HAL
open science

L'économie du nucléaire revisitée - Leçons de l'apprentissage d'une technologie complexe par des accidents majeurs

Dominique Finon

To cite this version:

Dominique Finon. L'économie du nucléaire revisitée - Leçons de l'apprentissage d'une technologie complexe par des accidents majeurs. 2012. hal-00866419

HAL Id: hal-00866419

https://hal.science/hal-00866419

Preprint submitted on 30 Sep 2013

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.

DOCUMENTS DE TRAVAIL / WORKING PAPERS

No 40-2012

L'économie du nucléaire revisitée

Leçons de l'apprentissage d'une technologie complexe par des accidents majeurs

Dominique FINON

May 2012

CIRED Working Papers Series

C.I.R.E.D.

Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement

ENPC & CNRS (UMR 8568) / EHESS / AGROPARISTECH / CIRAD / MÉTÉO FRANCE

45 bis, avenue de la Belle Gabrielle

F-94736 Nogent sur Marne CEDEX

Tel : (33) 1 43 94 73 73 / Fax : (33) 1 43 94 73 70

www.centre-cired.fr

***L**'économie du nucléaire revisitée*
Leçons de l'apprentissage d'une technologie complexe par des accidents majeurs

Résumé

L'accident de Fukushima repose la question de la viabilité sociale et économique de la technologie nucléaire. Pour y répondre on analyse ici le processus d'internalisation des coûts externes du nucléaire qui se concrétise par une complexification permanente de la technologie et qui présente la particularité d'être scandé par des accidents majeurs. Il a contribué à désorganiser le processus d'apprentissage de la technologie et à mettre en question les préférences sociales pour finir par mettre en question sa compétitivité pour les investisseurs. Des institutions indépendantes de sûreté sont devenues une condition de son déploiement au risque de ne pas faciliter la stabilisation de la technologie, condition de sa viabilité économique. Dans cette perspective, l'article montre que la nouvelle séquence d'internalisation des coûts externes du nucléaire ouverte par Fukushima aura des effets limités sur les coûts, du fait des étapes antérieures d'approfondissement 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 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 ce bien public mondial que constitue l'acceptation du nucléaire.

Mots-clés: technologie nucléaire, risque, complexité, accident majeur, autorités de sûreté, acceptabilité sociale, internalisation des coûts.

o

***T**o revisit economics of nuclear technology*
Lessons from the learning of a complex technology by major accidents

Summary

The Fukushima accident raises again the issue of the social and economic viability of nuclear technology. To re-evaluate this viability, we analyse the past process of internalisation of external costs of nuclear energy, which present the specificities to be chanted by accidents and has had a constant effect of complexification. This process has provoked a de-organisation of the classical learning process reflected in constant cost increases and the change of social preferences, to end up by the lack of competitiveness before climate policies. Independent institutions of safety regulation have become essential elements of the social embeddedness of nuclear technology at the expense of technology stability and standardization, condition of its competitiveness. In this perspective, the paper argues that the new sequence of social costs' internalization opened by Fukushima will have limited effects on costs, because of anterior steps of safety improvements. Nuclear technology complexification reaches its asymptote: it is being to overcome the challenge of "learning by major accidents". On the other hand nuclear institutions must be re-designed in such a way that it could guarantee maximum safety records and minimum residual risks by going to the other root of the safety issue, the degree of independence and capabilities of the safety authorities in every country, what cannot be decreed. It is nevertheless at this price that could be preserved the global public good of the social acceptance of nuclear technology by limiting drastically chance of new accidents.

Keywords: nuclear technology, risk, complexity, major accident, safety authorities, public acceptance, social costs' internalization.

L'économie du nucléaire revisitée.

Leçons de l'apprentissage d'une technologie complexe par des accidents majeurs.

Dominique FINON*

CIRED

Mai 2012

Résumé

L'accident de Fukushima repose la question de la viabilité sociale et économique de la technologie nucléaire. Pour y répondre on analyse ici le processus d'internalisation des coûts externes du nucléaire qui se concrétise par une complexification permanente de la technologie et qui présente la particularité d'être scandé par des accidents majeurs. Il a contribué à désorganiser le processus d'apprentissage de la technologie et mettre en question les préférences sociales pour finir par mettre en question sa compétitivité pour les investisseurs. Des institutions indépendantes de sûreté sont devenues une condition de son déploiement au risque de ne pas faciliter la stabilisation de la technologie, condition de sa viabilité économique. Dans cette perspective, l'article montre que la nouvelle séquence d'internalisation des coûts externes du nucléaire ouverte par Fukushima aura des effets limités sur les coûts, du fait des étapes antérieures d'approfondissement 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 il faut arriver à garantir la sûreté maximale en s'attaquant à l'autre racine du problème, celui de l'indépendance et de compétences des autorités de sûreté dans tous les pays, ce qui ne se décrète pas. C'est pourtant à ce prix que sera préservé ce bien public mondial que constitue l'acceptation du nucléaire.

Mots-clés: technologie nucléaire, risque, complexité, autorités de sûreté, accident majeur, acceptabilité sociale, internalisation des coûts

*adresse mail : finon@centre-cired.fr

Sommaire

(table active)

Résumé.....5

Sommaire.....6

Introduction.....7

1. L'internalisation des coûts externes de la technologie électronucléaire : incertitude et diversité dans la maîtrise des coûts industriels.....8

1.1. L'économie politique de la réglementation de la sûreté nucléaire.....9

1.2. Les différences d'effets d'internalisation selon la forme des relations État-industrie-technologie.....12

- **Des différences marquées selon les institutions de contrôle de la technologie**.....12
- **Des différences marquées de modes d'organisation industrielle**.....14

1.3. L'amplification des effets de la complexification de la technologie par le changement de régime de marché.....17

- **Les conditions de ré-installation du nucléaire dans le marché**.....20

2. Le post-Fukushima : une technologie et des institutions à revisiter.....21

2.1. Le choix de renoncer au nucléaire : l'incommensurabilité des externalités et des risques.....22

2.2. L'option d'amélioration de la technologie nucléaire et de ses institutions.....24

- **Le renforcement de la sûreté des équipements en place**.....24
- **Les effets de Fukushima sur l'économie des filières Gen III/III+**.....26

2.3. L'acceptabilité du nucléaire comme bien collectif mondial: le besoin d'une gouvernance mondiale de la sûreté nucléaire.....28

- **Ce que serait un régime international idéal**.....30
- **Quel chemin praticable ?**.....31

3. CONCLUSION.....32

Références:.....33

Introduction

32 ans après Three Mile Island (TMI) et 25 ans après celui de Tchernobyl, l'accident de Fukushima est survenu au moment où la technologie nucléaire semblait en passe d'être re-légitimée par la nécessité de lutter contre le changement climatique et de se stabiliser à un haut niveau de sûreté après de longues décennies d'adaptation. La technologie des réacteurs s'est façonnée à coup d'accidents et d'incidents majeurs dont les enseignements ont conduit à l'approfondissement des normes de sûreté. Cet approfondissement a désorganisé les processus d'apprentissage habituels à toute nouvelle technologie et entraîné des hausses de coût incessantes, plutôt que les baisses habituelles à l'apprentissage cumulatif, mettant en question régulièrement cette option de politique énergétique.

L'accident de Fukushima repose la question de la viabilité sociale de la technologie nucléaire qui conditionne sa viabilité économique. Il conduit les sociétés démocratiques à se ré-interroger sur la possibilité de maîtrise de cette technologie, car il montre qu'une société avancée technologiquement, comme est supposé l'être le Japon, peut échouer à maîtriser l'usage du nucléaire. Sonne-t-il le glas de cette technologie en modifiant définitivement les préférences sociales et la perception des coûts sociaux et des risques de cette technologie ? Ou bien peut-elle rester une option importante de politique énergétique dont les coûts resteraient maitrisables après le renforcement des normes de sûreté consécutif à Fukushima? Peut-elle surmonter l'obstacle d'une internalisation supplémentaire des coûts et des risques de sûreté ?

Pour répondre à ses questions, il faut partir des caractéristiques très spécifiques de la technologie des réacteurs électronucléaires : caractère très capitalistique, grande taille des équipements, complexité, surcoût très élevé des démonstrateurs, longs délais de mise au point et d'installation, dépendance d'une infrastructure complexe du combustible, et aussi symbolisme fort qui a suscité des oppositions. Ces caractéristiques en font une technologie des plus spécifiques, très éloignée d'une technologie standard et neutre socialement dont le développement peut résulter du jeu naturel des forces du marché, comme peut l'être par exemple la technique des CCGT qui se diffuse sans problème. Elle n'a pu être développée que dans des conditions industrielles, politiques, et institutionnelles particulièrement protectrices, qui ont amené certains à qualifier le nucléaire de technologie d'État (Stoffaes, 2004). Pour qu'une telle technologie se diffuse, il faut qu'elle soit maîtrisée technologiquement dans tous ses aspects, ce qui n'était pas le cas lors de son déploiement. Il faut qu'elle soit attrayante en termes de promesses économiques et gérable en termes de risque financier, ce qui était le cas dans le régime de monopole règlementé des industries électriques qui permettait de transférer coûts et risques sur les consommateurs, mais ne l'est plus depuis la libéralisation des marchés électriques. Il faut également que son environnement règlementaire soit stable et pour cela qu'elle soit légitime socialement et politiquement. Si elle rencontre des obstacles sociaux qui conduisent à une quête incessante de sûreté et d'amélioration des procédures de contrôle, ceci se répercute sur les coûts et génère des risques d'investissement, qui mettent en question sa viabilité économique et son attractivité pour les utilisateurs de la technologie.

On s'interrogera ici sur les conséquences de l'accident de Fukushima sur l'économie du nucléaire après le nouvel approfondissement de la réglementation qui s'en suivra, et sur les conditions

institutionnelles qui lui permettraient de subsister en tant qu'option de politique énergétique. Dans un premier temps, on analyse le processus d'internalisation des coûts externes du nucléaire scandé par des accidents majeurs, qui a désorganisé sa diffusion commerciale en mettant en question sa compétitivité, et qui crée un risque règlementaire et politique permanent pour les investisseurs dans le régime de marché. Ceci permet dans un deuxième temps d'analyser les effets de la nouvelle étape d'internalisation ouverte par Fukushima. Du côté de certains pays, elle est marquée par la confirmation de leur abandon antérieur de la technologie qui revient à considérer incommensurables les externalités du nucléaire. Du côté des autres pays, elle est marquée par la recherche d'amélioration de la technologie et des institutions du nucléaire, avec notamment l'expression du besoin d'une gouvernance contraignante de la sûreté nucléaire au plan international.

1. L'internalisation des coûts externes de la technologie électronucléaire : incertitude et diversité dans la maîtrise des coûts industriels

Le risque d'accident nucléaire et ses dommages associés constituent l'externalité majeure de la production électronucléaire, sans pour autant ignorer l'importance des problèmes que pose le contrôle des déchets nucléaires sur des périodes multiséculaires. La technologie des réacteurs nucléaires a été commercialisée à la fin des années soixante sans qu'on ait fait le tour des difficultés de prévention des accidents entraînant des relâchements de radioactivité dans l'atmosphère. L'époque marquée par l'optimisme technologique ne portait pas à la prudence. Mais aurait-on pu faire le tour de toutes les difficultés liées à la complexité et à la nature de la technologie nucléaire, même si il y avait eu à cette époque une culture et des instances indépendantes de contrôle de la technologie ? Le nucléaire est le cas type de ces technologies qui tombent dans le paradoxe du contrôle social de la technologie avec deux problèmes en tension (Collingridge, 1980), un problème d'acquisition d'informations (les impacts de la technologie ne sont pas aisés à anticiper et à analyser jusqu'à ce que le développement de cette technologie soit extensif) d'un côté et un problème de pouvoirs de l'autre : en effet une fois la technologie développée et les groupes d'intérêt constitués autour, elle est difficilement amendable et contrôlable.

Dans le cas de la technologie nucléaire, le processus de réglementation de la sûreté, directement lié au processus d'acquisition des connaissances en matière de sûreté, s'avère complexe et non linéaire car scandé par des accidents réguliers. Il est compliqué parce qu'il se concrétise par la complexification de la technologie, contrairement aux autres technologies où on surajoute simplement un équipement « end of pipe » pour limiter les effets environnementaux. Il est socialement déstabilisateur avec l'effet de ces accidents sur les préférences sociales. De plus il n'est pas homogène parce qu'il a été et est structuré dans chaque pays par des institutions qui sont spécifiques des cultures et structures politiques. Phénomène sans doute ordinaire, mais qui, dans le cas des réacteurs nucléaires, a conduit à des différenciations marquées des surcoûts dus à la sûreté accrue. De même les différences d'organisation industrielle et de niveau de capacité d'ingénierie dans la relation constructeurs-utilisateurs ont eu aussi un effet marqué de différenciation, pour faire face à la déstabilisation permanente de cette technologie complexe qui donnait une prime aux structures industrielles concentrées. On traitera successivement de ces trois aspects du processus d'internalisation des coûts externes et des risques de la technologie électronucléaire.

