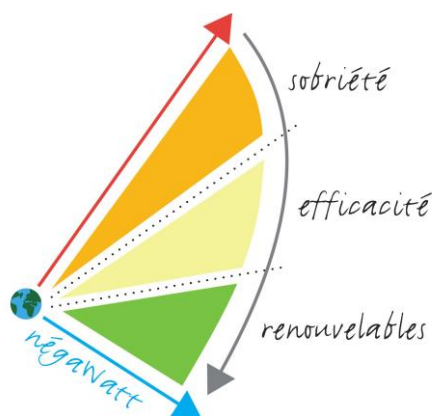




VERS UN SYSTEME ENERGETIQUE « 100% RENOUEVELABLE »

Analyse des facteurs de ruptures applicables
au scénario 100 %ENR pour Centre-Val de Loire



Principaux membres de l'équipe :

Vincent LEGRAND, Institut négaWatt (mandataire)
Thomas LETZ, Institut négaWatt
Benoît THEVARD, consultant
Philippe VERDIER, Virage Energie Centre-Val de Loire
Christian COUTURIER, Solagro
Simon METIVIER, Solagro
Yves MARIGNAC, WISE-Paris

Table des matières

Table des matières	3
Introduction.....	4
Synthèse des facteurs de ruptures pris en compte, et de leurs conséquences sociétales....	5
I- Facteurs de ruptures.....	6
1- Champ climatique.....	6
C1- Les changements climatiques et leurs conséquences.....	6
C2- Les évènements extrêmes et la déstabilisation des climats	7
C3- Une course à l'abîme entre pays	8
2- Champ des ressources.....	9
R1- Pénurie de pétrole et instabilités des marchés d'hydrocarbures	9
R2- Pénurie de métaux	11
R3- Pénurie de biomasse	15
R4- Pénurie d'eau.....	17
3- Champ économique et financier	17
E1- Crise économique et financière.....	17
E2- Revendications sociales et emplois	19
4- Champ géopolitique	19
G1- Guerres et conflits locaux	19
G2- Choix stratégiques nationaux ou régionaux	20
5- Champ technologique	20
T1- Accident nucléaire (France/Europe).....	21
T2- Défaut générique des réacteurs nucléaires.....	21
T3- Rupture technologique (production).....	22
6- Champ démographique.....	23
D1- Chute de population.....	23
D2- Flux migratoires.....	23
II- Principales conséquences envisageables.....	24
1- Chocs socio-économiques.....	24
CS1- Conséquences sur les prix de l'énergie	24
CS2- Conséquences sur la précarité énergétique	26
2- Chocs psychologiques	27
CP1- Volonté de changement de société.....	28
CP2- Rejet d'une technologie	28
3- « Chocs » technologiques.....	29
CT1- Arrêt d'une source de production d'énergie.....	29
CT2- Nouvelle source de production d'énergie	29
Conclusion	31

Introduction

La méthode prospective a pour objet d'effacer les « artefacts », ou les évolutions particulières à une période donnée, pour mieux comprendre les tendances lourdes et les dynamiques de l'évolution des systèmes sur une longue période.

Le scénario négaWatt, sur lequel le scénario 100 % ENR de la région Centre-Val de Loire est adossé, s'inscrit dans cette perspective pour les 35 prochaines années, avec le choix méthodologique fort de ne pas intégrer de ruptures : pas de rupture technologique, pas de rupture fondamentale dans le confort ou le mode de vie.

Pour autant, cela ne veut pas dire que les scénaristes pensent qu'il n'y aura pas de ruptures d'ici 2050 : un scénario énergétique est une prospection, pas une prédiction, et il suffit de porter notre regard 40 ans en arrière pour nous rappeler à la modestie... L'ordinateur, Internet, l'électronique de loisir, les chocs pétroliers, les réglementations thermiques dans le bâtiment, le développement industriel de l'énergie nucléaire, du photovoltaïque ou de l'éolien constituent des ruptures fortes, et pour certaines impensables, pour un scénariste de 1970.

Plus que des ruptures brutales, c'est davantage une succession de petites ruptures qui constitue les changements progressifs. Le scénario négaWatt prend en compte des successions de ces micro-ruptures : évolutions des habitudes, des pratiques, des effets de seuil (négatifs : saturation de marché, ou positifs : massification d'actions), ... Mais au-delà de ces évolutions, il y a un fort intérêt à prendre en considération les discontinuités plus lourdes – les ruptures en tant que telles.

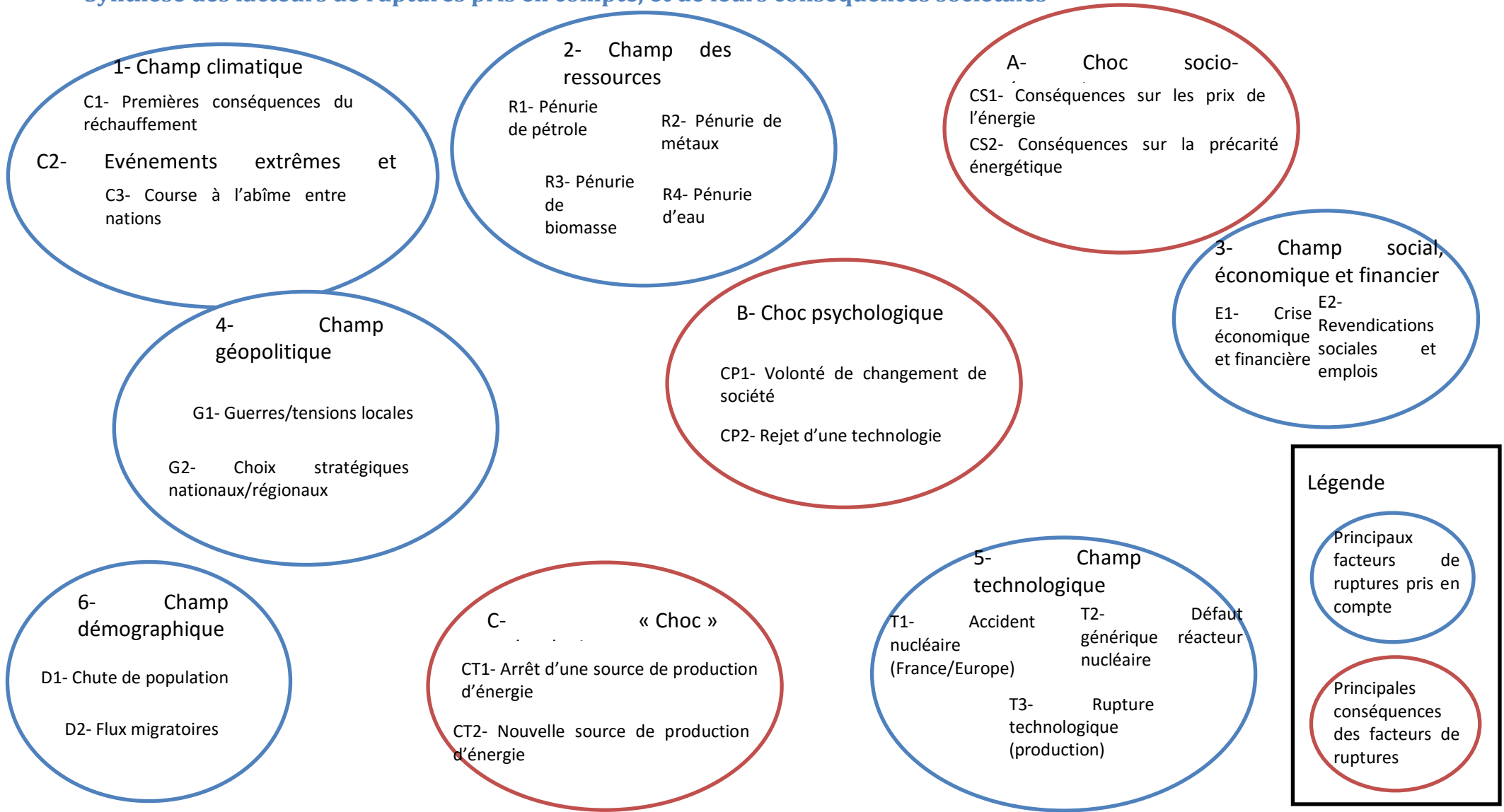
Dans ce document, la notion de « rupture » n'est pas connotée, ni négativement, ni positivement. Elle signale simplement, dans l'esprit de l'approche prospective, un événement qui n'est pas dans la continuité des tendances passées – un artefact, une « discontinuité ». Ces facteurs de ruptures ont généralement une portée mondiale ou nationale, les éléments spécifiques à la Région sont donc peu présents.

Ce document a pour objet d'analyser et de sérier un certain nombre de ruptures possibles dans la période considérée (jusqu'à 2050), et d'évaluer leurs conséquences sur la mise en œuvre du scénario négaWatt.

Nous nommerons donc « Facteurs de ruptures » les événements, les faits, qui constituent une forme de discontinuité par rapport aux tendances lourdes prises en compte dans le scénario négaWatt ; nous les étudierons dans la première partie. Sur la base de ces facteurs, nous analyserons ensuite les principales conséquences qui peuvent survenir de ces ruptures – les « chocs » qui en résultent et leurs conséquences sur la mise en œuvre du scénario négaWatt.

Au niveau de la méthode, nous avons choisi pour simplifier l'analyse de séparer la définition des facteurs de ruptures (partie 1) et l'explicitation des grandes conséquences associées (partie 2), pour éviter une description linéaire entre chaque facteur de rupture et leurs conséquences imaginables.

Synthèse des facteurs de ruptures pris en compte, et de leurs conséquences sociétales



I- Facteurs de ruptures

Pour une meilleure appréhension des facteurs de ruptures, ceux-ci sont répartis en 6 champs distincts, regroupant 16 facteurs de ruptures.

