la controverse est internationale, avec le titre : « La résistance au gaz de schiste s'internationalise, des manifestations étaient prévues dans de nombreux pays. » Les débats sont installés en Ukraine, au Canada même, au Royaume-Uni, bref c'est un problème qui dépasse largement nos frontières. On trouvait également dans *Le Figaro Économie* un article sur la controverse sur les contrats de long terme qui se dessinent pour les projets EPR au Royaume-Uni avec des coûts plus élevés que prévus. On a abordé cette question également dans la journée : c'est aussi une question qui est devenue très internationale. La presse, les médias, se saisissent donc de tels sujets de manière très fréquente et récurrente sur les gaz de schiste, les biocarburants, la transition énergétique…

Je ferai deux dernières remarques. Tout d'abord, il y a trois grands sujets : les fossiles, du nucléaire et puis les renouvelables, pour faire simple. Chacun de ces sujets donne lieu à des controverses plus ou moins fortes même si celles-ci concernant les ENR semblent moins fortes. Pour les énergies renouvelables, on a surtout évoqué les difficultés liées aux oppositions pour les projets d'implantations d'éoliennes. Mais il peut y avoir des problèmes d'approvisionnement en

matériau pour les ENR, en particulier pour le PV en couche mince avec des problèmes avec la disponibilité de l'indium ; pour d'autres filières on aura également des difficultés, par exemple pour le stockage, pour les éléments permanents d'éoliens avec les terres rares. Bref, toutes les technologies ont leurs inconvénients, leurs difficultés. Dernière remarque : j'ai retenu pour les conclusions de cette journée une remarque de bon sens de Dominique Finon : on a aujourd'hui besoin de toutes les technologies qu'il ne faut pas opposer. On a besoin de controverses, mais comme le dit Jean-Charles Hourcade, de « controverses éclairées ». Aujourd'hui, c'est un travail que nous avons à mener pour que la voix des scientifiques ou des chercheurs de SHS distanciés et non idéologisés puisse se faire entendre et qu'elle puisse éclairer donc les choix en matière d'énergies. Je ne vais pas en dire plus.

Rémi Chabrillat : Comment guider les choix dans ces domaines soumis à controverses ? Je peux répondre par deux-trois remarques. D'abord, il y a des options sans regrets, qui ouvrent de nombreuses opportunités d'action et il faut aller vers ces options. C'est le cas de la modernisation des réseaux : des réseaux plus intelligents pour une meilleure efficacité énergétique, pour gérer des variabilités de production, mais des variabilités aussi d'utilisation et donc pour intégrer les ENR. Sur ce sujet, on a plutôt des compétences en France, en termes de réseau, on a des capacités de recherches, on a des industriels, on a des opérateurs. Donc voilà sans regrets. Pour les mêmes raisons, on aurait besoin de maîtriser les techniques de stockage, il y a un enjeu, il y aura des marchés nationaux, internationaux ; il faut y aller.

Mon second point est qu'il y a aussi de nouveaux développements à faire avec les technologies existantes et à améliorer de manière incrémentale. Mais ce n'est pas si simple pour certaines comme c'est le cas pour le gaz de schiste. Le fait que le gaz de schiste aujourd'hui nous arrive des États-Unis et que tout ce qui arrive des États-Unis n'est pas toujours accueilli positivement dans d'autres pays. On peut se rappeler que les États-Unis sont un pays avec une très solide tradition de gaspillage énergétique. L'Américain moyen consomme 2,5 fois plus d'énergies que le Français moyen et l'on ne fera croire à personne qu'il vit 2,5 fois mieux. Rappelons-nous que George Bush Senior au moment de la discussion de Rio insistait sur le fait que le mode de vie US n'est pas négociable. L'arrivée des gaz de schiste aux États-Unis conduit objectivement à pérenniser cette situation. « Nous avons une énergie abondante et pas chère donc, pas de problème, on n'a pas à s'embêter avec l'efficacité énergétique. » Autour des réactions antigaz de schiste, ne mésestimons pas cette réaction contre cette attitude de type américain. Si on se dit, « il y a une nouvelle énergie et elle n'est pas chère, du coup on ne va pas faire d'effort d'économie d'énergies », ce n'est pas une attitude qui nous fait progresser sur la voie de la soutenabilité.