1.1. L'économie politique de la réglementation de la sûreté nucléaire

L'internalisation des risques et des coûts externes s'est opéré au fur et à mesure que l'on comprenait mieux les risques, notamment les enchaînements d'évènements conduisant à un accident et à des relâchements de radioactivité. D'un côté, étant donné la complexité et la taille des réacteurs commerciaux, il y a l'accumulation ordinaire d'expériences et de connaissances acquises avec des équipements d'essais à partir des problèmes rencontrés par les équipements en exploitation. C'est le cas au début de la commercialisation de la technologie, comme c'est le cas après chaque incident particulier. Aux États-Unis c'est d'ailleurs avant l'accident de Three Mile Island que les règlementations ont commencé à être renforcées. L'autorité de sûreté NRC avait déjà repéré un grand nombre de défauts de fonctionnement sur les protections avant 1970. Elle en avait déduit que, sans accroissement drastique des normes de sûreté, le risque d'incidents et d'accidents allaient très rapidement augmenter avec l'accroissement du nombre et de la taille des installations. Le nombre de règlements entre 1970 et 1978 a crû de trois à cent quarante-trois, avec un effet important de croissance des coûts, car ces changements de règlements s'appliquaient immédiatement aux réacteurs en construction et pas seulement aux futurs réacteurs (Komanoff, 1981). On accroît ainsi les barrières de confinement entre le réacteur et l'environnement, on sépare les circuits d'alimentation électrique des composants ordinaires et des systèmes de secours, on complexifie la technologie par des systèmes redondants de refroidissement de secours, chacun étant lui-même avec son propre système de secours et conçu de façon à éviter le risque d'erreurs humaines[1]. Au bout du compte les experts estiment de façon empirique que les systèmes de sûreté comptent pour un quart du coût des réacteurs (WNA, 2012).

L'amélioration de la technologie par les leçons tirées des incidents qui conduiront à une révision des normes concerne aussi les réacteurs en place, mais elle s'effectue avec délai lors des prochaines visites décennales. Au bout du compte, les réacteurs en place connaissent aussi tous une amélioration progressive des normes de sûreté.

Mais le point important dans ce processus est que l'acquisition de nouvelles connaissances se fait par les accidents, processus classique dans tout domaine de la sûreté d'installations industrielles, mais qui prend un tour dramatique dans le cas du nucléaire en raison des conséquences sanitaires et des effets irréversibles de rejets radioactifs sur les territoires contaminés. Chaque incident grave et chaque accident amènent son lot d'informations sur des aspects du risque d'accident qui avaient été ignorés ou n'avaient pas été suffisamment envisagés. Des réévaluations générales de sûreté sont systématiquement effectuées sur le design des futurs réacteurs d'un côté et sur les protections des équipements existants de l'autre.

On peut résumer rapidement ce qu'il en a été et en sera des effets de chacun des trois accidents majeurs. TMI était le résultat d'une défaillance mécanique sur une valve et d'une erreur des opérateurs, ce qui a conduit à revoir les systèmes de contrôle et d'instrumentation et d'améliorer la formation des opérateurs[2]. Tchernobyl (quoique concernant une technologie particulière en marge

[1] La fréquence calculée en théorie d'un accident avec large relâchement de radioactivité a été réduit d'un facteur 1600 entre les premiers réacteurs de première génération et les réacteurs Gen III/III+. Mais les premiers réacteurs ont été progressivement améliorés au cours de leur cycle de vie (IEA et NEA, 2010).

[2] Avant TMI, le feu qui s'était dans un des réacteurs de la centrale de Browns Ferry (1975) avait menacé la capacité du réacteur à s'arrêter dans des bonnes conditions de sûreté, ce qui avait conduit l'agence de sûreté, la NRC, à prescrire de nouvelles règles concernant la prévention contre les effets d'incendies dans une partie de l'installation.

des filières à eau légère dominante) a attiré l'attention sur le risque d'erreur humaine qui a conduit à renforcer les dispositifs limitant de telles possibilités et sur la nécessité d'un partage d'expérience d'exploitants entre pays. Fukushima attire l'attention sur l'effet d'agression de phénomènes naturels exceptionnels et de leur conjonction, qui peuvent affecter le fonctionnement du réacteur et de ses systèmes de secours (notamment en cas de pertes de l'alimentation électrique), ainsi que sur la confusion possible des réponses à un accident sévère et sur l'exigence d'indépendance des autorités de sûreté.

Dans cette perspective, on peut caractériser l'économie politique de la réglementation de la sûreté nucléaire par rapport à la réglementation d'une technologie ordinaire de la façon suivante.

a. Certes les régulateurs en relation avec les constructeurs et les utilisateurs de réacteurs, peuvent s'appuyer sur des méthodes probabilistes pour évaluer les effets de nouvelles normes en termes de réduction du risque d'accident dans une démarche coût-bénéfice où les coûts supplémentaires seraient mis en regard de la valeur de réduction des externalités négatives et des risques, comme on le fait dans divers domaines de choix publics (la sécurité routière, par exemple) (Crimston et Beck, 2002 ; Kadak et Matsuo, 2008). Mais, dans les faits, les nouvelles normes de sûreté n'ont pas été et ne sont pas décidées sur la base d'une telle rationalisation pour deux raisons (Wood, 1987)[3]. D'une part l'identification des bénéfices (réduction de la probabilité d'accident et des dommages) est bien moins simple que dans la plupart des autres domaines de calcul d'économie publique. D'autre part la perception des risques d'accidents rares étant traditionnellement surestimée par rapport à d'autres risques, le pouvoir politique est enclin à demander des mesures de précaution « à tout prix », notamment après qu'un accident majeur ait eu lieu quelque part dans le monde.
b. Du fait du principe de responsabilité limitée des exploitants qui a été adopté partout pour permettre le développement des achats de réacteurs commerciaux, les incitations économiques n'existent ni pour les propriétaires-exploitants, ni pour les constructeurs de chercher à se prémunir à tout prix contre tout risque d'accident qui les exposerait à un risque de faillite[4]. Dit autrement le report de l'essentiel de la responsabilité des exploitants sur l'État (qui donc socialise le risque) remplace la main invisible du marché si s'appliquait un principe de responsabilité civile ordinaire par la main visible de la régulation de la sûreté : c'est donc à l'État de prendre ses responsabilités pour limiter les risques au maximum. La contrepartie est la situation de « risque moral » que crée ce principe de responsabilité, en faveur des concepteurs et des exploitants.
c. Les difficultés du processus d'internalisation tiennent sans aucun doute à la distribution asymétrique des bénéfices sociaux d'un supplément de réglementation plus stricte en matière de réduction des risques et des coûts individuels (ceux des propriétaires-exploitants) du fait de ce principe de responsabilité limitée. La seule incitation restante sur le propriétaire exploitant est le risque de perte d'un actif de grande valeur en cas d'accident, mais elle ne semble pas suffisante pour les inciter à rechercher la prévention maximale en matière de sûreté, sachant que, jamais

[3] Wood (1987) a critiqué ce processus d'accumulation de normes dans les deux premières de décollage des commandes de réacteurs aux États-Unis en soulignant la difficulté de prendre des décisions claires sur des risques graves, de clarifier les responsabilités en matière de risques et de mettre en œuvre des mesures de sûreté cost-effective .

[4] Un exemple des contraintes que mettrait un principe de responsabilité partagé par le constructeur, l'exploitant sur le commerce d'équipements électronucléaires est donné par l'exception indienne. Les possibilités de contrats d'achat de réacteurs par l'Inde actuellement sont considérablement ralenties par une telle disposition dans la loi indienne (WNA, Nuclear in India, 2012).

confrontés à la réalité du risque, ils ont eu tendance à être plutôt dans le déni du risque d'accident extrême, comme ce fut en tout cas le cas au Japon pour l'exploitant des 4 réacteurs accidentés de Fukushima-Daïchi.

d. La théorie économique traite du fait que les décisions règlementaires et leur mise en œuvre peuvent être influencées par les agents privés qui ont à subir l'accroissement des règlements si les rapports institutionnels contrôleur-contrôlé le permettent. Cette capture du régulateur est facilitée là où le contexte culturel et institutionnel le permet, là où les autorités de sûreté étaient ou sont peu contraignantes. Cela a été longtemps le cas au Japon et a eu pour résultat qu'un opérateur majeur ait pu éviter d'avoir à améliorer ses réacteurs alors que deux autres exploitants importants s'étaient engagés volontairement dans de telles améliorations[5]. D'où l'enjeu de mettre par la loi les autorités de sûreté à distance des administrations promouvant le nucléaire et des entreprises électriques de service public et de garantir leur indépendance par des compétences ad hoc.

e. A côté de cette économie politique demeure une spécificité majeure de la sûreté nucléaire, le niveau de réglementation ne sera jamais figé et toujours en évolution. *How safe is safe enough ?* titrait de façon révélatrice un ouvrage sociologique de 1980 sur la sûreté nucléaire (Slovic et al., 1980). Les accidents majeurs qui se succèdent à une ou deux décennies d'intervalle ramènent régulièrement à cette question. Il faut « imaginer l'inimaginable»[6] pour se protéger de tout risque d'accident, ce qui conduit à ne fixer aucune limite à l'exigence de sûreté tout en portant un aveu d'impuissance face à un risque qui ne serait jamais complètement maîtrisé.

f. Le coût d'acquisition d'informations par la voie des accidents est énorme pour les promoteurs de la technologie, un aspect de ce coût étant le risque de changement de perception des bienfaits possibles de cette technologie et le risque d'amplification du rejet social de la technologie aux pays où elle n'avait pas encore été rejetée à la suite des accidents précédents, rejet qui s'interprète en rationalité économique comme une aversion extrême à ce risque qui rend incommensurables les dommages (voir plus loin).

L'économie du nucléaire est donc confrontée au défi du changement continuel des normes de sûreté qui résulte de l'impossibilité de résoudre définitivement tous les problèmes de sûreté. Ces diverses caractéristiques du processus d'internalisation des coûts externes vont avoir des effets sur les coûts de la technologie en limitant les effets classiques de baisses de coût par apprentissage cumulatif (Argote et Epple, 1990). Ce processus s'est traduit par des effets de déstabilisation du design de la technologie des réacteurs par complexification : d'une part l'incorporation des nouvelles normes aux réacteurs en construction, d'autre part le saut en avant rendu nécessaire en matière de sûreté pour la conception des nouveaux réacteurs.

Sur les réacteurs existants , les nouvelles règlementations se sont appliquées tout de suite et systématiquement aux réacteurs en construction dans les pays principaux, ce qui a désorganisé les plannings et fait éclater les devis, compte tenu de la complexité de la technologie et l'imbrication de ses composants Le nombre d'heures de travail pour la construction d'un réacteur a sextuplé entre 1967 et 1980 aux États-Unis, ce facteur se combinant à la faiblesse des management de chantiers des entreprise électriques (Bennett et Moynet, 1983).

[5] Il y a aussi une longue liste d'incidents et de manquement aux procédures répertoriés officiellement, notamment de la part de TEPCO (Nakamura A., Kikuchi M., 2011, p. 893-899).

[6] Propos de Jacques Repussard, directeur de l'IRSN, tirant les leçons de l'accident de Fukushima.