1- Champ climatique

Les changements climatiques sont une première source évidente de facteurs de ruptures pour notre société. C'est également la plus stratégique car elle est en capacité de remettre en cause notre capacité à vivre décemment dans notre biosphère. Au-delà de ces conséquences les plus progressives des changements climatiques, on considère ici des facteurs de ruptures qui pourraient induire des conséquences plus brutales sur notre société à court et moyen terme. Trois sortes de facteurs de ruptures sont recensés ici : les changements climatiques « linéaires » et leurs conséquences de court et de moyen termes sur les échanges mondiaux ; les évènements climatiques extrêmes et la déstabilisation de l'atmosphère ; enfin, une « course à l'abîme » entre nations de moins en moins coopératives et de plus en plus égoïstes.

Ces trois ruptures possibles se situent à l'échéance d'une à quelques décennies, et elles ne doivent pas occulter les conséquences encore plus dramatiques sur le long terme des changements en cours dans les climats. L'érosion de la biodiversité représente d'ores et déjà une extinction majeure des espèces d'ici à cent ans. De même, la fonte des inlandsis polaires et l'expansion thermique des océans représentent une montée des eaux pendant plusieurs siècles voire plusieurs millénaires. Enfin, la hausse des températures entraîne un rétrécissement des zones habitables et cultivables de la planète. Ces conséquences ne sont plus des « surprises », mais bien le cadre dans lequel vont devoir s'adapter, de façon plus ou moins radicale, nos civilisations.

C1- Les changements climatiques et leurs conséquences

La première des conséquences majeures des changements climatiques est la déstabilisation des agricultures. Quelle que soit la latitude en effet, le réchauffement induit soit des précipitations en excès, soit des sécheresses, deux phénomènes déjà mesurables dans les zones exportatrices de céréales comme le centre et l'ouest des Etats-Unis, l'Australie, et l'Amérique du Sud. Cette rupture est similaire à celle décrite en R3 (pénurie de biomasse). La production de biomasse notamment pour les carburants peut en effet aggraver les problématiques d'accaparement des terres arables dans les régions tropicales.

Les mécanismes d'augmentation des prix du blé ou des céréales ont été observés notamment en 2008, avec des chocs de proche en proche, d'abord dans les pays au climat difficile pour lesquels un changement faible peut avoir de graves conséquences (Sahel par exemple).

Ensuite, même les pays dont l'agriculture n'avait pas été touchée ont vu leurs marchés déstabilisés par les prix extérieurs ou par les mesures de réponses comme le blocage des exportations ou la constitution de stocks en urgence. Le choc de 2008 avait eu lieu en parallèle avec l'augmentation des prix du pétrole, et avait eu des conséquences importantes comme des émeutes de la faim, aggravées par la régulation défailante des marchés mondiaux et des stocks, et par les situations de pauvreté et d'inégalité.

Dans la région Centre-Val de Loire, « le changement climatique se traduit principalement par une hausse des températures, surtout marquée depuis les années 1980. Sur la période 1959-2009, on observe une augmentation des températures annuelles de l'ordre de 0,3°C par décennie. À l'échelle saisonnière, c'est l'été qui se réchauffe le plus, avec des hausses de l'ordre de 0,4 °C par décennie, suivi de près par le printemps. En automne et en hiver, les tendances sont également positives mais avec des valeurs moins fortes, de l'ordre de +0,2°C à +0,3 °C par décennie. En cohérence avec cette augmentation des températures, le nombre de journées chaudes (températures maximales supérieures ou égales à 25°C) augmente et le nombre de jours de gelées diminue.

En ce qui concerne les précipitations, le signal du changement climatique est moins manifeste, en raison de la forte variabilité d'une année sur l'autre. Sur la période 1959-2009, en région Centre-Val de Loire, les tendances annuelles et saisonnières sont très peu marquées. Les changements d'humidité des sols sont également peu marqués, et on note peu d'évolution de la fréquence et de l'intensité des sécheresses.

Les tendances des évolutions du climat au XXIème siècle sont les suivantes :

- Poursuite du réchauffement au cours du XXIe siècle en Centre-Val de Loire, quel que soit le scénario
- Selon le scénario sans politique climatique, le réchauffement pourrait atteindre 4°C à l'horizon 2071-2100 par rapport à la période 1976-2005
- Peu d'évolution des précipitations annuelles au XXIe siècle, mais des contrastes saisonniers
- Poursuite de la diminution du nombre de jours de gel et de l'augmentation du nombre de journées chaudes, quel que soit le scénario
- Assèchement des sols de plus en plus marqué au cours du XXIe siècle en toute saison »¹

C2- Les évènements extrêmes et la déstabilisation des climats

De nombreux accidents climatiques ont eu lieu ces dernières années dans le monde. Plusieurs ont touchés la France : tempête de décembre 1999, canicule puis inondations de 2003, inondations de 2015 où la région Centre-Val de Loire a été particulièrement touchée, ... Par souci de rigueur scientifique, ces événements ne sont jamais directement rattachés aux changements climatiques, bien que l'augmentation du nombre d'événements climatiques extrêmes soit prévus par les modèles et constatés dans les faits.

¹ Source : Météofrance

L'idée qu'un accident climatique particulièrement important, ou la succession d'événements climatiques sévères, puissent se produire à court terme, n'est donc pas exclue. C'est la même chose pour une montée plus rapide des océans par déstabilisation des immenses plaques des glaces posées sur le Groenland ou l'Antarctique de l'Ouest.

Mais ce qui fait actuellement le plus peur aux scientifiques est la création de rétroactions positives telles que l'éruption de méthane de l'océan arctique, l'évolution de l'absorption de l'énergie solaire par les sols libres de neige ou les océans privés de glace. Ces phénomènes irréversibles bloquent alors la capacité collective des nations à limiter les changements climatiques.

Ces emballements et les événements extrêmes peuvent donc produire une prise de conscience accrue, à l'exemple des sécheresses majeures aux Etats-Unis qui avaient précédé les premiers traités internationaux, mais aussi un découragement des efforts collectifs.

C3- Une course à l'abîme entre pays

Après une période où l'on pouvait constater que la négociation climatique marquait le pas au niveau international, avec l'échec de la COP 15 à Copenhague en 2009, la COP 21 qui s'est tenue à Paris en décembre 2015 a relancé le processus de discussion.

Cependant, même si l'on peut considérer que la signature de l'accord par 196 délégations, suivie moins d'un an après par sa ratification par 55 états représentant 55 % des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), est un succès diplomatique, force est de constater que la diminution massive des émissions de GES (même si on note une stabilisation en 2015) n'est pas réellement enclenchée, et que les mesures pour arriver à cette transformation font défaut.

Ainsi, la COP 22, qui vient de se terminer à Marrakech, peut être considérée comme une COP de transition. Elle n'a pas vu de progrès substantiels, avec le renvoi à plus tard des discussions sur des sujets pourtant essentiels comme l'agriculture. Par ailleurs, l'accord de Paris ne s'accompagne pas de mécanismes de sanction et repose essentiellement sur le bon vouloir des Etats à respecter leurs engagements en termes de réduction d'émissions de GES. Les engagements pris sont insuffisants, et on estime que les contributions des Etats amèneraient à une augmentation de la température moyenne du globe terrestre de + 3 °C par rapport à l'ère préindustrielle, alors que le texte vise une stabilisation à + 2 °C, voire seulement 1,5 °C.

De même, l'engagement pris à Copenhague par les pays développés, pollueurs historiques, de verser 100 milliards de dollars par an d'ici 2020 aux pays en développement, pour les aider à faire face aux impacts, reste pour l'instant lettre morte.

Enfin, l'élection récente de Donald Trump, climato-sceptique revendiqué, à la présidence des Etats-Unis, fait naître de grandes inquiétudes sur les décisions de l'administration américaine, et risque de mettre à mal le processus engagé.

Une conséquence possible de l'absence de progrès international suffisamment rapide, est l'apparition de projets de géo-ingénierie, qui consistent à tenter de réparer certaines conséquences des changements climatiques.

Ces projets peuvent être réalisés à l'échelle d'un pays ou d'une région, même contre l'avis du reste de la communauté internationale. Ils peuvent aussi potentiellement avoir des conséquences désastreuses sur d'autres régions, et même s'ils fonctionnaient, conduiraient à une action de nature irréversible. C'est ainsi que l'action la plus souvent citée, l'injection de particules de soufre dans la haute atmosphère pour réfléchir une part de l'énergie solaire, aurait des conséquences imprévisibles sur les précipitations et les conditions locales du climat. Et surtout, à supposer qu'elle ralentisse le réchauffement, cette action devrait être poursuivie *ad aeternam* faute de quoi le réchauffement repartirait de plus belle. Une telle situation s'apparente aux courses aux armements, et sont développées (en G1) en tant que conflits géopolitiques.

2- Champ des ressources

L'entrée dans « le temps du monde fini » nous confronte de plus en plus aux contraintes physiques de la rareté des ressources naturelles. Parmi les stocks finis dont l'épuisement peut constituer un facteur de rupture, nous analyserons le pétrole, les métaux, la biomasse et l'eau.

R1- Pénurie de pétrole et instabilités des marchés d'hydrocarbures

Le pétrole est la ressource d'énergie fossile dont le stock a été le plus sollicité. Nous savons, depuis l'analyse du géophysicien M. K. Hubbert dans les années 1940, que l'extraction du pétrole est en capacité de croître jusqu'à ce que la moitié des réserves existantes environ ait été décaissée. Au-delà de cette limite, et pour des raisons physiques, la production ne peut que décroître².

Cette décroissance inéluctable de la production, une fois extraite la moitié des réserves, a des conséquences économiques évidentes : si la demande mondiale de pétrole baisse au même rythme que l'extraction, le prix peut rester stable. Si la demande reste forte, les prix s'envolent, « mécaniquement ».