J'ajouterai un point sur les renouvelables au milieu des autres options énergétiques : comment guider les choix ? Comment éviter le

saupoudrage de fonds publics et en même temps arriver à construire un bouquet énergétique diversifié, car on risque d'avoir besoin de tout à l'horizon 2050-2100 ? Un bouquet énergétique diversifié c'est un bouquet plus résilient. Donc, pour cette raison, ne nous contentons pas de ce qui semble sûr, proche de la maturité économique, d'abord parce que ce n'est pas là qu'il y a le plus d'effort de R&D et d'innovation. Ce n'est pas là où les chercheurs, vous déposez le plus de brevets. Ensuite parce que les délais de maturation sont très longs : les énergies de 2030-2050 se préparent aujourd'hui. Il faut accepter d'aller sur des champs sur lesquels on prend certains risques, on n'est pas complètement sûr que ça marchera. Sur le photovoltaïque, dans les années 1980 ou 1970, on a soutenu en France des petits champions nationaux ; à cette époque, c'était un tout petit marché où l'on déposait des brevets qui sont encore aujourd'hui utilisés un peu partout dans le monde (la tranche le silicium c'était Photowatt), je la fais légèrement caricaturale mais quand même. Après on a raté l'étape de massification ; puis quand on l'a entamée en France avec les tarifs d'achat, on s'est aperçu que ça allait trop vite, et on n'a pas forcément bien géré la phase de freinage. Moyennant quoi, le photovoltaïque est quand même un domaine dans lequel on a des laboratoires, des IED, etc., performantes, compétentes, il faut le dire. Cet exemple du PV éclaire le besoin d'une certaine, d'une nécessaire continuité dans la politique de soutien.

Dernier point : comment guider les choix en termes multicritère ? La réduction des émissions de CO_2, c'est important mais il n'y a pas que le CO_2 en matière de protection de l'environnement, il y a les déchets ; au niveau des processus de fabrication, il y a les impacts sur la pollution de l'air, sur la pollution de l'eau, etc. À côté de l'environnement, il y a aussi les effets positifs sur les emplois, la compétitivité économique des entreprises : ça concerne les techniques de géothermie, le nucléaire, le parapétrolier, les techniques de rénovation thermique, etc. Voilà, à ce stade, ce que je voulais dire sur ces questions de choix en univers de controverse.

Étienne Beeker : Je vais rebondir sur ce qui a été dit précédemment sur le déploiement à grande échelle des renouvelables dans les réseaux électriques en évoquant des effets que l'on ne veut pas voir. Le PDG d'Eon, qui est le plus gros électricien allemand, a lancé un cri d'alerte avec dix autres énergéticiens européens dont GDF-Suez sur la viabilité de leur entreprise et sur des risques de black-out pour les systèmes électriques insuffisamment adaptés. Donc, il y a une certaine urgence dans la maîtrise du développement des renouvelables. Les politiques volontaristes basées sur le tarif d'achat sans contrôle des quantités et ajustement des niveaux des tarifs au fur et à mesure des baisses de coût ont eu un effet destructeur pour les marchés électriques. Or, avec l'infléchissement de la demande sous l'effet de la crise, la part de la production ENR intermittente a augmenté de façon très rapide, passant un seuil au-delà duquel les coûts pour l'ajustement du système en temps réel sont devenus importants. Vous rajoutez un développement qui peut se développer sans aucun signal de localisation dans les réseaux avec des problèmes importants de

congestion. À partir d’un certain niveau de développement, leur implantation géographique doit être compatible avec les besoins. Globalement, elles doivent se développer au même rythme que la demande. De plus, il n’y a aucune raison pour que le solaire, l'éolien à terre, l'éolien en mer, la biomasse ou l'hydraulique, etc., aient à maturité identique des prix de rémunération qui convergent : chacun aura un coût de système, chacun rend un certain service au système, et il doit être rémunéré pour ce qu'il apporte. Pour le photovoltaïque, vous avez un rapport puissance sur énergie qui est très important, il produit pendant 1 000 heures par an, il produit 10 % du temps ; si l'on regarde ses apports à l’échelle macroscopique du système, ça veut dire qu’il faut l’associer aux services que rendraient les unités de stockage. Or, avec le stockage, vous tombez dans un problème technique (les batteries évoluent trop doucement) et un problème de ressources (plus de place pour des centrales de pompage hydraulique, les STEP). Avec les ENR à apport variable, on a introduit la problématique puissance alors qu’on ne parlait que de problématique énergie avec des techniques à apport programmable. De ce fait, on doit développer les services de flexibilité dont les effacements de la demande. La difficulté est que ces effets ont un coût, créent des contraintes de gestion de système, nécessitent des adaptations du système et mettent en péril l’amortissement des installations classiques récentes.