Pour les nouveaux modèles de réacteurs pour lesquels les constructeurs ont choisi de rester sur les filières de départ, conscients qu'ils étaient de l'importance des coûts d'apprentissage sur de nouvelles filières, l'inclusion de règlementations nouvelles dans le design est un processus fondamentalement déstabilisant. Après les deux accidents nucléaires précédents, les constructeurs qui restent sur le marché malgré le ralentissement des commandes nationales et mondiales, se sont préparés à la relance en faisant évoluer la conception des modèles de réacteurs en se pliant aux exigences des autorités de sûreté des pays dont ils visent le marché. En 1990, les grands constructeurs ont engagé la phase de conception des réacteurs à eau légère « avancés » plus sûrs. Ces réacteurs dits de 3° génération (ou Gen III) présentent une probabilité d'accident dix fois inférieure à la norme des Gen II, ils sont équipés d'équipements de secours en nombre renforcé (circuit de refroidissement, alimentation électrique de secours) et d'une double enceinte de confinement pour faire face au risque de terrorisme. La conception du cœur vise par ailleurs à la réduction du volume des déchets. Toutes ces améliorations se traduisent par des coûts projetés plus élevés que ceux des réacteurs précédents Gen II de la même filière, car leur conception se fait plus complexe par adjonction de systèmes redondants, comme dans le cas de l'EPR d'AREVA ou de l'ABWR de General Electric et d'Hitachi, ou l'AES-2006 (VVER-1200) de Rosatom (Finon, 2005).

D'autres concepteurs de réacteurs ont préféré innover en choisissant une conception de sûreté passive pour les filières LWR traditionnelles afin de simplifier le design d'ensemble, comme l'AP 1000 de Westinghouse-Toshiba ou l'ESBWR de General Electric. Ils prévoyaient à l'époque une réduction des coûts d'investissement du fait de cette simplification. Mais, comme il ne s'agit que de coûts projetés, cette convergence entre sécurité supérieure et baisse de coûts restent à démontrer, sachant que les premières réalisations qui ont pris du temps à être décidées se heurtent aux traditionnelles difficultés d'apprentissage.

1.2. Les différences d'effets d'internalisation selon la forme des relations État-industrie-technologie

Au-delà de la logique de progression de la sûreté nucléaire « à tout prix » animée par l'enjeu du maintien de l'acceptation sociale, 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 force de la relation entre constructeurs, architectes-ingénieurs et utilisateurs pour faire face à la déstabilisation de la technologie.

- **Des différences marquées selon les institutions de contrôle de la technologie**

Le processus d'internalisation a des effets très différents sur les coûts selon le style règlementaire et le degré d'indépendance des régulateurs. Dans l'idéal, l'apprentissage du contrôle de la sûreté d'une technologie aussi complexe devrait se faire de façon coopérative, mais rigoureuse dans le respect des rôles afin d'envisager le maximum de problèmes de sûreté. Mais au lieu de cela, les régulateurs ont été indulgents et plutôt laxistes là où ils auraient fallu plus de rigueur, et ils ont été formalistes et procéduraux là où il aurait fallu être plus coopératif (Dooley et al., 1996)[7]. Par exemple, aux États-Unis et en Allemagne, les nouvelles règlementations se sont appliquées tout de suite et systématiquement aux réacteurs en construction, ce qui amplifiait les effets de la sévérisation des

[7] Pour une comparaison entre cinq pays de style différents, voir Dooley et al, 1996.

Encadré 1 : Crise de légitimité du nucléaire civil et fragmentation des pouvoirs

La progression de l'autonomie des autorités de sûreté vers l'indépendance ne peut se comprendre sans relation avec l'environnement politique et les structures politico-administratives de chaque pays. Elle relève de la fragmentation progressive des pouvoirs autour de cette technologie inhérente à son déploiement commercial et à sa banalisation marchande.

La technologie nucléaire civil s'est développé sous l'effet d'un *technology push* mené par les complexes étatico-industriels développés pour les usages militaires de l'atome (avec, au centre, une puissante Commission à l'Energie Atomique), et protégés par les règles de secret, mais aussi fortement légitimés à l'époque par les valeurs de la Science et l'évocation de ses bienfaits. Après les débuts de contestation du nucléaire à la fin des années 60, le contrôle des attitudes sociales vis-à-vis du risque nucléaire par ses promoteurs et par les gouvernements dépend des moyens qu'ont offerts les structures politico-administratives pour maintenir le processus décisionnel et règlementaire isolé de l'arène politique tout en maintenant la confiance de l'opinion publique et des populations locales (Jaspers, 1992).

Les fondements technocratiques de la promotion du nucléaire ont ainsi été fragilisés rapidement là où le pouvoir est divisé du fait de la décentralisation des structures de l'État (État fédéral, tradition de respect des rôles des administrations), de l'équilibre entre les pouvoirs exécutif et parlementaire et de la place importante du pouvoir judiciaire. Les blocages de projets au niveau des instances politiques locales et des tribunaux régionaux provoquent une remontée du débat au niveau central ou fédéral. Les controverses portées à ce niveau incitent fortement le gouvernement à rendre indépendante l'autorité de sûreté qui manifeste de plus en plus d'autonomie sous la pression de l'opinion. Quand il n'était pas déjà divisé au niveau du contrôle des entreprises électriques régionales comme aux États-Unis, la tendance a été de diviser un peu plus les pouvoirs de décision par l'aménagement de lieux de confrontation d'expertise (commission parlementaire, etc.), et de possibilités de moins en moins formelles de participation du public aux décisions (auditions, enquêtes publiques, débat national) allant jusqu'aux référendums. C'est ainsi que de nouvelles orientations politiques d'arrêts du nucléaire ou de moratoire sur de nouvelles commandes ont été prises, après un référendum national en Autriche, en Suède, en Italie et en Suisse entre 1980 et 1986, ou plus tard par le vote de loi de sortie du nucléaire en Allemagne en 1999 et en Belgique en 2002 après que le système électronucléaire y ait été mis en place[1].

A l'inverse, dans les pays où la légitimité du pouvoir technocratique a été préservée par la centralisation et où la division des pouvoirs entre promotion et contrôle de la technologie a été retardée le plus longtemps possible, l'efficacité de réalisation des projets et le contrôle des coûts et des délais ont permis en retour le maintien de la légitimité du programme nucléaire et des institutions qui le portent. C'est principalement le cas des pays où domine le pouvoir exécutif, où existent une forte centralisation administrative, une tradition d'interpénétration des élites et une forte légitimité des entreprises électrique, comme en France et, on le comprend mieux maintenant, au Japon. De telles structures permettent d'éviter la prise en compte des demandes des opposants, de préserver la confiance du public et de maintenir la légitimité d'une réglementation et d'un contrôle pragmatique de la sûreté. Au Japon qui a maintenu un rythme honorable de réalisation des projets pour aboutir à l'installation de 47 réacteurs de 1975 à 2005 malgré les oppositions locales et des incidents réguliers, cela s'explique par la proximité des élites dans l'administration, les entreprises industrielle et la classe politique et une culture très forte de respect de l'autorité et des valeurs de la science expliquent. L'autonomisation des instances de contrôle du nucléaire n'a été qu'apparente du fait du pouvoir d'influence des entreprises électriques sur les administrations de contrôle et le pouvoir politique (Nakamura et Kikuchi, 2011).

[1] Ces lois de sortie du nucléaire résultent de l'émergence des partis verts dans le paysage politique, ce qui a rendu nécessaire pour les partis socio-démocrates de constituer des alliances avec eux pour gouverner.

règlements sur les coûts, alors qu'elle s'appliquait simplement à la série suivante de réacteurs en France (Finon et Staropoli, 2001; Finon, 2008; Bupp et Dérian, 2006; Grübler, 2009)[8].

[8] L'interpénétration marquée des autorités de sûreté (SCSIN, ISN du CEA) et des instances de promotion du nucléaire (ministère, CEA) a même conduit à fermer les yeux sur les problèmes de construction. Un seul exemple : plusieurs problèmes de non respect du décret d'autorisation de construction ont pu être relevés sur la réalisation de Superphénix

La progression de l'autonomie des autorités de sûreté vers l'indépendance s'est faite dans le même mouvement d'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 (voir encadré 1). Dans ces pays, les institutions de contrôle de la sûreté deviennent assez vite indépendantes en étant séparés 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 80 (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[9].

- **Des différences marquées de modes d'organisation industrielle**

Le type d'organisation industrielle a conditionné la façon dont les constructeurs et les entreprises électriques ont réussi à faire face aux difficultés d'apprentissage largement sous-estimées au départ, notamment du fait de la mauvaise appréhension initiale de risques en matière de sûreté lors du lancement commercial des réacteurs, ce qui a conduit à l'instabilité des règlements de sûreté[10]. Cette influence de l'organisation industrielle et de 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 (900 MW à deux boucles et le 1300MW à trois boucles) en figeant la technique par rapport à deux modèles de référence construits aux États-Unis (North Anna pour les premiers, South Texas pour les seconds) , 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 à peine de taille moyenne sans compétences d'ingénierie et de contrôle qualité, à une ou deux exceptions prés (il y eut jusqu'à 45 exploitants), et il y a à l'époque quatre constructeurs qui proposaient chacun leurs

(Finon, 1987). Mais on trouve bien d'autres exemples en compilant les numéros des années 80 de la Gazette Nucléaire, la revue du GSIEN.

[9] En Corée du sud a tout de même connu une évolution positive depuis qu'un rapport de la World Bank de 1984 a attiré l'attention des autorités coréennes sur le manque de rigueur des procédures de sûreté de l'électricien (cf. Shorrock, T. 1984. Nuclear Dangers in South Korea. World Bank document reveals serious safety problems. *Multinational monitor*. Vol.3, n°4, February). Mais il a fallu attendre 1996 pour que soit créée une autorité de sûreté indépendante de l'Atomic Energy Commission coréenne. Cet exemple montre qu'il y a quelque souci à se faire si les pays émergents et bien sûr les primo-accédants ne parviennent pas à avoir des institutions de contrôle à la fois indépendantes et compétentes. On a aussi l'exemple de Taïwan, pays technologiquement avancé, dont les premiers réacteurs ont été décidés sous le régime autoritaire antérieur, et qui se trouvent localisé à la fois près des plus grandes agglomérations et dans des zones les plus sismiques de l'île et dont la Nuclear Regulatory Division est intégrée dans l'Atomic Energy Commission (AEC). (F. De Changy, Taïwan, l'apprenti sorcier du nucléaire. *Le Monde*, 8 Février 2012).

[10] Les difficultés d'apprentissage avaient été tellement sous-estimées par les grands constructeurs US qu'ils s'étaient lancés dans la commercialisation des filières LWR en signant des contrats clé en main à prix bas pour une vingtaine de réacteurs. Le prix moyen de la première vague des contrats clé en main vers 1965 étaient de 150 €/kW alors que les coûts des réalisations vont monter jusqu'à 1000 $/kW en $1965, soit plus de six fois plus. (Bupp et Dérian, 1979 ; McKerron, 1992)

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, qui a pris une ampleur accrue après l'accident de TMI de 1979, est venu compliquer considérablement la construction des réacteurs, ce qui s'est traduit par des hausses de coût considérables et l'arrêt des commandes au début des années 80.

L'Allemagne est proche du second modèle avec une régulation de la sûreté rapidement indépendante, une application des changements de normes aux réacteurs en construction et, du côté industriel, avec quatre acheteurs et au départ trois constructeurs (Siemens, AEG, Babcock). De son côté, le Japon se situe vers le premier modèle avec une autorité de sûreté peu autonome, et du côté industriel un oligopole d'entente de trois constructeurs (Hitachi, Toshiba et Mitsubishi) licenciés des deux groupes américains dominants, qui se partagent le marché des sept monopoles électriques régionaux qui ont pris l'habitude de contracter avec le même constructeur sans que cela crée des partenariats efficaces.

Les combinaisons de style règlementaire et de mode d'organisation industrielle ont conduit à des résultats très différents en termes de maîtrise des coûts et d'internalisation des coûts externes. Aux États-Unis on n'a pu profiter des apprentissages pour compenser la hausse des dépenses dues à une sûreté renforcée : les coûts réels d'investissement ont augmenté de deux et demie à quatre fois entre 1975 et 1985 (de 600$/kW à 1500 à 2500 $/kW en $ de 1985) (Hewlett et Gielecki, 1997, Koomey et Hultmann, 2007). A l'inverse en France la stabilité règlementaire permet de profiter des retours d'expérience internes à la firme et d'effets de série sur les composants pour compenser en partie l'effet du renforcement planifié des règlementations d'une série à l'autre. Le résultat a été des dépassements modérés des devis et des délais après la tête de série, et une maîtrise des coûts d'exploitation par comparaison avec le cas américain (Thomas, 1988 ; Lester et McCabe, 1993 ; Grübler, 2010). Comme l'a repéré en particulier A. Grübler (2010) dans son étude très exhaustive sur l'évolution des coûts français, les coûts n'ont augmenté que de 66 % entre 1975 et 1984 de 4200 F/kW pour le palier CP1/CP2 de 900 MW à 7000 F /kW pour le palier P4 de 1300 MW (en F.1998). Mais il souligne aussi que les coûts français ont ensuite rapidement augmenté de 7000 F/kW à 10000 F/kW entre la première série P4 et la série P'4 suivante parce que diverses améliorations avaient été introduites en matière de sûreté à la suite de TMI, en plus de nouveaux composants échappant à la licence Westinghouse[11].