Ce phénomène est appelé « pic de Hubbert » ou « pic du pétrole », en référence à la forme de la courbe de production. Si la notion de pic est incontournable puisqu'il y a bien un jour unique où la production atteint un maximum, la forme exacte de la courbe est plus incertaine car elle est fortement liée à l'économie. Le plafonnement de la production provoque une hausse des prix du pétrole, généralement amplifiée par la spéculation. Cette augmentation du prix du baril autorise la mise en exploitation de nouveaux gisements, de réserves « non conventionnelles » (sables bitumineux, zones maritimes ultra-profondes ou polaires, etc..) et favorise l'amélioration des techniques d'extraction.

² Hubbert développa l'idée que la courbe de production d'une matière première finie suivait une courbe en cloche, à peu près symétrique par rapport à son maximum. Il prédit ainsi le pic de pétrole des Etats-Unis pour 1970 (il eut lieu en 1971). Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 bousculèrent la symétrie de la « courbe en cloche », mais la logique de la démonstration ne fut pas remise en cause. Le rebond observé plus récemment est lié à l'exploitation de ressources non-conventionnelles, à la forte spéculation et à l'endettement, il n'est pas soutenable sur le long terme.

Ainsi, la production peut repartir à la hausse. A l'inverse, du côté de la demande, les économies des pays importateurs comme la France sont trop lourdement impactées lorsque le prix dépasse 100 \$/baril, ce qui tend à provoquer une baisse de la consommation. Mécaniquement, avec une offre en hausse et une demande en baisse, le prix diminue et ce sont les producteurs qui sont impactés. C'est pourquoi la courbe de production mondiale a davantage une forme de « plateau ondulé » que de « pic » - mais la baisse de production qui s'ensuit reste inéluctable.

Depuis quelques années, les États-Unis ont bouleversé le marché pétrolier avec un doublement de leur production en six ans (+4.5 Mb/j³). Une véritable "révolution" que personne n'avait vu venir, alors que l'économie mondiale n'était pas prête à absorber une hausse aussi rapide. Ainsi, l'offre de pétrole est devenue largement supérieure à la demande (surplus de 2.5 Mb/j) et c'est le prix élevé du pétrole entre 2009 et 2014 qui a permis ce phénomène. C'est également ce même prix qui a mis en difficulté les gros importateurs comme l'Europe et la Chine.

Cette situation rend la prospective particulièrement instable, pouvant aller jusqu'à de véritables contre-chocs comme celui vécu actuellement : effondrement des prix susceptible de neutraliser toute velléité de maîtrise de l'énergie, déstabilisation des alternatives comme les énergies renouvelables, blocage des projets nucléaires et charbon.

Il est important de noter que les hausses de prix du pétrole constatées depuis la seconde guerre mondiale sont indépendantes de ce phénomène. Parmi les facteurs importants de la hausse des prix des années 1970 ou 2000, on retrouve le manque d'investissements dans les moyens de production développés après la seconde guerre mondiale et après le premier choc pétrolier. Après 25 ou 30 ans de fonctionnement, les équipements doivent être renouvelés, ce que ne favorise pas un prix bas du pétrole. Mais lorsque la production industrielle ne peut plus faire face à la demande, les prix s'envolent et l'investissement dans le renouvellement des moyens de production intervient, desserrant la contrainte (ce mécanisme économique fonctionnant cependant avec de fortes inerties dans le temps).

Les limites atteintes avec le pic de Hubbert sont de nature différente, puisque l'investissement dans les moyens de production ne permet pas de desserrer la contrainte : passée l'extraction de la moitié des réserves, la baisse de la production est inéluctable, mécanique. Il est donc important de comprendre que le problème ne se pose pas à la dernière goutte de pétrole (fin des réserves), mais bien à partir du passage de ce pic (extraction de la moitié des réserves), ce qui rapproche singulièrement l'horizon des difficultés à venir. Plusieurs institutions, et pas forcément les plus radicales (Agence Internationale de l'Énergie par exemple) ont indiqué que le pic de Hubbert pour le pétrole "conventionnel" au niveau mondial avait probablement été passé à la fin des années 2000, et que la baisse de production est compensée par des techniques plus coûteuses et polluantes. Tout ceci est de nature à changer le regard que nous devons porter aux hausses de prix du pétrole constatées, qui ne sont plus uniquement conjoncturelles, mais structurelles, et qui n'en sont qu'à leur commencement.

³ Millions de barils par jour

La théorie de Hubbert ne s'applique pas seulement au pétrole, mais à l'ensemble des ressources finies ; pour les ressources énergétiques, citons le gaz, l'uranium, et dans une moindre mesure le charbon. Mais c'est bien sur le pétrole que la menace est présente à court terme (hausse des prix structurelle et forte attendue dans les 10 ans (sauf crise économique majeure), alors qu'au niveau de consommation actuelle, les pics de gaz et d'uranium sont envisagés entre 2040 et 2050, et plus tardivement pour le charbon).

R2- Pénurie de métaux

La théorie de Hubbert citée plus haut s'applique aux stocks finis de métaux de la même façon qu'au pétrole, et pour plusieurs métaux, le pic de Hubbert est suspecté d'avoir déjà été dépassé ces dernières années (cas de l'Or).

Les industriels s'appuient aujourd'hui sur une cinquantaine de métaux non ferreux⁴ pour leurs diverses productions. Parmi ces métaux, plusieurs tiennent une place importante dans le domaine de l'énergie, et leur pénurie est susceptible de constituer un facteur de rupture. Nous distinguerons les terres rares, et les autres métaux non ferreux (les métaux dits « rares », et les autres).

*Les terres rares*⁵

Parmi les métaux, ceux dont on entend le plus parler actuellement sont les terres rares. Ils sont constitués par les 15 lanthanides⁶, ainsi que le Scandium et l'Yttrium. Ce ne sont pas nécessairement des métaux particulièrement rares, contrairement à l'image que renvoie leur nom⁷, mais ils sont répartis inégalement sur la Terre, et la plupart du temps avec une faible concentration qui ne justifie pas pour le moment une exploitation commerciale. Ces terres rares sont ainsi produites en petites quantités (quelques tonnes à quelques dizaines de milliers de tonnes par an), ce sont généralement des sous-produits d'extraction d'autres minerais, mais leur intérêt stratégique est très élevé.

Leurs propriétés sont très diverses : optiques (utilisations dans les écrans couleurs, l'éclairage fluorescent et les fibres optiques), chimiques (craquage du pétrole, pots catalytiques), mécaniques (alliages, polissage du verre), magnétiques (miniaturisation d'aimants performants).

⁴ Pour illustration, et de façon non exhaustive ni hiérarchisée : Antimoine, Cadmium, Indium, Béryllium, Magnésium, Cobalt, Niobium, Fluorine, Platinoïdes (Platine, Ruthénium, Palladium, Iridium, Rhodium, Osmium), Gallium, Germanium, Tantale, Graphite, Tungstène, Germanium, Or, Lithium, Molybdène, Niobium, Tantale, Rhénium, 17 terres rares, ... L'uranium, évoqué plus haut, en fait également partie.

⁵ Le site suivant est une source intéressante pour comprendre les enjeux des métaux et des terres rares : www.ecoinfo.cnrs.fr/spip.php?rubrique59; il est basé initialement sur le travail d'informaticiens préoccupés par ces questions, qui ont rassemblés de nombreux chercheurs pour traiter de ces thématiques.

⁶ Lanthane, Terbium, Cérium, Dysprosium, Praséodyme, Holmium, Néodyme, Erbium, Prométhium, Thulium, Samarium, Ytterbium, Europium, Lutétium, Gadolinium

⁷ « Terres » est la dénomination des oxydes au début du XIXe siècle, lors de leur découverte, et « rares » renvoie au fait que ces métaux se trouvaient en petite quantité dans des minerais eux-mêmes peu courants à cette époque.

Ils sont notamment très utilisés aujourd'hui dans les outils des « nouvelles technologies de l'information et de la communication » (NTIC), d'où leur intérêt stratégique.

Leur intérêt dans le domaine de l'énergie est également important :

- Certaines terres rares (Dysprosium, Néodyme, Samarium) sont indispensables à la fabrication d'aimants compacts, de plus en plus employés dans la transformation énergie mécanique-énergie électrique (alternateurs – voir ci-dessous) : centrales hydroélectriques ou thermiques (nucléaire, charbon, ...), production éolienne, véhicules électriques, trains à grande vitesse.
- D'autres sont nécessaires pour l'éclairage performants : diodes électroluminescentes – « LED » (Europium, Terbium, Yttrium), lampes fluocompactes ou tubes cathodiques – « néons » (Gadolinium, Thulium, Néodyme, Cérium, Lanthane)
- D'autres encore (Cérium, Lanthane, Néodyme, Praséodyme) sont utilisées dans les batteries, par exemple les batteries NiMH (nickel-métal-hydrure) fréquemment utilisées dans les applications domestiques (téléphones sans fil, jouets, ...)
- Certaines enfin servent de marqueur dans les raffineries de pétrole (Scandium), d'alliages pour les canalisations de l'industrie pétrolière (Cérium), de catalyseur pour moteur à essence (Lanthane), d'additif dans le gasoil (Cérium et Lanthane) ou encore de matériau d'absorption pour les barres de contrôle de réacteurs nucléaires (Europium, Samarium).

Une pénurie de terres rares peut donc être un facteur de rupture important. Elle peut avoir plusieurs causes :

- Un événement inattendu comme le développement exceptionnel d'un produit consommateur de terres rares créant des tensions sur le marché
- Un problème technique, social, environnemental ou climatique sur la production ou l'approvisionnement. Rappelons que les enjeux environnementaux liés à la production de terres rares sont très lourds : dégagements de gaz toxiques (acides sulfurique et fluorhydrique), d'eau acide et de déchets radioactifs ; la mine de Mountain Pass, en Californie, avait été fermée en 2002 notamment pour des questions environnementales. Les conditions de travail effrayantes, dans les mines chinoises, sont également susceptibles d'engendrer des revendications sociales.
- Les déséquilibres offre-demande risquent d'arriver très rapidement, compte tenu de la dynamique de la demande et de la difficulté de production ; la Chine devrait consommer l'intégralité de sa production d'ici 2015. Le pic de Hubbert de certaines terres rares risque également d'être atteint assez rapidement (cas du dysprosium en Chine par exemple), l'horizon de temps étant du même ordre que le pétrole.