Et, là-dessus, on convoque par magie les *smart grids.* On sort du chapeau les véhicules électriques pour la capacité de stockage de leurs batteries alors qu’au contraire ils vont créer d’immenses problèmes de gestion de charge au niveau des réseaux de distribution. D’ailleurs, ce n’est pas un hasard si les véhicules électriques ne se développent pas : le modèle économique n'y est pas. Dans un rapport du Commissariat à la stratégie sur la question du véhicule électrique, j’ai observé qu’il ne se développe que dans les marchés de niche.

Sur les *smart grids,* on n’a pas résolu tous les problèmes de communication d’information. Il faut que le signal transite sur le réseau électrique et CPL progresse doucement. Les compteurs communicants ne se développent pas si simplement comme on le voit avec les compteurs Linky choisis en France. Les Allemands et les Anglais ne se précipitent pas sur le développement des compteurs intelligents. On bute donc sur un tas de problèmes. Certes, c'est très bien d’être volontariste, mais jusqu’à un certain point. On ne demande pas à un sauteur en hauteur qui saute 2 m de sauter brusquement 5 m ; il n'y arrivera pas même en s'entraînant tous les jours, il faut y aller. Il faut d'abord qu'il saute 2 m 20 et puis après 2 m 50… On y va progressivement.

Richard Lavergne : Pour essayer d’intervenir en complément de ce qui vient d’être dit, je vais parler du Débat national sur la transition énergétique (DNTE) et des controverses qu'on a vu se dérouler à l’intérieur de ce débat. J'étais à la fois rapporteur du groupe des experts, puis rapporteur du groupe sur les scénarios. Ce qui m'a permis un peu de voir de l'intérieur ce qui se passait dans le débat. D’abord,

par rapport à tous les débats qui se sont tenus depuis longtemps sur l'énergie, la caractéristique de ce débat est qu'il excluait l'État. L'État en tant que tel, les administrations n'étaient pas les bienvenus, en particulier la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) sous le prétexte qu'on lui passerait ensuite le relais pour préparer la loi sur la transition énergétique qui est en cours de préparation. Or, ceci a eu quelques effets pervers. On a ignoré les acquis des politiques définies antérieurement ; la préservation de l'environnement et du climat a déjà fait l'objet d'importants efforts politiques et ministériels. On a une sorte de feuille de route qui est très ancienne sur ces thèmes et donc sur toutes les technologies dont on a parlé au cours de la journée.

Au cours du débat DNTE impliquant de nombreuses parties prenantes, plusieurs controverses sont apparues ou réapparues : il y a eu bien sûr pour ou contre le nucléaire, clivage un peu fondateur ; le rôle des gaz de schiste plus discret comme controverse mais ça a existé également. Mais il y en a eu d'autres plus nouvelles pour nous notamment. D'abord un débat entre ceux qui avaient une approche centralisée jacobine de la politique énergétique par rapport à ceux qui avaient une vision décentralisée proche du local, à la recherche d'une autonomie énergétique à laquelle on n'était pas vraiment préparé.

Ensuite, il y a eu confrontation entre les tenants d'une vision d'une transition énergétique en autarcie dans le périmètre des frontières, par rapport à une transition énergétique dans une économie globalisée. Les parties prenantes étaient beaucoup plus compétentes, disons, par nature, sur les aspects nationaux. Mais on n'a pas vraiment traité d'aspects internationaux.