On retrouve ces différences marquées de coûts officiels dans les recensements de l'Agence de l'Énergie Nucléaire (AEN) de l'OCDE : par exemple en 1984 entre les États-Unis et la France s'observe une différence de 200 à 300% et entre l'Allemagne (ou le Japon) et la France de 60%, alors qu'on ne retrouve pas de tels écarts entre les coûts des moyens de production électrique plus classiques dont les technologies sont pratiquement standardisables, comme c'est le cas des CCGT[12].

[11] C'est sans parler de l'apprentissage très coûteux sur la petite série N4 de quatre réacteurs de 1450MW de technologie complètement francisée et incluant des améliorations importantes en matière de systèmes de contrôle-commande. Le coût effectif des réalisations est passé de 10000 F 98/kW pour le palier P'4 à 14500 F98/kW pour le palier N4. Mais ce dernier coût aurait dû rebaisser vers 10000 F98 si huit ou dix réacteurs N4 avaient été réalisés.

[12] Les coûts des CCGT sont pratiquement identiques dans tous les pays (500-600 $/kW dans le rapport 2005 de NEA /IEA à quelques exceptions prés, dont celui du Japon avec 1292 $/kW.

Tableau 1: Comparaison des données officielles sur les coûts secs d'investissement du kW nucléaire entre plusieurs pays OCDE entre 1984 et 2010 (en $ courant/kW)

	États-Unis	Japon	Allemagne	France	Royaume-Uni
1984	1860-2800	1405	1429	870	nd
1992	*2320-2500**	2938	3417	1658	3540-4080
1997	*2079**	2828	nd	1988	nd
2005	*1894**	2510	*1773**	*1556**	nd
2010	*3382**	3009 Ref. ABWR	*4102** Ref. EPR	3860 Ref. EPR	3500-4000**

* Les coûts officiels en italiques sont purement indicatifs, car ils ne correspondent pas à une réalisation effective, mais seulement aux annonces des constructeurs, contrairement aux coûts mis en caractères normaux qui sont censés correspondre aux réalisations effectives.
**Le Royaume Uni n'a pas envoyé d'estimations des coûts du nucléaire à l'AEN. On s'est référé aux estimations officielles du Department of Energy and Climate Change.
Source : IEA-NEA (OECD)– *Projected costs of generating electricity* ; 1986, update 1992, update 1998, update 2005, 2010.

Les nouveaux venus asiatiques, la Corée du sud et Taïwan d'abord à partir de 1985 et la Chine ensuite depuis 1995, qui combinent des pouvoirs technocratiques ou autoritaires, une faible autonomie de la fonction de contrôle de la sûreté et une organisation industrielle intégrée et très coordonnée, sont parvenus à une maîtrise de leurs coûts après le transfert d'une technologie de réacteurs déjà ajustée. C'est sur des bases institutionnelles et d'organisation industrielle voisines de celles de la France qu'ils ont pu se saisir de cette option technologique pour mener une politique industrielle ambitieuse[13]. Ils ont fait le choix de ne se baser que sur un seul modèle technologique pour réaliser leur transfert de technologie et développer une industrie de construction de réacteurs appuyée par les commandes en série d'entreprises publiques en monopole qui sont aussi leur propre architecte-ensemblier[14].

La Corée du sud a réalisé son transfert de technologie entre 1982 et 2000 avec Combustion Engineering (plus tard Westinghouse) sur le design System 80, en installant ensuite 15 réacteurs de cette technologie PWR tout en améliorant ce design. La Chine depuis 1998 a procédé de même avec la technologie PWR de Framatome principalement en construisant 10 réacteurs CPR de 1000 MW entre 1998 et 2008, avant d'accélérer son programme avec l'engagement de 6 à 8 réacteurs CPR 1000 par an depuis cette date. Du fait des réalisations industrielles en série et de plus bas coût de main d'œuvre, les coûts secs (overnight) des réacteurs de 2° génération s'établissent au niveau de 1300-1700 $/kW en Corée du sud et en Chine en retrouvant approximativement les coûts français d'avant la dernière série avortée des N4.

[13] Les autres émergents, le Brésil et l'Argentine, renoncent à de nouveaux investissements à la même époque, faute de telles structures. De son côté l'Inde qui ne pouvait pas contracter jusqu'à récemment avec des vendeurs étrangers de réacteurs du fait de sa non-appartenance au TNP et avait développé un programme en self-reliance basée sur la technologie à eau lourde sans beaucoup de succès, peine à mettre en place un programme d'envergure en raison de l'inefficacité de son secteur électrique qui rendent les financements difficiles et ses structures démocratiques qui permettent l'émergence d'oppositions.
[14] Il y a même la particularité de la Corée du sud que c'est l'entreprise électrique publique KEPCO qui détient la licence des réacteurs et cherche à « coréaniser » la technologie avec l'agence publique de RD.

Tableau 2 : Comparaison des coûts officiels d'investissement entre les pays asiatiques (Chine, Corée du sud) et des pays de l'OCDE en 2005 et 2010 (en $ courant/kW)

	États-Unis	Japon	Allemagne	France	Corée du sud	Chine
2005	1894*	2510 Ref ABWR	1773* Ref EPR	1556* Ref EPR	1208 (Gen II)	1208 (Gen II)
2010 Gen II					1300 Ref. OPR1000	1750 Ref. CPR1000
Gen III/III+	3382*	3009 Ref.ABWR	4102*	3860 Ref. EPR	2300[v] Ref APR 1000	2300 Ref. AP1000

*indique que ces coûts officiels sont indicatifs, car ils ne correspondent pas encore à des réalisations effectives.

Source : IEA-NEA (OECD)– *Projected costs of generating electricity*, 2005 ; Idem, 2010

En considérant le coût annoncé par la Chine à l'AEN-OCDE pour les réacteurs Gen III+ de 2300 $/kW (l'AP 1000 de Toshiba-Westinghouse) quand ils seront construits en série[15], et celui de même niveau annoncé par la Corée du sud pour l'APR 1400 coréen vendu fin 2010 en 4 exemplaires aux Émirats, on peut sans doute s'interroger sur ces annonces. Ceci dit, ces deux pays n'ont pas les contraintes de réalisation et de rentabilisation que les réalisations nucléaires rencontrent sur les têtes de série en Europe et aux États-Unis avec les conditions de réalisation chinoises ou coréennes (style peu intrusif de l'autorité de sûreté, ingénierie propre de l'exploitant, bas coût du travail). Mais, au-delà de ces effets favorables sur la maîtrise des coûts, on doit s'interroger sur l'effectivité du contrôle de la sûreté (autorisation, contrôle des constructions, exploitation) en Chine au moins, faute d'indépendance des autorités de sûreté et de pression du contrôle démocratique et médiatique dans un pays autoritaire. On revient sur cette question plus loin à propos des enseignements que Fukushima doit amener à tirer sur l'indépendance et les compétences des autorités de sûreté dans chaque pays recourant à cette technologie[16].

1.3. L'amplification des effets de la complexification de la technologie par le changement de régime de marché

Dans les années 90 et 2000, la légitimité du nucléaire se reconstitue lentement dans les pays de la zone OCDE avec l'émergence des préoccupations de protection du climat pour aboutir à l'amorce de reprise des commandes et des annonces de projets dans les pays de l'OCDE, la fameuse « Renaissance du Nucléaire ». Dans les pays de structures politiques et industrielles fragmentées, on a tiré les leçons des difficultés d'apprentissage précédentes émanant des changements continus de réglementation et des contraintes des procédures d'autorisation individualisées en encourageant à la standardisation des réacteurs autour du modèle proposé par chaque constructeur. Aux États-Unis et au Royaume Uni, les autorités de sûreté ont pris diverses mesures dont une procédure de

[15] Ceci n'empêche que les têtes de série d'AP1000 en cours de construction en Chine présente des coûts plus élevés autour de 16000 yuans/kW, soit 2950 $/kW Source : Rong J., 2009 , Nuclear Power Project Financing Experiences and Strategies of China , 10 December 2009.

[16] On est d'autant plus incité à se poser la question sur le cas chinois, que la Chine s'engageait dans des commandes en série du CPR 1000 à raison d'une dizaine de réacteurs par an depuis 2007 sans que les compétences de l'autorité de sûreté chinoise puissent suivre, alors que son absence d'indépendance vis-à-vis de l'Atomic Energy Commission chinoise pose aussi un problème de fonds, comme ceci ressort clairement d'un rapport du State Council Research Office (SCRO) de janvier 2011 . Voir l'étude de cas Chine du World Nuclear Association (WNA) http://www.world-nuclear.org/info/inf63.html

qualification de chaque modèle de réacteurs de technologie avancée permettant de réduire le nombre de procédures d'autorisation de trois à une seule par réacteur (Bupp et Dérian, 2006).

Le processus de renaissance du nucléaire n'en est pas moins compliqué pour deux raisons : les constructeurs et les architectes-ingénieurs doivent passer par une phase de réapprentissage qui s'effectue sur de nouveaux modèles plus complexes, avec des autorités de sûreté indépendantes conscientes de leurs responsabilités et dans le nouvel environnement institutionnel des marchés électriques libéralisés, alors que celui-ci a détruit la possibilité de transférer les coûts et les risques d'investissement en centrales nucléaires sur les consommateurs. Conjugués avec les effets de renforcement des règlementations, les délais de construction de chaque première réalisation sont plus longs et incertains, et les dépenses par kW plus élevées que ceux des derniers réacteurs construits auparavant. Les projections de coûts des réacteurs AP1000 et EPR n'ont fait ainsi que croître depuis la date des premières commandes : de 2208 $ à 4000 $/kW pour l'AP1000 selon les deux études du MIT de 2003 et de 2009 (MIT, 2003 ; MIT, 2009) [17], de 2000 € à 4000 €/kW pour les premiers EPR construits en Finlande et en France. Cela conduit à tracer des perspectives de coût futur beaucoup plus défavorables que les espoirs initiaux qui étaient d'arriver autour de 1500 €/kW pour des séries de 6 à 10 réalisations (voir par exemple DGEMP, 2003). Seules les conditions de réalisation particulières à la Chine permettent d'envisager plus tard des coûts de l'ordre de 2000 €/kW pour des réacteurs Gen III construits en série. Cette étape obligée de réapprentissage sur les têtes de série de nouveaux modèles complexes plus sûrs n'est pas sans susciter un certain scepticisme de la part des investisseurs devant les risques affectant ces premières réalisations, parce que la libéralisation a modifié le mode de partage des risques d'investissement.

Tableau 3: Les risques spécifiques de l'investissement nucléaire par rapport un investissement standard en production électrique.

	Investissement standard de type CCGT)	Investissement nucléaire
Risque administratif et politique		• Risque d'autorisation d'implantation • Risque politique sur construction • Risque règlementaire sur construction et exploitation • Risque politique de fermeture
Risque de construction	• Délai stable (durée 3-4 ans)	• Risque sur délai (passage à 8-9 ans) • Risque amplifié par réapprentissage • Risque-fournisseur (composants, ingénierie)
Risque d'exploitation	• Risque faible après premiers exemplaires	• Risque d'exploitation (maladie de jeunesse, etc.)
Risque de marché	• Risque-prix limité par la corrélation prix électricité/prix gaz	• Risque prix élevé (recouvrement des coûts fixes)
	• Risque volume effectif (risque de dispatchabilité)	• Risque volume faible
Risques autres		• Risques sur provisions pour coût long terme (démantèlement, déchets)

[17] Il est intéressant de noter que dans les projections du DoE américain, le coût de référence du kW nucléaire est même passé de 4000$ à 5850 $ entre 2010 et 2011 (EIA, 2011).