A court terme, la pénurie risque davantage de venir du choix stratégique d'un seul pays : la Chine, qui est aujourd'hui en position de quasi-monopole (plus de 95% de l'offre de terres rares en 2010), a décidé depuis 2009 d'imposer des quotas d'exportation sur cette ressource stratégique. Une poursuite, voire une accentuation de cette stratégie, pourrait limiter les productions d'équipements nécessaires à la transition énergétique ou renchérir leur prix, et inciterait les entreprises de pointe à des délocalisations en Chine, pour pouvoir accéder aux stocks de terres rares.

Les autres métaux non-ferreux

Les métaux concernés par les risques d'épuisement de la ressource ne sont pas forcément des métaux « exotiques » : certains « grands » métaux industriels sont directement concernés, comme le Zinc, l'Or, le Cuivre et l'Argent. Les gisements exploitables à un coût admissible sont de moins de 20 ans pour le Zinc et l'Or, moins de 25 ans pour l'Argent, et moins de 30 ans pour le Cuivre⁸. Ces métaux ont un rôle clé dans les domaines électriques et électroniques (câbles et bobinages pour le Cuivre, contacteurs pour l'Or, brasure et soudure pour l'Argent, Mémoires d'Accès pour le Zinc, pour ne citer que quelques exemples). Au-delà de la seule transition énergétique, c'est l'ensemble du monde industriel qui est concerné par ce facteur de rupture très peu pris en compte.

D'autres métaux, qualifiés de « rares », remplissent des fonctions plus spécifiques dans les process industriels, et ont un rôle potentiellement important dans le champ de l'énergie :

- Le Lithium, particulièrement important dans les batteries Li-ion,
- Le Platine, le Palladium, le Rhodium, catalyseurs dans l'automobile (émissions de particules et de NOx)
- Le Gallium et l'Indium, utilisés dans les LED à lumière blanche
- Le Rhénium et le Ruthénium, utilisés en alliage pour la fabrication des turbines hautes températures
- Le Cobalt, utilisé dans les alliages (turbines à gaz), les aimants, les batteries ou en catalyseur pour l'industrie pétrolière
- Le Tantale, utilisé en électronique (condensateurs miniatures) et en alliage (turbines à gaz)
- Le Zirconium, le Béryllium, le Niobium et le Hafnium utilisés dans le nucléaire (résistance aux flux de neutrons)

Ces métaux rares ont globalement des réserves estimées de quelques décennies tout au plus, comme les énergies fossiles ou l'uranium. La pénurie de ces métaux non ferreux constitue donc un facteur de rupture de même nature que celui des terres rares.

Les conséquences de ces pénuries de métaux peuvent être bénéfiques :

- Mise en place d'un recyclage systématique de ces métaux, les déchets constituant la seule ressource minière de pays comme la France ; ces choix industriels peuvent entraîner les autres secteurs industriels vers le recyclage
- Travail sur les usages de ces matériaux, avec une distinction des usages vitaux et des usages superflus, qui préfigurerait un travail plus large de hiérarchisation des usages au niveau de la société
- Evolution des exigences techniques et normatives pour orienter le recyclage vers des systèmes pouvant fonctionner sur le plus long terme (la « durabilité forte »), et non simplement des cycles industriels simplifiés ne pouvant fonctionner plus de quelques cycles (« durabilité faible »).

⁸ Source : [USGS](#) (Service Géologique des Etats-Unis)

Ces pénuries peuvent aussi, bien sûr, être à l'origine de délocalisations massives (pour l'accès aux stocks chinois en particulier) ou de conflits sur la ressource.

Précisions sur les énergies renouvelables et les terres rares

Le photovoltaïque

L'industrie solaire photovoltaïque est très souvent pointée du doigt pour sa présumée consommation importante de terres rares. Or cette industrie ne consomme pas de terres rares, ce qui vaut la peine d'être signalé.

Les panneaux contenant des métaux dits « rares » (pas des terres rares) sont issus des technologies de couches minces, plus récentes, qui ne représentent que quelques pourcents des parts de marché photovoltaïque. Ces technologies sont basées sur l'utilisation du Cadmium et Tellure (CdTe), ou sur les technologies CIS (Cuivre-Indium-Sélénium)/CIGS (Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium).

Plus de 95% des panneaux photovoltaïques produits aujourd'hui ne contiennent donc ni terres rares, ni métaux dits « rares » ; les composants principaux en sont le silicium (2^e matériau le plus abondant sur Terre après l'Oxygène), sous forme de verre et de « quartz » pour la cellule, l'aluminium pour le cadre, ainsi que le cuivre (câbles) et l'argent (soudures).

L'éolien

Une mise au point est également nécessaire concernant l'éolien, dont l'information circule largement qu'il est fortement dépendant des terres rares (en l'occurrence du Néodyme).

Les éoliennes sont basées sur des alternateurs pour produire du courant. L'alternateur est un moteur électrique (rotor - partie tournante, et stator - partie fixe) fonctionnant à l'envers : la rotation du rotor génère un courant dans le stator – on parle de générateur. L'utilisation de cette technique est la même pour l'éolien (le vent fait tourner le rotor), l'hydraulique (c'est l'eau qui entraîne le rotor), mais aussi les centrales thermiques (charbon, nucléaire, fioul ou gaz, où c'est la vapeur qui entraîne une turbine qui fait tourner le rotor).

Parmi les alternateurs en usage dans l'éolien, on distingue :

- Les générateurs asynchrones : ils ont le gros avantage de supporter de petites variations de vitesses (rafales de vent) mais exigent par contre la présence de multiplicateurs de vitesse (rotations de plusieurs centaines de tours/minute nécessaires), ce qui augmente la maintenance et le poids et empêche un démarrage à faible vitesse de vent (frottement). Ces générateurs sont simples, bien maîtrisés et relativement économiques à construire, et ils sont les plus utilisés dans l'industrie éolienne. Ils n'utilisent donc pas de terres rares, puisqu'ils ne comportent pas d'aimants permanents, mais sont basés sur des bobinages de Cuivre classiques.
- Les générateurs synchrones : ils peuvent se passer de multiplicateurs. Les systèmes à aimants permanents (le rotor est un aimant permanent) sont de plus en plus utilisés dans les éoliennes car ils cumulent des avantages de faible maintenance, de poids et de durée de vie (pas de multiplicateur) ainsi que de rendement.

Ces aimants contiennent des terres rares (en priorité du Néodyme, ainsi que du Terbium et du Dysprosium, qui donnent un alliage conservant ses propriétés magnétiques à haute température). Les coûts de ces aimants étaient, il y a encore peu de temps, beaucoup moins élevés que les bobinages de Cuivre, mais le renchérissement du prix des terres rares a inversé les données.

Par ailleurs, plusieurs constructeurs proposent aujourd'hui des générateurs synchrones sans aimant permanent (le rotor est un bobinage de cuivre), donc sans terres rares. Enercon en fabrique depuis plusieurs années, et plus récemment des fabricants chinois et japonais. La pénurie de terres rares ne menace donc pas la pérennité du développement éolien.

Les éoliennes à générateurs asynchrones sont très largement majoritaires dans le parc mondial installé. Dans les éoliennes à moteur synchrone installées, une moitié au moins est constituée d'éoliennes Enercon, qui a fait le choix de ne pas utiliser d'aimants permanents.

Au final, les éoliennes contenant des terres rares pour leurs aimants permanents représenteraient (chiffres 2010) moins de 5% du parc, avec des hypothèses de 15 à 25% du parc en 2015⁹.

Précisons enfin que ces problématiques sont similaires pour les moteurs des véhicules hybrides ou électriques : ils sont susceptibles d'utiliser de fortes quantités de terres rares (1 kg de Néodyme pour chaque moteur de la Prius de Toyota par exemple), mais peuvent également s'en passer (Tesla Motors).

R3- Pénurie de biomasse

Tout scénario énergétique soutenable est très fortement dépendant de la ressource en biomasse¹⁰, qui constitue la première source d'énergie renouvelable dans la grande majorité des cas. La pénurie de biomasse constitue donc potentiellement un facteur de rupture important pour ces scénarios.

La pénurie de biomasse peut avoir plusieurs origines, se dérouler à plusieurs échelles, et sur différentes ressources de biomasse. Elle peut avoir lieu de façon localisée (territoire infranational, pays, groupe de pays) ou à une échelle mondiale.

La pénurie de biomasse peut venir de contraintes physiques comme la réduction de la surface de terres disponible pour sa production. L'artificialisation des terres agricoles y contribue fortement : construction de routes, parkings, bâtiments ou autres infrastructures ; transformation de terres agricoles en pelouses ; achat de propriétés agricoles par des urbains non exploitants ; ... Rappelons que la France a perdu depuis 1960 environ 15% de sa surface agricole utile, et que la surface équivalente à un département moyen est artificialisée en France tous les 10 ans environ.

⁹ *Terres rares et enjeux économique*, D' Maggy Heintz, Note de l'ambassade de France au Royaume-Uni, 2011. En ligne : <http://www.ambafrance-uk.org/Terres-rares-et-enjeux-economiques>.

¹⁰ Nous définirons la biomasse comme l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale.

L'érosion des terres agricoles est également un enjeu important, puisque c'est la capacité de production de la biomasse par les sols qui est remise en cause. Les pratiques agricoles industrielles sont pour l'essentiel à l'origine de cette destruction des sols (intrants de synthèse se substituant à la qualité de la terre, destruction des haies protectrices, mise à nu des terres, techniques de labours, ...).