Il y a aussi un débat sur lequel on n'était pas assez préparé : la place respective du changement de technologies et des changements de comportements. Certains ne prônaient que la R&D et l'innovation comme solution donc pour apporter la transition énergétique avec l'idée d'animer la croissance économique par ces innovations vertes. Mais ils s'opposaient à un courant de pensée tenant de la sobriété, du changement de comportement et au-delà de la décroissance. Enfin, je simplifie un peu à outrance. Et, donc, on avait ces grandes controverses qui étaient plus politiques qu'économiques ou sociologiques et sur lesquelles, finalement, certains avaient le rêve de mobiliser le grand public et d'animer la démocratie, comme on le voit avec les débats locaux.

Ce n'est donc pas surprenant qu'à la fin on ne soit pas arrivé à obtenir le résultat qui était demandé au début du DNTE par le gouvernement qui avait mis la barre assez haute en disant : « Je retiendrai toutes vos recommandations consensuelles et je dirai à la DGEC de les mettre dans le projet de loi sur la transition énergétique. » En fait, ces questions auraient demandé plus de temps pour être débattues que les six mois qui ont été réservés au débat. Dans un contexte beaucoup plus « technocratisé », les travaux de la commission Énergie et Propective de l'ex-Commissariat général au Plan, par exemple ceux présidés par Pierre Boisson à la fin des années 1990, ont duré deux ans. À la fin, les parties prenantes n'ont pas réussi à se mettre

d'accord. Ça a été même très conflictuel. On a « accouché » seulement d'une synthèse sur toutes ces questions, qui n’aide pas vraiment pour préparer le projet de loi sur la transition énergétique que nous devons proposer au gouvernement.

Alain Dollet : Merci d'avoir fait une intervention aussi synthétique. Cela me donne l'occasion de faire une transition en remarquant d'abord que, lors du débat national, la recherche en SHS n'était pas spécialement représentée. Je pense que c'est une des clés du problème qui se pose aujourd'hui, la nécessité de réflexivité, la nécessité de distanciation. Ensuite, quand on évoque le DNTE mais de manière générale, les débats publics et donc le rôle qu'ils peuvent avoir dans les processus de décision, est-ce que la sociologie des controverses pourrait avoir un rôle à jouer et que pourrait-elle apporter dans le dispositif aujourd'hui ?

Jean-Charles Hourcade : Je ne suis pas sociologue, mais je vais répondre du point de vue sociologique. Je rebondis sur une phrase de Godard sur les tendances du monde moderne où l'on n'a plus conscience qu'il y a des ordres, « pas d'État, pas de scientifiques en tant que tels ». Je vois le problème plus en dynamique, en termes de moments. Il y a des moments où la science peut dire quelque chose à condition qu'elle garde bien son statut de science. Ça ne veut pas dire qu'elle a la vérité, mais qu’il y a un moment où l'on reconnaît ceci. Autrement, on a un jeu de posture, qu'on n'arrive pas à maîtriser. On est alors dans un « monde de courtier d'idées » : il y a un monsieur A qui a besoin d'idées et là-haut il y a monsieur B qui a des idées, puis il y a un courtier qui vient vendre l'idée de B à A. En général le courtier a tort et ça devient la propre affaire de A. La question devient : comment peut-on briser ce cercle ?

Du temps du Commissariat au Plan il y a quelques années, il y avait un endroit où l'on pouvait vérifier que ce courtier n’est pas un type sérieux. La différence entre un courtier et un porte-parole, c'est qu'on arrive à deviner que ce n'est pas un vrai porte-parole. Le courtier, on a oublié, on ne sait même plus de quoi il est porte-parole.

J'ai l’expérience suivante : il y a un scénario sorti de notre labo qui a été partie prenante du débat public. On a fait un contrat européen avec une ONG, sur un scénario de sortie du nucléaire pour évaluer l’effet macroéconomique : on a choisi de travailler sur ce scénario et on l’a fait consciemment parce que c'est notre rôle de mettre en débat la sortie du nucléaire. Mais qu’est-ce que ça voudra dire de le mettre en débat s'il n’y pas de scène, pas de place où il peut être mis en débat ? Les chiffres existent, mais ce scénario, je choisis de ne pas le mettre en débat. Pourquoi ? Je n'ai pas la place pour le mettre. Si je le mets sur la place publique, il va devenir comme la balle de Gaston Lagaffe dans le schéma de Chateauraynaud. Vous allez me demander si j’y « crois ». Tout le monde va y projeter ce qu'il veut et, bien sûr, il ne va pas jouer son rôle. J'ai le sentiment que je peux déclencher quelque chose de très contre-productif. Sur une scène, je n’aurai pas à dire que je prends ce scénario ; je serai avec le modèle du Cired avec ses faiblesses que

je ne manquerai pas de rappeler pour interpréter les résultats. Et je pourrai vous expliquer les enjeux A, B, C, D qui pourront être débattus.