Le régime de marché complique radicalement les investissements dans le nucléaire par rapport aux autres moyens de production électrique. En supprimant le cadre institutionnel du monopole électrique et de la réglementation des tarifs qui assurait le report des risques d'investissement sur les consommateurs, le régime de marché contraint radicalement les possibilités de nouveaux investissements par les exigences de gestion de risque qu'il ajoute. Alors que des risques inhérents au régime de marché (risque prix, risque volume notamment) s'ajoutent aux risques d'investissement, tous les risques sont portés par le producteur au milieu desquels les risques règlementaire et politique ne sont pas les moindres. Le régime de marché n'est pas propice à des investissements très capitalistiques et de grande taille qui imposent une immobilisation improductive de capitaux très importants (2 à 3 milliards d'€ par unité) pendant les sept ans de construction. Les risques règlementaires et politiques spécifiques et le risque de prix sur le marché électrique auxquels un nouvel actif nucléaire est exposé du fait de sa part de coûts fixes très élevé (70%) font que les prêteurs appréhendent mal ces risques par rapport à ceux attachés aux investissements dans une technologie standard avec une part faible de coût fixe, tels que les cycles combinés à gaz (17,3%)(voir tableau 4) [18].

Comme le calcule l'AIE dans son World Energy Outlook de 2011 (IEA, 2011, p.457), ce profil très capitalistique de la production électronucléaire se traduit par une très forte sensibilité du coût total actualisé du kWh nucléaire au dérapage des coûts secs de construction (une hausse de 1000 $/kW sur un total de 3500 $/kW se traduit par une augmentation du coût de 24%), au coût du capital (une prime de risque de 2% sur un CMPC de 7% augmente le coût de 19%) et aux performances d'exploitation (un facteur de charge de 75% au lieu de 85% augmente le coût de 9%)[19].

Tableau 4: Caractéristiques économiques des coûts du nucléaire et des autres moyens de production électrique (en $ et avec un coût du capital de 10%).

	Nucléaire 1500 MW	CCGT 400 MW	Charbon 700 MW	Charbon CCS 700 MW
Investissement* ($ / kW)	4100	1070	2133	3840
Investissement par éq.	6000 M$	430 M$	1500 M$	2680 M$
Coût total actualize ($/MWh)	98.75	92.11**	80.05	89.95
Coût investissement %	75.6 %	17.3%	39.8%	66.8%
Frais fixes O&M %	14.9%	4.9%	7.5%	15.1%
Coût combustible %	9.5 %	66.4%	22.8%	14.5%
Coût carbone *** %	0 %	11.4%	29.9%	3.6%

*Coût sec ; ** Hypothèse moyenne de prix du gaz: $7.8/MMbtu ; *** Hypothèse de prix du CO_2: 30/tCO2

Source: NEA/IEA, 2010. *Projected cost of electricity generation.* Tables 5.2, 6.1. & 6.2.

Même des perspectives de prix élevé du carbone qui rehausseraient le prix du kWh CCGT ou charbon ne favorisent pas le nucléaire si les industries électriques restent sous le régime de marché actuel,

[18] La turbine à gaz en cycle combiné présente un profil beaucoup plus favorable à l'investissement par des producteurs en concurrence. C'est une technique divisible, plus rapide à l'installation (2 à 3 ans), moins exigeante en capital (une unité de 400 MW nécessite 300 millions d'€ contre 3 milliards pour une centrale nucléaire de 1500 MW) et émettant deux fois moins de CO2 que les centrales à charbon. Contrairement aux réacteurs nucléaires, elle est peu risquée à l'investissement, standardisable, peu exigeante en compétences technologiques du côté de l'acheteur et elle présente un profil environnemental relativement favorable.

[19] Si l'on procède au calcul traditionnel de la valeur actualisée nette en figurant le profil des cash flow annuels nets d'un projet nucléaire type, on constate que le temps de retour sur investissement est également très sensible à une augmentation du coût et des délais de construction : une dérive de + 10% sur le devis et d'un décalage de 3 ans de la MSI entraine un décalage du temps de retour de 14 ans, par rapport à un temps de retour attendu au départ de 15 ans.

d'autant que le nucléaire est très sensible au taux de rendement du capital qui est recherché par les investisseurs financiers. Le rapport du MIT de 2009 calcule qu'une prime de risque de 3% augmente de 6,6 à 8,4 c/kWh (soit 27%) le coût total du kWh nucléaire produit par un AP1000 (MIT, 2009).

- **Les conditions de ré-installation du nucléaire dans le marché**

Pour permettre d'investir en centrales nucléaires dans ce contexte de marché, il faut mettre en place de nouveaux arrangements de marché qui permettent un nouveau partage de risque entre investisseurs, consommateurs et État pour que les investisseurs concrétisent leur projet dans les pays ayant libéralisé leurs industries électriques (Finon et Roques, 2009). Les gouvernements ont travaillé à définir de tels dispositifs permettant un transfert d'une part majeure des risques sur les consommateurs ou sur l'État, tout en évitant de s'exposer aux reproches de subventionner directement les nouveaux investissements nucléaires.

Aux États-Unis, l'Energy Policy Act de 2005 a ainsi institué deux mesures qui reportent sur l'État une partie des risques : une assurance contre le risque règlementaire (de 400 millions de $ pour les deux premiers réacteurs, 200 millions pour les deux suivants), et surtout une garantie d'emprunts jusqu'à 80% du coût de l'équipement qui permet à l'investisseur d'accéder à des crédits à des taux sans prime de risque (Joskow, 2006)[20]. C'est dans ce cadre, que les investissements devaient reprendre aux États-Unis aussi bien dans les États qui avaient libéralisé, que dans l'autre moitié des États qui avaient maintenu l'intégration verticale et le monopole des utilities, notamment dans le sud ouest. Une quinzaine de projets étaient préparés pour recevoir l'agrément de l'autorité de sûreté et bénéficier de la garantie d'emprunts. Mais avec l'arrivée des gaz de schistes après 2009, seules finalement deux paires d'AP1000 vont être réalisées en Géorgie et en Caroline du sud.

Au Royaume Uni, une réforme votée en 2011 qui va changer progressivement le régime de cette industrie (DECC, White Paper 2011) vise à permettre des investissements dans des techniques bas carbone très capitalistiques, dont le nucléaire. Elle définit un modèle d' « acheteur central » structurée autour d'une agence neutre qui passent des contrats de long terme à prix garantis pour les différents types d'équipements électriques bas carbone, en tête desquels les centrales nucléaires, ces contrats étant attribués par enchères lancées de façon régulière (Newbery, 2010)[21]. Le tout est complété de l'instauration d'un prix plancher du carbone pour limiter les risques pour l'investisseur nucléaire dans la concurrence avec les équipements charbon ou gaz, en garantissant un rehaussement garanti du prix du marché électrique tandis que les productions charbon et gaz seraient pénalisées. C'est dans ce cadre que huit projets étaient annoncés avant Fukushima par trois entreprises et consortiums pour des décisions qui auraient à prendre en 2012.

En conclusion, le développement du nucléaire s'est heurté à d'importantes difficultés d'apprentissage sur le point crucial de la sûreté des installations qui ont condamné toute possibilité d'un cheminent de diffusion d'une innovation standard. Technologie complexe, l'augmentation des niveaux de sûreté n'a pu se faire que par complexification de la technologie, ce qui a désorganisé la construction des équipements en cours et augmenté les coûts de réacteurs futurs. Mais plus encore, technologie messianique au départ, elle s'est heurtée à d'importantes oppositions amplifiées par cet

[20] A cela s'ajoutait une garantie de revenus par un crédit d'impôt de 18 $/MWh pendant 8 ans sur les premiers 6000 MW, subvention temporaire qui est justifiée par le fait que toutes les technologies bas carbone.

[21] En fait c'est une agence qui garantit un prix de long terme sur une longue durée à tous ces nouveaux équipements avant la décision d'investissement

apprentissage à coups d'accidents majeurs. Pour faire face à ces difficultés d'apprentissage, ce sont finalement les pays où il a été possible d'organiser et de contrôler les processus sociaux et industriels d'internalisation des coûts externes et des risques qui ont maintenu à flot la technologie nucléaire dans le marché des grands équipements de production électrique. Reste à savoir ce que le nouveau choc de Fukushima introduit dans cet apprentissage récurrent par accident majeur. Sortons-nous de cette fatalité de hausse de coûts incessante ? Pouvons nous sortir tout simplement de cette fatalité par la possibilité pour les sociétés d'avoir des institutions qui empêchent radicalement de nouveaux accidents ?

2. Le post-Fukushima : une technologie et des institutions à revisiter

Deux voies se sont rapidement dessinées dans les politiques choisies par les gouvernements vis-à-vis de la technologie nucléaire après Fukushima: l'option radicale du non-recours au nucléaire d'un côté et l'option d'améliorer le système technologique et les institutions de contrôle du nucléaire pour réduire les risques et préserver la confiance ébranlée des opinions publiques de l'autre[22].

Tableau 5: Évolution des capacités nucléaires projetées par l'AIE entre 2010 et 2011.

(en GW)	2010	2035	2011-2035
WEO 2010 Scénario B.A.S	390	750	+ 360
WEO 2011 Scénario B.A.S	390	570	+ 180

Source: IEA, World Energy Outlook 2010 & 2011.

Les accidents de Fukushima ont provoqué des réactions vives parce qu'au-delà du constat d'impuissance, l'évènement révèle les difficultés de maîtrise de cette technologie, même par une société hautement technicisée. Mais en fait cette analyse fait l'impasse sur les conditions politico-institutionnelles qui permettraient à une société d'exercer un contrôle effectif et rigoureux sur la technologie nucléaire. On retrouve à l'origine des accidents de Fukushima les mêmes déficiences institutionnelles ayant conduit à celui de Tchernobyl, déficiences dans l'indépendance des autorités de sûreté, dans les procédures d'autorisation de prolongation, dans les processus d'amélioration de la sûreté des réacteurs existants et dans les contrôles de l'application des normes par des exploitants[23]. Dans une telle perspective, il apparaît que les pays doivent rechercher les meilleures institutions de contrôle possibles et les adosser à un régime multilatéral pour les rendre efficaces, si les institutions politiques internes ne le permettent pas. Le maintien de l'acceptabilité de la

[22] Les pays nucléaires ont reconnu la gravité de la situation et le besoin de s'assurer de la sûreté des réacteurs existants. Des revues de la sûreté des réacteurs ont été entreprises dans presque tous les pays : Union européenne, Corée du sud, Russie, États-Unis, mais aussi Chine. Celle-ci a suspendu momentanément le train de 7 à 10 commandes annuelles de réacteurs par an lancé en 2007 pour consolider les instances de contrôle de la sûreté nucléaire, revoir les procédures de contrôle des constructions et de leur exploitation d'un côté et de stabiliser les plans de charge de l'industrie de l'autre.

[23] Aucune protection digne de ce nom n'avait été envisagée face aux raz de marée possibles dans cette région. On n'a pas imaginé possibles les effets d'une conjonction d'aléas naturels (tremblement de terre, raz de marée) ou en tout cas pas souhaiter le faire puisque d'autres compagnies que TEPCo s'étaient engagées dans de vrais effort de rénovation à la suite de tremblements de terre récents ; on observe aussi une absence de rigueur dans la prise en compte de chacun de ces risques naturels dans l'implantation des réacteurs dans ces zones. Idem en matière de contrôle de sûreté sur les procédures de vérification du bon fonctionnement des systèmes en place, le tout venant d'une trop grande proximité des autorités de sûreté et des exploitants inhérent au style règlementaire japonais et à la culture de respect de l'autorité. Les réacteurs accidentés étaient anciens et certains qui venaient de recevoir l'autorisation de prolongation de leur durée de vie n'avaient eu à procéder à aucune rénovation.

technologie s'établit comme un bien collectif mondial qu'il convient de préserver collectivement par l'établissement progressif d'un tel régime.

Le développement du nucléaire va donc se poursuivre avec une divergence croissante de trajectoires entre pays. Dans les pays qui maintiennent l'option nucléaire il reprendra progressivement, le temps de tirer les leçons de cet accident majeur, et se poursuivra sans doute à un rythme moins rapide que ce qui était prévu avant Fukushima (voir tableau 5). De plus, conscients qu'un prochain accident mettrait en question l'acceptabilité de la technologie et les compromis qui vont s'établir après Fukushima[24], les pays qui maintiennent l'option nucléaire admettent désormais l'importance d'améliorer l'indépendance du contrôle de la sûreté. Certains cherchent à œuvrer à la mise sur pied d'un régime international de la sûreté nucléaire, mais pourra-t-on aller jusqu'à la mise en place d'une gouvernance mondiale contraignante garantissant l'indépendance et la compétence des autorités nationales ? On analysera ces deux trajectoires politiques dans les termes de la rationalité économique.