Les changements climatiques ont des responsabilités très fortes dans ces risques de pénurie de biomasse. La montée des océans conduit à une artificialisation des terres côtières, par submersion ou surtout par salinisation progressive (effet « Camargue » avec création de milieux saumâtres peu propices à la culture). La baisse des rendements agricoles est également un des effets importants des changements climatiques. La recrudescence des événements extrêmes (inondations, sécheresses, tempêtes) a des conséquences sur la production de biomasse, et l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau peut conduire à limiter la production de biomasse.

La pénurie de biomasse peut également venir de facteurs humains et politiques. L'exemple de la faim dans le monde est à ce titre éclairant : l'agriculture mondiale produit assez de calories en moyenne pour couvrir les besoins alimentaires de l'ensemble de la population mondiale, et pourtant la sous-alimentation touche des centaines de millions de personnes. Le problème ne vient pas seulement d'une mauvaise répartition des terres agricoles entre les pays, puisque ces écarts se retrouvent au sein même des pays (Inde, Brésil, ...).

La production de biomasse peut donc être utilisée à des fins politiques. Les grandes manœuvres mondiales actuelles autour de l'accaparement des terres agricoles fait partie de cette dynamique. Et il n'est pas impossible d'imaginer la même logique autour de la ressource biomasse en elle-même.

Les ressources concernées sont diverses. La ressource alimentaire est bien sûr la première qui vient à l'esprit, pour son caractère vital. Des pénuries alimentaires, à l'échelle régionale ou mondiale, constituent de puissants facteurs de rupture – les émeutes de la faim des dernières années ont fait évoluer la perception que nous pouvions avoir de la biomasse, notamment dans ses usages énergétiques (remise en cause des biocarburants notamment).

Les pénuries peuvent aussi porter sur la production de biomasse-énergie, ou de matières et matériaux. Rappelons que la pénurie de bois en Grande-Bretagne est considérée comme un des facteurs d'accélération de l'utilisation du « charbon de terre » (tourbe) puis du charbon fossile, à la source de la Révolution industrielle. Une pénurie de biomasse-énergie peut donc également devenir un facteur de rupture majeur.

En France, si l'arrivée du charbon fossile a permis d'enrayer la déforestation à partir de 1850, un renversement de situation, lié à la diminution de l'accès aux énergies fossiles et tenant compte de la forte augmentation de la population et de son niveau de vie, serait potentiellement catastrophique. Une telle situation peut déjà être observée en Grèce, puisqu'une forte augmentation des coupes de bois sauvages a été observée depuis que les citoyens ne sont plus en mesure de payer les hydrocarbures ou l'électricité. En 2012, quelque 13 000 tonnes de bois coupé illégalement ont été saisies par les autorités grecques.

Compte tenu de la place de la biomasse dans les scénarios énergétiques soutenable, il n'est pas invraisemblable que la biomasse soit prochainement aux centres de forts enjeux de pouvoir, au même titre que le pétrole et les autres ressources fossiles, dont elle est finalement la forme « renouvelable »...

R4- Pénurie d'eau

La pénurie d'eau peut être un facteur de rupture environnemental susceptible de modifier la prise en compte des enjeux énergétiques. La pression sur la ressource en eau est de plus en plus intense : prélèvements de l'industrie nucléaire (pour la France) et de l'agriculture, pollutions agricoles, industrielles et domestiques, imperméabilisation des sols, et bien sûr effets des changements climatiques. Ce risque fait intervenir des notions de qualité d'eau (risques d'eutrophisation, pollutions chimiques ou bactériologiques, salinisation, ...), de disponibilité de la ressource (volume) et d'accès à la ressource (inégaie répartition).

La région Centre-Val de Loire n'est particulièrement touchée par des risques chroniques de pénurie. Cependant, Météo France envisage une variabilité plus importante au cours de l'année, avec une recrudescence de phénomènes extrêmes (canicule, étiages sévères, crues majeures) pouvant se traduire par une baisse estivale de l'hydraulicité plus marquée. Le refroidissement des centrales nucléaires qui se trouvent le long de la Loire pourrait s'en trouver affecté, entraînant de graves conséquences sur le fonctionnement et la sûreté des centrales.

L'impact de ces pénuries peut avoir des conséquences multiples, du choc psychologique aux contraintes comme la baisse de la production de biomasse ou d'hydroélectricité.

3- Champ économique et financier

Le champ économique et financier peut être le lieu de facteurs de ruptures importants ; nous analysons ici la survenue d'une crise économique, et d'un crash boursier.

E1- Crise économique et financière

La crise économique peut intervenir à un niveau mondial ou plus régional (dans le sens : groupe de pays). La crise économique née dans les années 2000 a des effets que nous constatons nettement sur les consommations d'énergie : la baisse de la production industrielle et de la consommation des ménages et des entreprises induit une baisse de la consommation d'énergie. Cette réduction des consommations pourrait paraître positive dans le cadre d'un scénario énergétique soutenable qui exige une maîtrise des consommations d'énergie, mais le lien n'est pas si simple.

Une telle baisse de la consommation réduit les tensions sur les capacités de production d'énergie, et en quelque sorte « masque » les problèmes, le temps de la crise, sans y apporter de solutions ; elle est vécue comme une pause dans les évolutions de consommations, et non comme un moment de réformes structurelles des consommations et des productions d'énergie.

La réponse « mécanique » et systématique des gouvernements aux crises économiques est une recherche de relance de la croissance, sans discernement de ce qui peut être bénéfique ou nuisible à la transition énergétique – la grille de lecture économique, basée principalement sur le Produit Intérieur Brut (PIB), prime encore très largement sur la grille de lecture énergétique, telle que peut la définir le scénario négaWatt.

Ces choix sont patents, en France, sur les politiques de rigueur comme sur les politiques de relance : les principaux investissements publics mobilisés ces dernières années sont allés aussi bien au développement de la chaleur renouvelable ou de l'éolien off-shore que sur le développement d'autoroutes, le soutien au secteur aéronautique ou aux industries fossiles et fissiles. Le Grand Emprunt lancé par la France en 2010 apportait ainsi davantage de fonds à ASTRID, hypothétique réacteur de recherche nucléaire de « 4^e génération », que sur la rénovation thermique des logements...

Une crise économique et financière peut donc être un double facteur de rupture pour l'énergie :

- Elle peut retarder les recherches de solutions aux problèmes énergétiques, ou les masquer, et donc d'une certaine façon les accentuer : définition d'autres priorités que la transition jugée secondaire, délocalisations, pertes d'emplois, pertes de compétences, ... La perte de capacité d'investir est un élément majeur également dans la perspective de la transition : la perte de valeur de la monnaie peut renchérir les coûts d'équipement, et poser problème en particulier pour les énergies renouvelables, pour lesquelles les coûts d'investissement sont élevés. Cela est de nature à affaiblir les objectifs assignés à la lutte contre les changements climatiques, ou à délocaliser vers des régions moins contraignantes.
- Une crise économique et financière peut aussi constituer une opportunité de changement : la réduction des consommations d'énergie est un facteur pour augmenter ou ne pas baisser le pouvoir d'achat des entreprises et des ménages, tout comme la substitution au niveau territorial des consommations d'énergie fossile par des consommations d'énergies renouvelables locales. Ces deux axes, consommations et productions d'énergie, peuvent être à la base d'une stratégie de sortie de crise bien pensée. Notons également qu'une perte de valeur de la monnaie a pour conséquence un renchérissement des prix de l'énergie, qui peut inciter à la maîtrise de l'énergie.

La réponse à la crise actuelle au niveau mondial s'inscrit clairement dans le premier facteur de rupture, plutôt défavorable à la transition énergétique. La crise financière pourrait cependant avoir pour conséquence un renforcement du rôle des Etats dans la politique énergétique, par la reprise en main du financement des investissements d'infrastructures énergétiques notamment.

L'enjeu politique d'une crise économique et financière globale est donc multiple. Pour suivre un scénario énergétique soutenable, elle doit ainsi permettre qu'une politique industrielle de la transition énergétique soit engagée, avec :

- Un affichage cohérent (feuille de route),
- Une redéfinition des rôles des acteurs (Etat, collectivités, entreprises, citoyens),

- Des évolutions institutionnelles, réglementaires et fiscales permettant de garantir la continuité des politiques de maîtrise de l'énergie rendues indépendantes des artéfacts (évolutions conjoncturelles des prix de l'énergie par exemple) et anticipant les hausses structurelles prochaines des prix de l'énergie
- Des décisions cohérentes et coordonnées d'investissement dans les techniques efficaces, les énergies renouvelables et les réseaux

Rappelons enfin que le défi des changements climatiques risque de nous placer, faute d'actions fortes, dans une situation de crise économique majeure ; c'est ce qu'a montré l'économiste Nicholas Stern, ancien membre dirigeant de la Banque mondiale, qui a publié en 2006 pour le gouvernement britannique un rapport qui a fait date. Ces conclusions indiquaient que 1% du PIB investi à court terme permettrait d'atténuer fortement les effets des changements climatiques sans ralentir significativement l'activité économique, alors qu'une absence d'action risquait d'aboutir à une récession de l'ordre de 20% du PIB. Il a depuis indiqué qu'il jugeait que ses évaluations du coût de l'inaction étaient sous-estimées.

E2- Revendications sociales et emplois

Les revendications sociales au niveau mondial peuvent être des facteurs de rupture pour la mise en œuvre d'un scénario énergétique soutenable.

De telles revendications peuvent intervenir de façon importante en Chine par exemple. Les conséquences d'une hausse des salaires généralisée seraient une baisse de compétitivité du pays, ce qui rendrait envisageable la relocalisation d'un certain nombre de productions.