Pour terminer sur l'importance d'avoir une scène pour des débats distanciés et rigoureux, je pense que se pose un problème philosophique important, de la part de ceux qui sont contre… une option, contre le nucléaire ou contre les OGM. En général, les gens le sont pour des « bonnes raisons », pour des questions de valeurs sociales, d'idéaux, mais ce n'est pas de ces raisons dont on parle. Quand on parle du risque du nucléaire, souvent on parle d'autres choses. On pense : « Je n'ai pas envie de vivre dans une société complètement technicisée, je ne peux pas faire confiance aux institutions publiques dirigées par des élites technocratisées. »

Je prends un exemple que j'ai à cœur même si c'est sans lien direct avec l'énergie. Dans le cas des OGM, comme je suis Pyrénéen, j'ai une vraie vision de ce pourquoi je suis contre les OGM qui n'est pas le risque de danger pour la santé. Je le suis pour d'autres raisons qui sont le statut de l'agriculture dans une société moderne et le type de développement de l'agriculture qui, pour des raisons économiques, est non soutenable s'il se déplace dans des pays comme l'Inde, la Chine, etc., en raison des risques qu'ils auraient là-bas, un risque pour la santé.

Ma réserve sur le nucléaire n'est pas de l'ordre des risques (notamment le plutonium), mais sur le dossier économique sur lequel je ne suis pas convaincu. Là où c'est grave c'est si l'on va se crisper autour d'un thème où se développent de faux arguments de part et d'autre sur la raréfaction des ressources.

Je discute avec des gens qui sont irréprochables moralement dont certains étaient et sont dans le débat national sur la transition, qui y ont joué un rôle, qui ont été convaincus par les gens du « Peak Oil » que le grand problème c'est l'épuisement rapide des réserves d'énergies, que la crise énergétique est une crise de rareté et que c'est elle qui a provoqué la crise économique. Je suis, moi, pour la sobriété énergétique, je me suis tout le temps battu pour ça, je pense qu'il faut économiser les ressources et que c'est rationnel économiquement et socialement. Mais si l'on défend ça au nom d'une raréfaction qui en soi est « mauvaise », est agitée comme un épouvantail, alors que les gaz et pétroles de schiste « s'amènent », « vous êtes morts », vous n'êtes plus crédibles.

Donc on est dans cette situation où l'on est forcé de se battre à « front renversé », parce qu'il n'y a pas la scène où l'on puisse débattre de façon non idéologisée, où je puis dire calmement les raisons pour lesquelles je suis pour ou contre quelque chose.

Donc si l'on pouvait demander à la direction du CNRS d'élever la voix et qu'on s'organise au CNRS pour que les scientifiques reprennent un peu la parole de façon non idéologique, ça serait bien, parce que je crois que les scientifiques qui se comportent en tant que tels dans le débat public, on tient notre rôle. Certes, le souci ne concerne pas que le CNRS, il concerne l'ensemble du milieu scientifique et les collègues

de l'IFP, du CEA, notamment dans l’alliance Ancre, mais il n’est pas sûr qu’il y ait beaucoup de distanciation. À condition qu'ils respectent déontologiquement, qu’ils sont en tant que scientifiques et pas en tant que défenseurs d’une cause ou d’intérêts économiques. Mais on doit être dans le temps du scientifique, qui permet de dire un certain nombre de choses qui soient réfutables.

Programme de la journée : La recherche controversée d'énergies « propres »

9 h 15 – 9 h 30 Accueil et présentation de la journée

Sandra Laugier (DAS InSHS-CNRS), Alain Dollet (DAS InSIS-CNRS), Dominique Finon (Cired) et Minh Ha-Duong (Cired et Projet R&Dialogue).

9 h 30 – 11 h 00 Session 1. La dynamique des controverses publiques

Présidence : Sandra Laugier (DAS InSHS-CNRS).