2.1. Le choix de renoncer au nucléaire : l'incommensurabilité des externalités et des risques

Rejeter l'option nucléaire revient à considérer que, quel que soit l'environnement institutionnel et politique, la technologie ne serait pas maîtrisable. Le rejet du nucléaire au nom de l' « éthique », justification forte du choix allemand (Ethics Commission, 2001), renvoie à la croyance dans la fatalité de la catastrophe absolue, dans notre destin social non contrôlable si cette technologie est utilisée. Ce choix renvoie au fonds à une diabolisation des dommages d'un accident grave qui seraient sans commune mesure avec tous les autres accidents industriels les plus graves. Ce choix revient aussi à considérer que, même indépendantes et compétentes, même soumises aux pressions du politique, les institutions de sûreté seront toujours impuissantes à réduire au minimum le risque résiduel, alors qu'elles font tout pour y parvenir. Quoiqu'elles fassent, le risque résiduel qui subsiste est inacceptable.

Le choix de renoncer à la technologie nucléaire revient à considérer que ce qui peut arriver est toujours le pire, c'est-à-dire la perte du réacteur accidenté avec la perte totale de son confinement et le rejet de la majorité de sa radioactivité dans l'environnement, comme ce fut le cas à Tchernobyl du fait de l'absence d'enceinte de confinement. De plus, même si le maximum est fait pour éviter un accident de ce type, il restera toujours une part d'imprévisible. Les accidents sur les réacteurs de Fukushima qui résultent d'un enchaînement de catastrophes naturelles non prises en compte à cette échelle dans les études de sûreté montreraient que « l'extraordinaire peut devenir l'ordinaire », pour paraphraser les sociologues de la société du risque. Ils révèleraient au fond comment la combinaison de risques naturels et de risques technologiques majeurs confère une dimension philosophique qui devrait conduire au bannissement de cette technologie dans les sociétés voulant garder prise sur leur futur.

Cette technologie ne peut donc se comparer économiquement à aucune autre technologie. Aucun bilan coût-bénéfice ne peut être effectué pour comparer cette filière de production électrique à d'autres. Ces risques sur la santé et la morbidité des travailleurs et des populations, et le coût du gel des territoires contaminés sur plusieurs décennies à la suite d'un accident ne se compareraient en rien aux impacts sanitaires de l'extraction du charbon sur les mineurs, aux risques d'accident par

[24] Pour un panorama raisonné des politiques nucléaires après Fukushima, voir Joskow et Parsons (2012), et WEC (2012).

coup de grisou (on ne compte pas à Fukushima de décès immédiat dû à une irradiation poussée, alors que les mines de charbon tuent par des accidents un millier de mineurs en moyenne par an au plan mondial), aux effets de la pollution atmosphérique dus à l'usage du charbon dans la production électrique ou à la pollution des sols par des installations chimiques, sans parler des effets intergénérationnels sur le réchauffement climatique. Ce serait banaliser le risque nucléaire, le rendre ordinaire.

C'est pourtant à la base du calcul économique élargi à la comparaison de filières électriques. Si l'on cherche à rationnaliser les choix entre filières électriques en comparant leurs coûts externes qui sont à additionner à leurs coûts privés, les coûts externes du nucléaire calculé en prenant en compte une aversion au risque d'accident (qui en théorie reflète le consentement à payer une taxe « internalisant ce risque) apparaissent faibles par rapport à ceux des autres filières. C'est un des résultats des exercices du programme ExternE de la Commission européenne où les externalités des autres productions électriques sont 4 à 10 fois plus élevé dans le calcul le plus pessimiste (voir tableau 5). Un fort coefficient d'aversion au risque (facteur 5) s'appliquant aux aménités résultant d'un accident nucléaire est pris en compte dans ce calcul, ainsi que des estimations réalistes des probabilités d'accidents et des dommages associés[25].

Tableau 6: Comparaison du montant agrégé des externalités de chaque filière électrique dans l'approche ExternE 1995 (en €/MWh).

Nucléaire	Thermique charbon	Thermique gaz
0,1 - 3,1	17,6 - 31,9	12,1

Note : Calcul avec Coef. d'aversion au risque accident de 5
Source : European Commission DGXII (1995) ExternE : Externalities of Energy - Vol.1 (summary) et Vol II (methodology) - Luxembourg : European Commision, 1995

Admettons ici un instant qu'il n'y ait pas une incompatibilité intrinsèque entre la nature éthique du choix de renoncer au nucléaire, et le raisonnement utilitariste de la théorie économique. Le choix de sortir du nucléaire apparaît refléter une aversion au risque infinie vis-à-vis d'un accident très peu probable mais aux dommages incommensurables, si l'on prend en référence un calcul avec une aversion au risque élevée mais finie comme celui de l'étude ExternE (voir tableau précédent). On se situe dans une logique symétrique de celle du pari de Pascal, face situation de probabilité très faible, mais avec des pertes si élevées, si terribles qu'elles sont non mesurables. Ceci explique que l'option nucléaire puisse être économiquement disqualifiée vis-à-vis de toutes options dont les coûts sont et seront mesurables et contrôlables, quel que soit leur niveau possible.

Les analyses expérimentales sur la perception du risque d'accident technologique ou de catastrophes naturelles peuvent éclairer en partie le basculement des perceptions sociales et des préférences collectives à la suite d'un accident. Elles montrent d'abord que les probabilités objectivement très faibles sont surestimées par les individus (Kip Viscusi, 1985). Ceux-ci évaluent mal l'incertain par rapport à des évènements de telle probabilité à partir d'un très petit nombre d'évènements ; de la

[25] Dans le cas du nucléaire, il y a prise en compte dans ExternE des impacts de long terme de la gestion des déchets nucléaires, les effets de faible doses, mais surtout les effets d'un accident de réacteur de probabilité de 8.10^{-6}, un relâchement de radioactivité de 1%, avec des conséquences sanitaires de 50400 cancers, et un coût d'immobilisations des sols de 100 milliards d'€. Le cadre de ce papier ne permet pas de détailler les diverses méthodes de prise en compte des coûts et risques externes, notamment ceux associés au nucléaire. Toutefois disons que dans les divers exercices deux méthodes s'opposent : la démarche maximaliste qui prend uniquement en considération le pire des cas quel que soit son niveau de probabilité d'occurrence (voir les études d'Homeyer (1988) et de Pace University/Ottinger (1991) et la méthode probabiliste telle celle utilisée dans les études ExternE et qui deviendra la démarche dominante dans les années 90.

même façon les détails sur la représentation des effets d'un évènement tendent à influencer la probabilisation subjective de cet évènement : plus les conséquences paraissent effrayantes, plus la probabilité subjective est élevée. Dans le cas du risque nucléaire s'ajoute la dimension imaginaire et symbolique du risque avec les effets invisibles des radiations dans la durée, et le temps très étiré des effets de l'accident sur la condamnation d'un territoire, etc.

En prolongeant le raisonnement de l'Ethics Commission (2011) qui, en Allemagne, a conseillé le gouvernement fédéral, pour justifier le choix de sortir du nucléaire, cette décision se justifie aussi parce qu'il y a l'option alternative des ENR dont les coûts privés et sociaux sont forcément économiques alors qu'elle permettrait de respecter drastiquement les engagements de réduction des émissions de carbone. L'engagement moral et idéologique derrière cette croyance est tel qu'on n'a même pas à s'interroger sur la faisabilité technique et la viabilité économique d'un recours presque total aux options « vertes » d'ici 40 ans et qu'on n'a pas à en apporter la preuve[26]. Ceci justifie aussi que l'économie dans son ensemble assume l'important coût d'opportunité que constitue la dévalorisation complète des actifs nucléaires qui sont en place au moment de la décision[27].

2.2. L'option d'amélioration de la technologie nucléaire et de ses institutions

Le choix de préserver l'option nucléaire doit s'accompagner d'une amélioration de la sûreté des réacteurs existants et des procédures d'exploitation, pour tenir compte des leçons de Fukushima. Il nécessite aussi d'améliorer encore la conception des réacteurs de 3° génération et il doit amener tous les pays, et non plus seulement les pays riches de la zone OCDE, à adopter des réacteurs Gen III/III+. Enfin les institutions de contrôle doivent gagner encore en transparence, en indépendance et en compétences, notamment dans les pays où elles manquent clairement d'autonomie, même si, dans les pays émergents, c'est au prix de l'efficacité du déploiement de la technologie et de son coût.

Face à ce nouveau mouvement d'internalisation des coûts, l'hypothèse qui nous paraît devoir être testée est que l'effet de hausse des niveaux de sûreté et de complexification de la technologie sur les coûts privés a déjà été tel qu'il ne peut être amplifié significativement par le renforcement des normes post-Fukushima.

- **Le renforcement de la sûreté des équipements en place**

Dès avant Fukushima, le moyen le plus économique de maintenir sa capacité de production « bas carbone » pour un électricien possédant déjà des centrales nucléaires est de prolonger la durée de vie de ses réacteurs au bout de leur durée d'exploitation initialement prévue de 30 ans sous conditions rigoureuses du contrôle de leur sûreté et après réalisation d'investissement de rénovation. On discutera le fait que toutes les autorités de sûreté ne semblent pas imposer de tels investissements lors de l'autorisation de prolongation. Ce n'était pas systématiquement le cas au

[26] Vu la faible densité énergétique des ENR, la localisation reculée des potentiels et les contraintes de développement de réseau, elles pourront difficilement couvrir la grande majorité des besoins électriques, même avec une intervention publique forte pour diriger et financer la mutation technologique du système électrique que cette option implique.

[27] La perte de revenus des énergéticiens allemands du fait de la fermeture anticipée des 22 GW a été chiffrée à 22 milliards d'€ (voir l'étude d' Arthur D. Little demandée par le Ministère fédéral de l'Économie et citée dans Handelsblatt, 9 août 2011).

Japon avant Fukushima puisque le réacteur n°1, l'un des trois accidentés, venait de se voir accorder sa licence de prolongation d'exploitation sans investissement d'amélioration[28].

Comment se posait déjà avant Fukushima l'économicité de ce choix de rénovation, sachant qu'il permettait déjà un rehaussement du niveau de sûreté ? En prenant le cas français, le coût d'investissement initial est pratiquement déprécié et les investissements de rénovation par réacteur, estimés de l'ordre de 650 millions d'€ (700 €/kW)[29] pour une production qui sera prolongée de 10 à 30 ans, sont parfaitement rentables par rapport à un investissement dans une centrale en cycle combiné à gaz de capacité équivalente, du fait de coûts d'exploitation beaucoup moins élevés, même si la durée de l'actif nucléaire rénové prise en considération dans le calcul est bien moindre. Avec un amortissement sur 10 ans (durée minimale d'exploitation de l'actif rénové), le coût total actualisé du MWh d'un réacteur rénové est de l'ordre de 35 €/MWh (en comptant 10 € pour l'amortissement et 25 €/MWh pour l'ensemble des dépenses d'exploitation) contre 77 €/MWh pour le MWh d'un CCGT (avec des frais de combustible de 65 €/MWh du CCGT pour un prix du gaz et un prix du carbone moyens).

Que change Fukushima ? A la suite de l'accident japonais, des évaluations complémentaires de sûreté ont été menées sur les réacteurs en fonctionnement ou en construction dans tous les pays (UE, États-Unis, Canada, Russie, Chine, et bien sûr Japon). Des mesures sont ou vont être imposées aux réacteurs existants, notamment pour renforcer les protections contre les phénomènes naturels. Les profils des risques résiduels dépendent sans aucun doute de chaque réacteur (technologie, conception, âge, zone d'implantation) et il est probable que les possibilités de réponse à la nécessité de rehausser les niveaux de sûreté varieront selon les localisations, sans qu'il ne puisse y avoir de référentiel de sûreté uniforme au plan mondial, voire au plan de l'Union européenne. Les problématiques vont rester nationales, une fois les mesures décidées à partir des tests de résistance réalisés éventuellement par des revues croisées par des pairs pour accroître le niveau d'indépendance des évaluations. C'est alors que jouera l'arbitrage économique des exploitants entre fermer définitivement un réacteur ou l'améliorer si les mesures demandées sont trop difficiles et trop coûteuses à mettre en œuvre par rapport aux revenus attendus des productions futures.

Dans les pays au parc vieillissant, les mesures additionnelles (équipements supplémentaires de diesel de secours, bâtiment de contrôle « bunkerisé ») vont devoir être mises en œuvre avant la date de rénovation, quand ce n'est pas possible de le faire en même temps. Les investissements correspondants qui sont estimés en France à 150 millions d'€ par réacteur auront un impact de 2,5 €/MWh (Cour des comptes, 2012), mais la moitié est déjà incluse dans les estimations antérieures de coûts de rénovation[30]. Cette internalisation supplémentaire est donc loin de mettre en question l'économie des réacteurs rénovés dont le niveau de sûreté serait accru : le coût économique de la production par l'équipement rénové passerait de 35 à 36,25 €/MWh. C'est une estimation haute car

[28] Aux États-Unis, les investissements d'amélioration étant systématiquement demandés lors des visites décennales, il n'y pas d'investissements supérieurs à ceux des visités précédentes.