Les baisses d'investissement dans les industries fossiles (liées à la crise économique ou à des choix de transition énergétique) pourraient avoir des conséquences sociales importantes dans les pays producteurs (Asie centrale et Pays du Golfe notamment), suite aux pertes d'emplois. Notons également que les conséquences pourraient être le départ massif de travailleurs étrangers des pays du Golfe (les étrangers représentent plus des 2/3 de la population au Koweït, 4/5 au Qatar et ¼ de la population en Arabie Saoudite).

4- Champ géopolitique

Le champ géopolitique peut être source de facteurs de rupture pour les scénarios énergétiques soutenables. Nous retiendrons ici les potentialités de guerres ou de conflits locaux, et les choix stratégiques de pays pouvant influencer sur la transition énergétique.

G1- Guerres et conflits locaux

Le déclenchement de guerres ou de conflits locaux peut avoir pour cause ou conséquence directe ou indirecte une des nombreuses pénuries citées plus haut. Ils peuvent également survenir suite à des flux de population (tensions socio-économiques, accidents climatiques).

Ces facteurs de ruptures peuvent être vus suivant deux plans. Ils peuvent mettre en cause la transition énergétique en détournant les acteurs et l'ensemble de la population de l'action, en leur faisant modifier leurs priorités d'actions, et reporter leurs investissements sur d'autres enjeux que la transition.

Ils peuvent également inciter les acteurs et la population à agir pour réduire leur vulnérabilité. En ce sens, un travail sur la baisse des consommations d'énergie et sur l'autonomisation des systèmes énergétiques est un facteur important de sécurisation et contribue à la sécurité énergétique et à la sécurité d'approvisionnement. Le fait que le secteur de la défense des Etats-Unis soit à la pointe des travaux sur l'autonomisation des systèmes énergétiques et sur l'équilibre offre-demande en électricité (travail effectué notamment avec le Rocky Mountain Institute) est à ce titre significatif.

La réduction de la dépendance et du recours aux énergies fossiles et fissiles peut permettre d'apaiser les relations entre pays ou groupes qui sont aujourd'hui tentés de combattre pour la maîtrise et l'exploitation économique des gisements. En revanche, cela peut créer de graves problèmes économiques dans les pays producteurs dont l'essentiel des recettes est lié au commerce de ces ressources.

G2- Choix stratégiques nationaux ou régionaux

Les choix stratégiques d'un pays ou d'un groupe de pays peuvent constituer un facteur de rupture pour la mise en œuvre d'un scénario énergétique soutenable. Les décisions de la Chine, ou de l'Union européenne, de se lancer sur la trajectoire d'un scénario type négaWatt, avec les moyens correspondants, est susceptible d'engendrer à court/moyen terme une baisse rapide des coûts technologies efficaces et renouvelables, de déverrouiller les blocages psychologiques sur la faisabilité d'un tel scénario, et permettra une montée en compétences et une diversification des offres industrielles et de services susceptibles de créer de nouveaux marchés pour les pays pionniers (modèle du Danemark pour l'éolien, ou de l'Allemagne pour les équipements des bâtiments performants, mais sur une palette de biens et de services beaucoup plus large). Ces choix stratégiques assumés et affichés pourraient ainsi créer un cercle vertueux, les autres pays étant incités à suivre cette dynamique pour garder leur compétitivité et améliorer la résilience.

Comme cela a déjà été évoqué précédemment, un aspect contreproductif de ce facteur de rupture peut être, en revanche, un risque de desserrement de la contrainte sur les prix de l'énergie au niveau mondial, qui pourrait avoir pour effet une baisse de l'incitation à s'engager sur un tel scénario ambitieux – mais cet effet d'aubaine ne peut être que temporaire compte tenu des conséquences du Pic de Hubbert sur les prix de l'énergie.

5- Champ technologique

Les évolutions technologiques peuvent constituer des facteurs de ruptures importants. Nous citerons la survenue d'un accident nucléaire, d'un défaut générique sur les réacteurs, et la découverte d'une rupture technologique majeure en production ou en consommation d'énergie.

T1- Accident nucléaire (France/Europe)

La survenue d'un accident nucléaire du type « Fukushima » en France ou en Europe est susceptible de bouleverser le paysage énergétique. Un tel accident pourrait conduire à un rejet massif par la population de cette technologie ; rejet actif et plus seulement passif comme aujourd'hui. Cela aurait pour conséquence d'obliger les politiques et les acteurs de l'énergie à trouver des solutions pour une sortie du nucléaire « à la Japonaise », donc en quelques mois.

Rappelons qu'au Japon, 3^e producteur d'électricité nucléaire au monde en 2010, toute la société s'est organisée pour faire face à l'arrêt de l'ensemble des 54 réacteurs nucléaires, qui en 2010 produisaient 29% de l'électricité japonaise. Les actions observées dans les semaines et les mois qui ont suivi la catastrophe sont venues de l'Etat, des acteurs économiques et des individus : planification de baisse des consommations dans l'industrie, investissement des entreprises (grandes surfaces par exemple) pour réduire la climatisation, évolutions culturelles (autorisations de ne plus porter de cravates et d'ouvrir les cols de chemise) dans les entreprises, effort de sobriété des particuliers (réduction des températures de climatisation, ...).

Un accident nucléaire du type « Fukushima » en France ou en Europe induirait de fait une priorisation de la réduction des consommations d'énergie à court terme, et un changement d'échelle dans le déploiement des énergies renouvelables, avec un passage par une transition fossile non optimisée, donc plus importante que dans un scénario type négaWatt.

Ce type d'accident aurait aussi un impact profond sur l'opinion publique. A Japon, même si le gouvernement a autorisé le redémarrage de plusieurs réacteurs, l'opinion publique, traumatisée par la catastrophe, reste globalement hostile à l'énergie nucléaire. En France où le nucléaire assure plus de 75 % de la production d'électricité, l'opinion publique est globalement assez partagée, avec cependant un effritement lié aux récents déboires économiques et techniques de la filière¹¹. Il est vraisemblable qu'en France, si une telle catastrophe se produisait, l'opinion publique se retournerait massivement, compte tenu de la densité de réacteurs sur le territoire, et du fait que tous les habitants sont potentiellement concernés par le risque.

T2- Défaut générique des réacteurs nucléaires

¹¹ <http://www.sfen.org/fr/rgn/opinion-publique-le-nucleaire-nest-ni-de-droite-ni-de-gauche>

La problématique du « défaut générique » sur les réacteurs nucléaires a un caractère moins traumatisant pour la population, mais constitue un risque bien réel pour les acteurs de la filière. Les réacteurs ont été développés en un temps très court au niveau industriel (de l'ordre de 20 ans), en tout état de cause plus court que leur durée de vie, ce qui a fortement limité les retours d'expérience ; le vieillissement d'un matériau sur 30 ou 40 ans peut être différent sous contrainte de laboratoire et en conditions réelles. Le défaut générique est donc la survenue d'un problème sur un équipement ou une structure commun à plusieurs réacteurs du parc de production, qui nécessite des interventions sur l'ensemble des équipements ou structures similaires.

Un défaut générique mettant en cause la sécurité et nécessitant un arrêt de tout ou partie des réacteurs conduirait à la mise en arrêt jusqu'à réparation (si elle est possible) du défaut générique. Dans une moindre mesure, cette situation nous ramène à une réponse « à la Japonaise » évoquée ci-dessus, au moins sur la réduction des consommations d'électricité.

A titre d'exemple, évoquons pour le parc français le cas des générateurs de vapeurs ou « GV » (système permettant l'échange de chaleur entre le circuit primaire venant du cœur irradié et le circuit secondaire, et conduisant à la production de vapeur qui entraîne les turbines de production électrique). Ces systèmes, qui font partie des pièces les plus sensibles d'un réacteur, sont frappés d'un défaut générique (ou de défauts : corrosion, fatigue, colmatage) pouvant conduire à des ruptures de tubes, et donc à une contamination importante du circuit secondaire. Ce défaut générique a conduit EDF à décider de leur remplacement progressif, avec des conséquences budgétaires lourdes (plusieurs milliards d'euros d'investissement, chaque GV mesurant une vingtaine de mètres de hauteur, pesant 300 tonnes et coûtant plus de 150 millions d'euros pièce – il y a 3 GV par réacteur et 58 réacteurs en France) et des arrêts de tranche pour travaux de plusieurs mois.

Tout récemment, sur un certain nombre de générateurs de vapeur, la qualité des aciers utilisés pour leur construction a été mise en doute, avec des problèmes d'hétérogénéité de la concentration en carbone. 26 générateurs de vapeurs dans 18 réacteurs (1/3 du parc) sont concernés¹². Pour cacher cette situation, des rapports de contrôles ont été falsifiés : la confiance dans la sûreté du parc est ainsi fondamentalement remise en cause. L'arrêt d'un nombre important de réacteur a conduit RTE à annoncer des risques de coupure pour l'hiver 2016-2017, notamment en décembre et janvier.

T3- Rupture technologique (production)

Un facteur de rupture pourrait être la découverte soudaine d'une importante source de production d'énergie passée jusque-là inaperçue.

Ce facteur de ruptures est susceptible de réduire l'intérêt d'un scénario de transition énergétique type négaWatt, sous certaines conditions : que cette source de production soit pérenne, peu impactante pour l'environnement, qu'elle puisse être déployée à court/moyen terme (temporalité des enjeux climatiques et d'épuisement des ressources), sans investissements démesurés et sans risque technologique majeur.

¹² Conférence de presse Global Chance du 5 octobre 2016

On le voit, ces conditions sont nombreuses, et rendent plus hypothétique encore la survenue d'une telle découverte. Cette recherche du Graal de la source d'énergie illimitée, fantasme de tout énergéticien (non « négaWatt »), n'est pas nouveau : Lewis Strauss, directeur de la Commission de l'Énergie Atomique des États-Unis, affirmait en 1954 en évoquant l'énergie nucléaire qu'elle permettrait de produire tant d'électricité à si bas prix qu'il serait inutile de la compter (« too cheap to meter »).