Olivier Godard (CECO, Polytechnique). « Univers controversés : troubles, déplacements, pièges et enjeux. »

Sezin Topçu (Institut Marcel Mauss, EHESS). « Controverses énergétiques et critique sociale : approche sociohistorique. »

Alain Nadaï (Cired). « Les sites d'une controverse : le cas de la démonstration CCS dans l'UE. »

Francis Chateauraynaud (GSPR, EHESS). « Alerter, débattre ou mobiliser. Les controverses publiques entre critique régulatrice et critique radicale. »

Rapporteur : Josquin Debaz (GSPR, EHESS).

11 h 15 – 13 h 00 Session 2. Fin ou retour des énergies fossiles ?

Présidence : Patrice Geoffron (Professeur, directeur du CGEMP-Dauphine).

Bruno Goffé, (délégué scientifique géo-ressources, CNRS). « Les choix offerts par le potentiel français de gaz de schiste. »

François Renard (professeur, Institut des sciences de la terre, UJF Grenoble). « Les risques de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schiste. »

Sylvie Cornot-Gandolphe (consultante). « La différenciation de l'effet « hydrocarbures de schiste » sur l'offre mondiale, européenne et française dans le futur long. »

Minh Ha-Duong (Cired). « Le CSC à grande échelle, une option réaliste ? État des lieux et des controverses. »

Sylvie Cornot-Gandolphe (consultante). « L'enjeu de tirer sur les ressources de charbon peut-il faire décoller le CCS dans les grands pays détenteurs de ressources ? »

Table ronde introduite par Patrice Geoffron.

Rapporteur : Florian Leblanc (Cired).

13 h 45 – 15 h 30 Session 3. Le nucléaire controversé

Président : Claude Gilbert (PACTE-Grenoble).

François Lévêque (professeur, Mines ParisTech). « Peut-on évaluer la probabilité du risque nucléaire ? »

Dominique Finon (Cired). « Peut-on maîtriser les coûts privés et sociaux du nucléaire ? »

Laurent Joudon (direction de la Stratégie, EDF). « Avenir économique du nucléaire – Deux facteurs clés, compétitivité et régulation. »

Thierry Duquesnoy (Département I-Tésé, CEA). « L'économie des différentes options du nucléaire de long terme. »

Yannick Barthe (CNRS-EHESS). « Les conflits autour du nucléaire peuvent-ils être absorbés par la démocratie ? »

15 h 30 – 16 h 15 Table Ronde. Les conflits autour de la technologie nucléaire.

Président : J.-C. Hourcade (Cired).

Marie-Claire Cailletaud (responsable de la politique énergétique, CGT Mines-Énergie), Sylvain David (IN2P3, CNRS), Yves Marignac (WISE et Global Chance), Pierre Charbonnier (Institut Marcel Mauss), François Lévêque (Mines ParisTech).

Rapporteure : Venance Journé (Cired).

16 h 30 – 17 h 45 Session 4. Énergies renouvelables, les conditions de réussite d'une utopie mobilisatrice

Présidence : Rémi Chabrillat (Directeur Energie et Production durable, ADEME)

Sylvie Alexandre (Membre permanent du CGEDD). « Promesses de la biomasse et conditions d'une mobilisation durable. »

Cédric Philibert (Agence internationale de l'énergie). « Quelles limites à l'essor des énergies renouvellables ? »

Jan Horst Keppler (directeur de la chaire Marchés électriques européens, Paris-Dauphine). « Le coût de l'insertion d'ENR intermittentes à grande échelle dans les réseaux. »

Alain Nadaï (Cired). « Les territoires éoliens : une analyse de la trajectoire de développement de l'éolien terrestre en France. »

Rapporteure : Béatrice Cointe (Cired).

17 h 45 – 18 h 15 Table ronde finale. Science, technologie et choix publics autour des nouvelles options énergétiques : comment peuvent se dessiner les bonnes orientations ?

Président : Alain Dollet (DAS, INSIS/CNRS), Remi Chabrillat (Ademe), Etienne Beeker (chargé de mission énergie, Commissariat général à la Stratégie et à la Prospective), Richard Lavergne (conseiller du DGE et chargé de mission au CGDD), Jean-Charles Hourcade (Cired), Francis Chateauraynaud (EHESS).