[29] Avant Fukushima EDF estimait le montant des investissements de rénovation autour de 35 milliards d'€ pour ses 58 réacteurs, soit en gros 650 millions d'€ par réacteur. Après les conclusions des tests de sécurité renforcée, on aurait un montant d'investissements de rénovation aux 45 milliards de € à entreprendre séquentiellement sur les 58 réacteurs français, montant annoncé par EDF et le gouvernement et avalisé par la Cour des Comptes, ce qui ferait en gros un coût de 800 millions par réacteurs.

[30] On aurait donc un coût total par réacteur de 800 millions d'€ environ, ce qui correspond aux 45 milliards de € d'investissements de rénovation à entreprendre séquentiellement sur les 58 réacteurs français, annoncé par EDF et le gouvernement et avalisé par la Cour des Comptes.

le surcoût dû à Fukushima sur le coût de production par les réacteurs existants devrait être plus bas dans les pays déjà précautionneux. Aux États-Unis où les protections contre les phénomènes naturels extrêmes sont déjà à un niveau de précaution très élevé, les estimations du coût des mesures additionnelles seraient d'un million de $ par réacteur[31].

- **Les effets de Fukushima sur l'économie des filières Gen III/III$^+$**

Après Fukushima, comme après les deux accidents majeurs précédents, les normes de sûreté des nouveaux réacteurs vont subir un renforcement à la suite des tests de sûreté sur les têtes de série en cours de réalisation. Elles porteront sans doute sur la mise à niveau des normes de protection contre l'ensemble des risques naturels prévisibles. Ceci dit, contrairement aux effets des accidents de TMI et Tchernobyl sur les changements de règlementation, les changements apportés ne devraient pas affecter radicalement les coûts des chantiers des premiers réacteurs EPR, déjà très « inflatés » en Finlande, en France et en Chine, ainsi que ceux des AP1000 en Chine et à présent aux États-Unis, car ces effets seront noyés dans ceux du réapprentissage très difficile des constructeurs et des architectes-ingénieur sur ces têtes de série (voir précédemment). De plus, dans une perspective de réalisations ordonnées des réacteurs suivants avec retours d'expérience et effets de série, les coûts de ces réacteurs devraient être inférieurs d'au moins un tiers à celui des premières réalisations, sans que les normes de sûreté renforcées limitent les possibilités de baisse de coût pour deux raisons. D'une part la conception d'ensemble des installations atteignait déjà un haut niveau de sûreté avant Fukushima. D'autre part les changements de normes de sûreté sur l'EPR ou l'AP1000 concerneront essentiellement les protections extérieures de l'installation, ce qui ne bouleverse pas la conception d'ensemble du réacteur et de la partie classique.

Tableau 7: Comparaison des coûts de différentes solutions de productions nucléaires et d'une production par CCGT (avec un coût du capital de 10%).

	Nucléaire existant rénové	Tête de série Gen III +	Réacteur de série Gen III +	CCGT
Coût d'investissement (€/kW)	700 - 800*	3600*	2400*	900*
Cout investissement (€/MWh)	10+1,2[v]	62	40	10
Frais fixes d'exploitation (€/MWh)	15	12,5	10	4
Coût variable d'exploitation (combustible et CO2) (€/MWh)	10	7,8	7	61** dont 10 pour CO2***
Ajustement coûts de long terme (démantèlement, gestion déchets)	3	3	3	
Coût assurantiel implicite	1,4	1,4	1,4	
Coût total (€/MWh)	40,6	82,3	61,4	76,75

Note de calcul : Les calculs sont effectués en € et non plus en $ (avec un taux de conversion de 1 € pour 1,2 $) à partir des données du tableau 1 pour se rapprocher des calculs français récents.
[v] surcoût Fukushima ; *Coût sec ; ** Hypothèse de prix élevé du gaz : $7.8/MMbtu ; *** Hypothèse CO_2 price: 30/tCO_2.
Source: Pour le nucléaire Gen III de série et CCGT : NEA/IEA, 2010. *Projected cost of electricity generation.* Tables 5.2, 6.1. & 6.2.

La tendance à la complexification de la technologie des réacteurs et de la hausse des coûts d'investissement apparaît en fait s'infléchir et rencontrer une asymptote. Malgré les hausses de coût

[31] Propos de John Ritch, directeur général de WNA, rapporté in Chestney and Chaps, "*World nuclear powers on after Fukushima, costs rise*". Reuters 8 mars 2012, http://www.reuters.com/article/2012/03/08/nuclear-fukushima-idUSL5E8E76VC20120308

inhérent au rehaussement des normes de sûreté après Fukushima, le coût du nucléaire ne connaîtra pas les évolutions erratiques précédentes dus à la déstabilisation du « design dominant » de la technologie des réacteurs parce que la technologie des nouveaux réacteurs de type Gen III/III+ a déjà atteint de hauts niveaux de sûreté. Une nuance est sans doute à apporter : cette tendance ne se concrétisera que dans le seul contexte d'organisation industrielle qui permettrait au constructeur de bénéficier des retours d'expériences et des premiers effets de série sur les commandes futures , ce qui pourrait ne pas être le cas pour AREVA ou Toshiba-Westinghouse si elles sont dispersées entre plusieurs marchés et non pas concentrées dans un seul comme ce pourra l'être pour les constructeurs nationaux en Chine ou en Corée du sud.

L'internalisation des coûts devrait être aussi approfondie par la prise en compte plus réaliste des coûts de long terme, c'est-à-dire des dépenses intergénérationnelles de gestion des déchets et du démantèlement en les faisant payer par celui qui consomme le kWh responsable de ces coûts futurs (voir encadré 2) . Au bout du compte, quand sont ajoutés les ajustements des coûts du long terme,

Encadré 2 : Une meilleure internalisation des coûts de long terme

L'internalisation des coûts devrait être aussi approfondie par la prise en compte plus réaliste des dépenses intergénérationnelles de gestion des déchets et du démantèlement en les faisant payer par celui qui consomme le kWh responsable de ces coûts futurs, comme le propose le rapport de la Cour des Comptes sur l'évaluation des dépenses du nucléaire pour la France (Cour des comptes, 2012). Ces dépenses futures sont financées par des provisions spéciales et les intérêts courant dessus, qui sont les unes et les autres accumulées annuellement dans des fonds spéciaux extérieurs aux firmes ou sur des lignes comptables spéciales dans les bilans des entreprises.

Or l'expérience industrielle et les retours d'expériences manquent, faute de réalisations effectives des centres de gestion de déchets et faute de retour d'expérience conséquente en matière de démantèlement dans le contexte français[1]. Les estimations de dépenses de démantèlement varient ainsi du simple au double entre celles auxquelles on se réfère en France et celles calculées au Royaume Uni (Cour des Comptes, 2012). Face à l'incertitude des coûts que marque la divergence des estimations entre pays, la prudence commande de se référer à des estimations pessimistes. Dans le cas de la gestion des déchets de long terme, l'estimation de prix de revient par MWh en France ne prend pas encore en compte les effets de mesures de précaution supérieures que prendra l'ANDRA et qui conduit à un doublement des dépenses associées au projet du centre de gestion des déchets de 18 à 35 milliards d'€.

Toutefois le calcul des coûts actualisés par MWh (qui correspond de fait au provisionnement et de l'accumulation d'intérêts qui vont courir sur les provisions accumulées annuellement) ne conduit pas à ce que le doublement des estimations de dépenses futures de gestion des déchets de long terme et de celles du démantèlement aient des effets radicaux de hausse du coût économique du MWh produit vingt ou trente ans auparavant. Avec un taux de 5%, sur ces provisions, le prix de revient augmente respectivement de 0,5 €/MWh pour un doublement des dépenses de gestion des déchets et de 2,5 €/MWh pour le doublement du coût du démantèlement à échéance de 10 ans après la fermeture du réacteur.

On pourrait ajouter aussi dans le coût complet le coût du portage du risque assurantiel de l'accident nucléaire par l'État. On sait qu'au-delà d'un certain montant l'Etat prend en charge les dommages. Pour estimer à quoi correspondrait le coût de cette assurance publique, on peut en une indication en suivant la démarche de la Cour des Comptes (2012, p.258). Dans le calcul on fait comme si un fonds assurantiel abondé par une taxe sur les kWh nucléaires et dans lequel les montants accumulés annuellement seraient rémunérés à un taux de 5% par an. Le coût supplémentaire par kWh à considérer serait de 1,41 €/MWh***.**

*On arrive à 1,4 €/MWh de la façon suivante : le fonds en question doit être abondé de telle sorte qu'il puisse pour faire face à un accident dont les dommages s'élèverait à 70 milliards d'€ dans un système nucléaire de 58 réacteurs produisant 410 TWh par an sur 40 ans de durée de vie. Si on considérait le coût d'une assurance commerciale, le coût serait probablement plus important d'autant plus que le pool d'assureur devrait prendre en compte le fait qu'il pourrait avoir à faire face à l'occurrence d'un accident avant les 40 ans de fonctionnement de l'ensemble du parc considéré, si l'on raisonne par rapport à un tel parc (Brassard, 2012). Mais ce pourrait être conçu par rapport à l'ensemble des réacteurs mondiaux si se généralisait un principe de responsabilité privé

les nouvelles productions nucléaires seraient compétitives et rentables avec un coût du capital de 10% d'entreprises en régime de marché, et a fortiori le coût du capital de 5% des entreprises régulées, même si le prix du CO2 reste à de bas niveau (voir tableau 6).

- **Un besoin accru de garanties financières**

Le problème d'investir dans une centrale nucléaire est non seulement celui de s'assurer de sa compétitivité par rapport aux autres moyens de production électrique, mais aussi celui de la gestion du risque d'investissement. Fukushima a bien sûr ajouté plusieurs paramètres dans l'évaluation des risques : amplification du risque règlementaire et politique, mais aussi celle du risque associé à la perte d'un équipement nucléaire pour un propriétaire-exploitant, ou plus radicalement du risque de faillite. Les financiers s'intéressent désormais au risque de voir un accident nucléaire dévaloriser brutalement l'actif dont ils auront financé le développement, mais surtout de mettre en faillite l'entreprise électrique, avec des pertes conséquentes pour eux (Crooks, 2011). Cette nouvelle perception du risque financier s'est manifestée par le perte de valeur actionnariale des entreprises électriques détenant des actifs nucléaires, notamment celles de taille moyenne après l'accident de Fukushima (The Economist, 24 Mars 2012).

Le coût de la dette attachée à l'investissement nucléaire tiendra compte désormais de ce risque de perte de valeur du futur actif nucléaire en fonction du niveau de sûreté du réacteur, quand bien même un réacteur plus sûr nécessite une immobilisation financière plus importante de capitaux (la différence entre le coût d'un réacteur Gen II et d'un réacteur Gen III/III^{+} est 650 $/kW selon les estimations chinoises recensées par le rapport IEA-NEA de 2010). Reste à savoir si les financiers ne refuseront pas tout simplement de prêter des fonds aux entreprises électriques prêtes à ré-investir dans le nucléaire, surtout si existent des alternatives crédibles comme celle des CCGT utilisant du gaz qui sera bon marché pendant une quinzaine d'années.

En tout cas le dilemme se posera pour leurs prêts aux investissements nucléaires dans les pays émergents, même si le vendeur bénéficie de l'appui de garanties publiques pour les crédits-exports sur lesquels appuyait sa vente. Les financiers prendront en compte les caractéristiques du pays d'implantation, notamment les compétences et l'indépendance des institutions de contrôle de la sûreté nucléaire dans les pays primo-accédants[32]. Ils seront vigilants sur les conditions d'implantation des nouveaux équipements dans des zones aux risques naturels répertoriés, notamment dans les pays émergents sujets à de tels risques qui maintiennent leur option nucléaire (Inde, Chine, Pakistan, Philippines, Indonésie, Vietnam et Turquie) et qui ont besoin de financement étranger (Crooks, 2011). Ils devraient refuser le financement pour tout projet que certains de ces pays soumettraient à leur financement.