Soulignons que le fait de disposer d'une énergie "illimitée" permettrait d'accroître encore davantage la consommation de toutes les ressources naturelles de la planète, qu'il s'agisse de biodiversité animale et végétale, de minéraux, de métaux ou de ressources fossiles.

L'hypothèse prise en compte est donc la survenue qu'une rupture technologique, répondant en tout ou partie aux conditions citées.

6- Champ démographique

Deux facteurs de ruptures sont proposés dans le champ démographique : la chute de la population mondiale, ou l'accentuation des flux migratoires.

D1- Chute de population

Les prévisions démographiques actuelles prévoient une hausse continue et soutenue de la population mondiale, avec un ralentissement progressif de la hausse pour cause de transition démographique des pays moteurs de cette hausse.

Une chute de la population mondiale est cependant un facteur de rupture envisageable. Elle pourrait être liée plus ou moins directement aux changements climatiques (pénurie d'eau, de biomasse, guerres ou problèmes sanitaires type pandémie), ou à la raréfaction du pétrole.

En restant sur un unique point de vue énergétique, une forte baisse de population entraînerait mécaniquement des réductions de consommations d'énergie, en baissant les besoins (de chauffage, de transports, de biens et services, ...) et aurait pour conséquence de desserrer la contrainte en libérant de l'espace (baisse des consommations alimentaires, notamment de viande, réduction du nombre de logements, ...). Pour autant, elle serait susceptible de déstructurer des secteurs entiers de la société et aurait aussi pour conséquence une perte de compétences et de capacité d'action (emploi en particulier).

D2- Flux migratoires

L'augmentation brutale et incontrôlée des flux migratoires internationaux peut être la conséquence de l'augmentation des accidents climatiques, de pénuries d'eau, de biomasse, de pétrole, de guerres, d'un accident nucléaire, ...

Mal anticipés, ces flux sont susceptibles de rendre plus difficiles à tenir les objectifs d'un scénario énergétique soutenable sur un territoire donné, en conduisant à des hausses de consommations, et en accentuant la pression sur la ressource (biomasse notamment).

Nous sommes ici dans un domaine où les choses évoluent rapidement, du fait du chaos politique dans certaines régions (Afrique et du Moyen Orient) qui poussent beaucoup de personnes peu qualifiées à fuir leur pays. L'intégration de ces populations, notamment dans le monde du travail, se révèle plus difficile et lente que prévue (problème de la langue, de l'absence de formation, etc...).

II- Principales conséquences envisageables

Pour plus de lisibilité, les conséquences de la survenue des facteurs de ruptures évoquées auparavant ont été classées en trois grandes catégories : les chocs psychologiques, socio-économiques et technologiques. Les chocs retenus dans la suite sont des chocs sociétaux. Cette simplification des conséquences possibles doit être considérée avec l'humilité nécessaire à ce type d'exercice, compte tenu de la complexité et de l'imprévisibilité inhérente aux sujets traités.

1- Chocs socio-économiques

Comme cela apparaît clairement à la lecture des différents facteurs de ruptures, les chocs socio-économiques possibles sont nombreux. Nous prendrons en compte ici les effets sur les prix de l'énergie et sur la précarité énergétique.

CS1- Conséquences sur les prix de l'énergie

Un grand nombre de facteurs de ruptures aboutit, directement ou indirectement, à une moins bonne accessibilité à l'énergie, qui est la tendance de long terme de loin la plus probable. Ce peut être dû à une hausse du prix de l'énergie, mais aussi à une plus grande précarité des ménages qui conduit à une baisse de leur budget énergie. Compte tenu des facteurs de ruptures évoqués, nous considérerons une hausse du prix des énergies fossiles et de l'électricité, une baisse (conjoncturelle) de ces prix, avec un point sur les conséquences d'un renchérissement des prix plus « sectoriel ».

Hausse des prix des énergies fossiles et de l'électricité

Les premières touchées sont les énergies fossiles et l'électricité (pénurie, conséquences des changements climatiques, guerre, accident nucléaire, choix politiques forts), avec une hausse des prix qui paraît un facteur de rupture certain, la question principale étant l'horizon (années, ou décennies ?), et le caractère contraint ou volontaire de cette augmentation.

Les conséquences pour la mise en œuvre d'un scénario énergétique soutenable sont majeures : un prix élevé est un signal fort pour la maîtrise de la consommation d'énergie, et la rentabilité des énergies renouvelables est améliorée. C'est donc un facteur clé d'accélération de la mise en œuvre d'un scénario énergétique ambitieux, dans tous les domaines de consommation de l'énergie (industrie, transports, bâtiments). Les entreprises ont intérêt à rationaliser leurs consommations pour rester compétitives (et ce d'autant plus que les prix de l'énergie représentent une part de plus en plus importante du coût de production), la rentabilité des actions d'économie d'énergie s'améliore également.

A l'extrême par contre, si les prix augmentent trop vite et trop haut, c'est la capacité d'adaptation de chaque acteur qui sera mise à l'épreuve, avec pour conséquence des actions de réduction de consommations « à la Japonaise » (donc très dirigées).

Toutefois, le fait que ces hausses soient subies ou choisies fait toute la différence au niveau de leurs conséquences sociales. C'est un point clé, aussi nous y reviendrons (voir ci-dessous, précarité énergétique).

Baisse conjoncturelle des prix de l'énergie

Certains facteurs de ruptures (baisse de la population, rupture technologique, crise économique, décision politique...) peuvent permettre un desserrement conjoncturel de la contrainte des prix de l'énergie au niveau mondial. Quelle qu'en soit l'origine, cette baisse peut paradoxalement avoir deux effets opposés en fonction de la stratégie des acteurs.

Une telle baisse peut être très déstructurante pour les politiques de maîtrise de l'énergie, voire les politiques énergétiques en général – l'exemple-type de ces déstructurations étant le contre-choc pétrolier du milieu des années 1980, qui ont conduit la France à abandonner la politique de maîtrise de l'énergie mise en place après les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979. Elle conduit à une moindre rentabilité des actions d'économie d'énergie et l'investissement dans les énergies renouvelables, et à ce titre peut dissuader les acteurs de s'engager ou de poursuivre les actions de transition énergétique.

En revanche, si la stratégie de l'Etat a été, au préalable, d'anticiper une hausse des prix de l'énergie et d'appliquer une fiscalité en ce sens, une détente des prix signifie potentiellement des revenus supplémentaires pour l'Etat, qui dégage alors une capacité d'investissement complémentaire qui peut être réinvestie dans la transition énergétique. C'est la politique qui a été conduite par les pays scandinaves après le contre-choc pétrolier de 1986.

On le voit, l'Etat a un rôle important d'amortisseur à jouer face à ces évolutions de prix de l'énergie.

Renchérissement « sectoriel » des prix

L'augmentation des prix des métaux ou les pénuries de ressources (biomasse notamment) peuvent impliquer des hausses de prix pour certaines sources d'énergie, et certaines techniques (véhicules électriques, batteries, ...) utiles à la transition énergétique.

Pour certains métaux, les répercussions d'une hausse des prix porteront sur l'essentiel des procédés industriels (pénurie de Cuivre, d'Argent ou de Zinc par exemple). Cela ne signifie pas que les techniques performantes ou renouvelables ne seront pas touchées, mais les autres techniques également, et les conséquences rationnelles d'un tel phénomène vont globalement dans le sens de la transition énergétique :

- Hiérarchisation des usages nécessitant de tels métaux (du vital au superflus)
- Réductions des consommations de métaux en améliorant les process
- Augmentation du recyclage
- Recherche des matériaux ou des stratégies de substitution
- Reconversion de certaines entreprises pour rediriger l'usage des ressources sur les productions prioritaires.

Pour les métaux rares à usage plus spécifiques (y compris les terres rares), les pénuries peuvent handicaper le développement de filières spécifiques – le Lithium par exemple par rapport aux batteries Li-ion. Ces éléments plaident pour maîtriser le poids de la technologie « de pointe » dans les scénarios énergétiques, et en tout état de cause pour porter les choix sur des filières et technologies à moindres risques face à ces facteurs de rupture. Les panneaux solaires photovoltaïques au Silicium constituent un exemple de choix extrêmement robuste face à ces enjeux, contrairement aux rumeurs qui circulent très fréquemment sur cette technologie. Pour l'éolien, avec comme principal enjeu le Néodyme des aimants, les réponses risquent d'être similaires à la stratégie citée plus haut (arbitrages entre usages, amélioration des process, recyclage, recherche de substitution).

Notons que compte tenu de la baisse continue des coûts des énergies renouvelables, un choc de ce type est susceptible de limiter temporairement cette baisse, mais ne devrait pas remettre en cause la dynamique globale.

Les tensions sur la biomasse (pénurie d'eau, impacts climatiques, ...) paraissent d'un autre ordre, compte tenu de la place majeure de cette ressource sous ses aspects alimentaires bien sûr, mais aussi biomatériaux et biomasse-énergie (la biomasse-énergie représente généralement de l'ordre de la moitié de la production d'énergie renouvelable dans les scénarios énergétiques soutenable).

Une pénurie de biomasse aurait des conséquences traumatisantes au niveau mondial comme au niveau local (émeutes de la faim, épuisement de la fertilité des sols, impact socio-économique de l'épuisement du bois de feu, flambée des prix des terres arables, accentuation de la marginalisation des paysans, ...), avec peu de marge de manœuvre pour y répondre et avec des impacts qui menaceraient directement la vie de milliards d'humains.

Conserver la maîtrise sur cette ressource face aux facteurs de ruptures est un enjeu clé des prochaines décennies. Pour cela, la mise en place de scénarios du type AFTERRES2050, semble la meilleure garantie.

CS2- Conséquences sur la précarité énergétique

Une famille est considérée en état de précarité énergétique lorsqu'elle consacre plus de 10% de son budget à ses dépenses énergétiques. En France, on considère qu'en 2011, 3,5 millions

de familles étaient en situation de précarité énergétique, et que 2 millions de familles supplémentaires y entreraient pour une hausse des prix de l'énergie de 20%¹³.

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les augmentations des prix de l'énergie constituent des facteurs de ruptures dont l'occurrence est très probable à court ou moyen terme, pour des raisons physiques (raréfaction) ou économique (taxes pour lutter contre les changements climatiques). Le simple prolongement des courbes de prix de ces dernières années, qui est probablement conservateur, nous donne la mesure des hausses envisageables ; rappelons que le prix du gaz a augmenté de 70% entre fin 2001 et fin 2011, et le prix du fioul domestique a été multiplié par trois sur la même période.

L'importance des chocs sociaux qui résulteront de ces hausses de prix dépend fortement d'un paramètre : ces hausses seront-elles anticipées, ou subies ?

Subies, elles seront vécues comme profondément injustes par la société, et frapperont en priorité les familles les plus fragiles : celles qui, n'ayant pas les moyens de loger à proximité de leur travail ou en centre urbain, sont contraintes de se déplacer en véhicules individuels et ne pourront baisser leurs dépenses de carburant sans quitter leur travail, ou leur logement. Celles qui, faute de pouvoir financer des travaux de rénovation thermique, ne pourront baisser significativement leur consommation de chauffage. La conjonction de ces deux phénomènes, chauffage et déplacements, touchera particulièrement les périurbains. La perspective de lotissements en situation de faillite collective et d'abandon, comme à la suite de la crise des « subprimes » aux Etats-Unis, n'est pas exclue en France dans ce contexte. Subies, ces hausses de prix de l'énergie seront un facteur d'aggravation accélérée des inégalités, les portant à des niveaux difficilement supportables dans une société démocratique.

Choisies et anticipées, ces hausses de prix peuvent être amorties pour les plus fragiles. Un point important est de ne pas proposer de systèmes maintenant les prix de l'énergie à des niveaux artificiellement bas, car ces mécanismes protecteurs envoient un mauvais signal trop protecteur aux consommateurs, en leur laissant imaginer que les prix peuvent rester durablement bas. La stratégie d'anticiper la hausse des prix de l'énergie pour que les acteurs intègrent durablement ce signal et adaptent leur comportement, tout en dégagant des fonds pour amortir cette hausse auprès des plus fragiles, semble être une stratégie adaptée aux enjeux (stratégie « à l'allemande »).

Note : les conséquences sur l'emploi, qui auraient pu être traitées au même titre que celles sur la précarité énergétique, n'ont pas fait l'objet d'un développement spécifique car elles nécessiteraient, compte tenu de la complexité des liens avec les facteurs de ruptures prise en compte, des études spécifiques.

2- Chocs psychologiques

Les facteurs de ruptures pris en compte sont susceptibles de percuter la façon qu'a la population d'appréhender les enjeux énergétiques – avec un certain affaiblissement de cette image, nous avons qualifié ce phénomène de « choc psychologique » au niveau de la société.

¹³ Source : Réseau des Acteurs de la Pauvreté et de la Précarité Énergétique dans le Logement ([RAPPEL](#))

Nous prendrons en compte les conséquences en termes de volonté de changement de stratégie globale d'une société, et le rejet par la société d'une technologie.

CP1- Volonté de changement de société

Les facteurs de ruptures comme la répétition des événements climatiques extrêmes, des crises ou des pénuries peuvent conduire à changer la vision que peut avoir la majorité de la société de son évolution souhaitable et souhaitée. Ils peuvent aussi conduire à ce que cette société, d'une posture majoritairement passive face aux défis, devienne active et moteur du changement. A l'extrême, c'est en quelque sorte le syndrome de la Révolution française ou, plus proche de nous, des Révolutions arabes.

Cette volonté nouvelle de changements concrets et rapides conduirait à une redistribution des jeux d'acteurs et de pouvoir dans le secteur de l'énergie. Elle peut avoir au moins deux visages : elle peut conduire à plébisciter un nouveau mode de gestion de l'énergie, moins centralisé, moins dépendant des lobbies et plus fondés sur les besoins et potentiels des territoires ; on peut aussi imaginer qu'elle puisse un jour conduire à ce que la majorité de la population soutienne ou laisse advenir la mise en place d'un gouvernement beaucoup plus directif, voire autoritaire, pour prendre en main la gestion de ces problématiques, suivant le modèle d'une « écolo-dictature ».

Les conséquences en termes de transition énergétique sont délicates à définir dans ces deux hypothèses, ce qui nous conduit à limiter ici cette analyse.

CP2- Rejet d'une technologie

Le principal facteur de ruptures évoqué pouvant aboutir à un rejet d'une technologie est l'accident nucléaire. Dans cette optique, la population, comme au Japon, peut s'investir pour accélérer la sortie de cette technologie, et en limiter les conséquences par des efforts consentis, voire exigés, bien plus élevés que tout ce qui aurait pu être imaginé avant l'accident. En l'absence de chiffres fiables sur les réductions de consommations ou les importations d'énergie fossile au Japon, les conséquences que nous soulignerons sont :

- La décision au niveau de l'Etat de réglementer de façon beaucoup plus contraignante la consommation d'électricité, y compris au niveau des entreprises et des industriels (effacements de production),
- La promotion faite par les entreprises sur leurs efforts pour réduire leur consommation d'électricité, valorisée comme un acte « patriotique »
- L'adaptation des codes culturels, pourtant très stricts, pour réduire davantage encore la consommation – l'exemple-type est celui de l'abandon de la cravate et la pose de la veste au travail, pour limiter les besoins de climatisation.
- La limitation volontaire par les citoyens de leur consommation d'électricité

Ces pressions et efforts citoyens peuvent conduire à adapter les comportements aux niveaux de consommation nécessaires pour se priver de cette technologie. C'est donc le choix d'une entrée « à marche forcée » dans la mise en œuvre de la transition énergétique.

D'autres technologies peuvent soulever des rejets par la population, mais probablement aucune, à court terme, ne serait du même niveau qu'un rejet de la technologie nucléaire. L'éolien, qui connaît en France des opposants virulents quoique peu nombreux, pourrait susciter un rejet plus massif et contraindre à limiter son développement dans certaines conditions : un développement non raisonné, basé sur de purs intérêts industriels et non citoyens, de projets massifs réalisés sans concertation, par exemple.

Parmi les technologies qui pourraient également engendrer des rejets massifs de la population se trouve la géo-ingénierie (tentatives d'atténuations des changements climatiques par manipulations humaines directement menées sur le système climatique : ensemencement des océans en fer, ...).

3- « Chocs » technologiques

Les facteurs de ruptures envisagés aboutissent à des « chocs » technologiques de différentes natures : la mise à l'arrêt nécessaire d'une source de production et la découverte d'une nouvelle source de production d'énergie.

CT1- Arrêt d'une source de production d'énergie

Le facteur de rupture envisagé est un défaut générique sur une partie du parc de réacteurs nucléaires. A la différence de l'accident nucléaire, le choc psychologique au niveau de la population serait faible. Les conséquences peuvent néanmoins être lourdes, et peuvent aller de l'arrêt temporaire, potentiellement long en fonction du coût des travaux, à l'arrêt total du parc. Des défauts identifiés sur des parties non réparables, ou trop lourdes à réparer, conduiraient à devoir maintenir à l'arrêt les réacteurs, et impliqueraient la mise en place d'un scénario « à la Japonaise » ou qui s'en rapprocherait pour parvenir à une brutale réduction des consommations d'électricité, en fonction du nombre de réacteurs à arrêter. Ce type d'événement conduirait à entrer dans la transition énergétique « à marche forcée ». A notre connaissance, aucune étude prospective officielle n'étudie les conséquences d'un tel problème générique ni de sa gestion.

CT2- Nouvelle source de production d'énergie

La découverte d'une nouvelle source de production d'énergie pourrait modifier la mise en œuvre d'un scénario énergétique. Dans l'hypothèse où cette source d'énergie remplirait toutes les qualités de soutenabilité (pérenne, peu chère, peu impactante pour l'environnement, ...), la conséquence principale serait de desserrer la contrainte de maîtrise des consommations d'énergie et de développement des énergies renouvelables. Insistons sur un point : une telle découverte ne rendrait pas caduques les efforts effectués pour la maîtrise des consommations : ces actions de maîtrise de la demande sont des actions « sans regret », bénéfiques quelle que soit la suite du scénario.

Dans l'hypothèse où cette source ne remplirait pas toutes les qualités requises, l'approche serait alors différente : source de production chère, ou risquée, ou trop centralisée et donc vulnérable ou nécessitant de grosses évolutions des réseaux, ou encore trop impactante pour l'environnement ou consommatrice de ressources. Dans ce cas, un scénario type négaWatt garderait tout son intérêt, car une telle source d'énergie ne remplirait pas les critères de développement durable nécessaire à sa sélection.

Conclusion

L'analyse des facteurs de ruptures nous conduit dans un monde à l'avenir peu rassurant, compte tenu des nombreuses évolutions possibles, dont trop peu sont optimistes.

Cependant, *le pire n'est jamais certain*, et le choix du scénario négaWatt est de porter à la table des débats les évolutions souhaitables, les choix qui n'hypothèquent pas l'avenir (« sans regret »), les propositions réalisables avec les meilleurs outils d'aujourd'hui, plutôt qu'avec les hypothétiques solutions de demain...

Ce scénario, associé pour l'enjeu majeur de la biomasse au scénario AFTERRES2050, n'est certainement pas la solution miracle face à tous les défis et face à toutes les ruptures – mais il apparaît robuste face aux ruptures énoncées, et constitue la stratégie de bon sens la plus sûre pour relever les défis énergétiques et climatiques.

Imprimé sur papier 100% recyclé