2.3. L'acceptabilité du nucléaire comme bien collectif mondial: le besoin d'une gouvernance mondiale de la sûreté nucléaire

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

[32] Voir la prise de position d'un banquier de la Société Générale sur les possibilités de prêt, notamment à l'Inde pour la réalisation de projets d'EPR. Financial Times, avril 2011.

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 défaut de vigilance et de prudence des opérateurs nucléaires en matière de sûreté, 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 manifesté clairement 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).

Il y a donc 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, Vietnam, Turquie, Indonésie, Pologne, etc.), alors que les conditions minimales de compétences et de culture de sûreté conduisant à un contrôle strict de la technologie nucléaire civile sont toutes à créer. Il 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 a fortiori dans cette catégorie des pays comme Taïwan, l'Inde et surtout 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 dans cette catégorie malgré les évolutions positives depuis Tchernobyl ainsi que les anciennes républiques soviétiques (Ukraine, Arménie)[33] .

Tableau 8: 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 d'un régime international contraignant en matière de sûreté nucléaire, comme cela a été discuté à plusieurs reprises après mars 2011 dans le cadre du

[33] La Russie ne semble pas avoir rehaussé suffisamment le niveau de crédibilité des institutions de contrôle de sûreté pourtant indépendante (le contrôle est assuré par l'agence de sûreté des installations industrielles, qui manque de ressources en compétences pour couvrir tous les domaines) alors que, comme certains ont pu le noter, la dégradation de la situation financière en Russie pourrait créer à terme un problème de sûreté dans certaines installation : "Officials at the stations admit that the deteriorating financial situation of the reactors is becoming a nuclear safety problem" The Economist, 24 mars 2012.

G20 et de conférences de l'AIEA, mais jusqu'ici sans résultat. 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 prêt à de 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.

- **Ce que serait un régime international idéal**

En s'inspirant des réflexions menés avant et après Fukushima (Meserve, 2009 ; INSAG, 2006 ; WEC, 2012), on pourrait tracer les grandes lignes d'un régime idéal qui couvrirait différents aspects du contrôle de la sûreté nucléaire, dont celle des réacteurs et de la gestion des déchets nucléaires.

- Un régime international contraignant ne pourrait pas être mis en œuvre sans une gouvernance forte assumée par un organisme international qui définirait des normes contraignantes et superviserait l'action d'autorités de sûreté nationales dans le cadre de relations précisément définies.
- Des critères de compétences minimales en matière de contrôle de la sûreté pour les pays « primo-accédants » seraient définis avec des accords de parrainage pour encadrer le développement des institutions et des règlements en la matière
- Plus exigeants encore, des principes d'indépendance des autorités de sûreté et des règles de transmission d'information aux populations proches des installations et à l'opinion publique seraient imposés.

On voit bien la difficulté de mettre en œuvre de tels principes qui sont au cœur des exigences de contrôle de la technologie nucléaire (Findlay et Frechette, 2010). Comme ces mesures sont politiquement sensibles, la focalisation devrait se faire dans les premières étapes sur des aspects tangibles : les normes de sûreté et sur les actions de solidarité en cas d'accidents majeurs, en organisant des relations verticales étroites entre une autorité mondiale de la sûreté nucléaire et les autorités nationales.

- Pour les nouvelles installations, le régime comporterait des règlements communs sur le niveau de sûreté des nouveaux réacteurs et les normes d'implantation des installations; dans ce même domaine on peut ajouter un renforcement des exigences de sûreté pour les réacteurs à l'exportation qui s'imposerait au même titre que les normes de contrôle des usages pacifiques des installations du régime instauré par le Traité de non-prolifération (TNP). Des critères anti-corruption devraient aussi être pris en compte pour limiter le risque pour la sûreté de réacteurs, sachant que des cas avérés ou potentiels sont de notoriété publique[34].

[34] Le cadre limité de ce papier ne permet pas de développer ce point. Tout le monde connait le cas du réacteur philippin vendu par GE lors de la dictature Marcos et qui, achevé, n'a jamais démarrer pour des raisons de sûreté. On voit un tel débat actuellement en Inde où la négociation de gré à gré de trois paires de réacteurs avec trois vendeurs étrangers suscite de grandes interrogations (voir par exemple dans le journal Hindu l'article sous le titre « Corrupt means taint the nuclear

- Pour les équipements nucléaires en exploitation, le régime doit prévoir un droit de regard via des peers reviews obligatoires et régulières par des experts de pays tiers sur les installations de chaque pays signataire, avec des principes contraignants sur la réalisation des recommandations d'améliorations de réacteurs et des procédures d'exploitation en place par exemple). Les audits par des tiers devraient être obligatoires. La fermeture de réacteurs trop déficients devrait pouvoir être ordonnée, quitte à définir des compensations en fonction du niveau de richesse du pays[35].
- Le régime doit prévoir des principes de solidarité, voire d'ingérence en cas de crise grave, pour éviter l'aggravation des situations. Ceci s'inscrirait dans la révision du principe de responsabilité limitée pour définir un nouveau régime de responsabilité civile internationale.

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[36]. 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.

- **Quel chemin praticable ?**

Après Fukushima, les discussions intenses au sein du G20 et dans le cadre des réunions de l'AIEA n'ont pas abouti à un changement des statuts de l'AIEA, ni à un élargissement de ses missions à un contrôle contraignant de la sûreté nucléaire. Deux raisons à ceci. La première est la différence de culture de sûreté, de style règlementaire et de position administrative des institutions de sûreté nucléaire. Un régime contraignant piloté d'un niveau multilatéral ne pourrait pas fonctionner si toutes les autorités nationales ne sont pas réellement à distance et ont les moyens de leur indépendance par rapport aux ministères et aux administrations, ce qui présume des possibilités de le faire dans des sociétés qui n'ont pas encore de maturités institutionnelles. La seconde raison est l'opposition des États-Unis et des deux grandes puissances émergentes, Chine et Inde, pour lesquelles la sûreté des installations devrait rester la prérogative unique des États.

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'auto-contrôle des exploitants au plan mondial

---

deal », 22 Mars 2011. Voir http://www.thehindu.com/opinion/lead/article1562256.ece?homepage=true (consulté le 15 mai 2012)

[35] On se souvient qu'un des conditions d'entrée des pays d'Europe de l'Est avait été la fermeture de réacteurs jugés comme présentant pas des standards de sûreté minimaux. Des compensations sous forme d'aides avaient été versées. On voit tout de suite qu'un tel principe devrait s'appliquer à l'Arménie qui a un réacteur VVER-400 de première génération sans enceinte de confinement situé en zone sismique.

[36] Pour l'heure l'IAEA intervient de trois façons : 1. la promotion d'institutions de sûreté nucléaire compétente et indépendante : former et appuyer les autorités de sûreté naissantes, s'assurer du respect de règles minimales d'autonomie vis-à-vis des instances de promotion, notamment avec les IEAE *Integrated Regulatory Review Service mission*) ; 2. la diffusion d'une culture de sûreté au travers des *peer reviews* volontaires ; 3. la promotion des normes de sûreté sévères par la concertation qui vise à une harmonisation des référentiels de sûreté vers des niveaux exigeants. La seule règle qui est imposée aux Etats membres de l'AIEA et signataires du TNP est que les pays acheteurs respectent les « *IAEA Fundamental Safety Principles* ».

dans le cadre de leur association mondiale, la World Association of Nuclear Operators (WANO), celle-ci cherchant depuis Fukushima à évoluer en instance de contrôle en renforçant ses pouvoirs à l'instigation de ses membres.

Installée en 1989 à la suite de Tchernobyl pour faciliter l'amélioration de l'information et des compétences des exploitants. WANO est déjà un vecteur efficace pour faire évoluer les exploitants vers des normes de sûreté de très haut niveau en matière d'exploitation, comme le souligne un récent rapport officiel américain par ailleurs plutôt sceptique sur le rôle possible de l'AIEA (Blue Ribbon Commission, 2012, p. 111). Elle agit dans 4 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 consolidées par des visites de suivi. Ce dernier mode d'action a été le principal moyen de partage d'expériences et d'expertise. Des recommandations sont adressées à l'exploitant, mais son adhésion à la charte de WANO ne porte pas l'engagement de chercher à les suivre nécessairement.

Tirant les enseignements de Fukushima, 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* de fréquence des contrôles (passage de 6 ans à 4 ans)[37]. 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. L'autorégulation reposerait donc sur le principe de *peer pressures* (pressions par les pairs), qui est appliqué dans les relations internationales dans le domaine de l'aide économique avec plus ou moins de succès. 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.

3. CONCLUSION

Les soubresauts que le développement du nucléaire a connus depuis son émergence ont conduit à sécülariser cette technologie messianique. Le grand projet initial d'une énergie illimitée promu par une communauté de scientifiques et de technocrates enthousiastes, a vécu : le nucléaire ne peut plus être vu comme la solution définitive et unique au problème énergétique de l'humanité, comme cela était le cas il y a quarante ans. Mais il doit demeurer une des solutions. Les pays émergents qui ont d'immenses besoins et les sociétés post-industrielles, qu'elles soient vertueuses ou gaspilleuses, ne peuvent pas se passer d'une énergie bas carbone pour faire face à l'enjeu climatique et limiter le recours aux ressources fossiles, en cours d'épuisement au cours de ce siècle. Et, malgré les hausses de coût spectaculaires qui reflète la désorganisation des apprentissages industrielle et le caractère erratique de l'internalisation des coûts sociaux, le nucléaire reste viable économiquement pour

[37] En parallèle WANO a élargi le champ d'exigences imposées à ses membres, notamment en matière de gestion de situations de perte d'alimentation électrique ou de résistance à des événements naturels au-delà de ce qui avait été conçu lors de la construction de la centrale. Des recommandations plus générales ont été aussi définies, notamment en matière de plan d'urgence.

autant que des modalités de partage de risque soient aménagés dans les marchés électriques libéralisés.

La nouvelle séquence d'internalisation des coûts et risques du nucléaire ouverte par Fukushima, est marquée par la confirmation de l'abandon de la technologie par certains pays où les préférences sociales ont conduit à rejeter cette technologie, et par la recherche d'amélioration de la technologie et des institutions du nucléaire par les autres pays, avec notamment la prise de conscience du besoin d'une gouvernance contraignante de la sûreté nucléaire au plan international.

La première voie de sortie du nucléaire revient à refuser de s'interroger un peu plus loin sur la possibilité pour une démocratie industrielle de contrôler le risque nucléaire et sur l'organisation des pouvoirs qui peuvent conduire à un contrôle rigoureux. La seconde voie apparaît justifiée économiquement et « légitimable » politiquement. La nouvelle étape d'internalisation ouverte par Fukushima aura des effets limités sur les coûts, du fait des étapes antérieures d'approfondissement de la sûreté. La complexification de la technologie atteint une asymptote : on est en train de sortir du défi d'apprendre sur la sûreté par les accidents. En revanche il faut arriver à garantir la sûreté en s'attaquant à l'autre racine du problème qui est la nécessité d'indépendance et de compétences des autorités de sûreté ; mais est ce possible ? L'enjeu est d'importance quand on sait que le centre de gravité du système électronucléaire mondial va se déplacer dans les prochaines années vers les pays asiatiques, en particulier la Chine, où ces conditions ne sont pas remplies. Le destin économique et social de la technologie nucléaire n'est pas encore assuré.

-§-

Références:

Argote L., et Epple, D., 1990. Learning curves in manufacturing." *Science,* vol. 247(4945): p.920-924.

Bennett L., Karonsakis P. et Moynet G. (1983), Étude des coûts de l'énergie nucléaire dans le monde. *Revue Générale Nucléaire*, Vol 1, janvier-février p.20-30

Blue Ribbon Commission,2012*, Report on Nuclear Wastes Management*, Washington

Brassard G., Les risques majeurs et le garantie financière de l'Etat en France, Revue de l'énergie, n°605, 2012

Beck, U., 2003*. La société du risque : sur la voie d'une autre modernité*. Paris : Flammarion

Bupp I et Dérian J.C., 2006, Nuclear power in the aftermath of "Nine Eleven" , *Revue de l'Energie,* n° 570, p.81-92

Bupp I et Dérian J.C., 1978, *Light water reactor : how the nuclear dream dissolved ?*, New York: Basic Books,

Collingridge D. 1980*, The Social Control of Technology* ,New York: St. Martin's Press; London: Pinter

Cour des Comptes, 2012, *Les coûts de la filière électronucléaire*, Paris : Cour des comptes, Rapport public thématique

Crimstom M. and Beck P., 2002, *Double or quits, The global future of civil nuclear energy*, London, The Royal Institute of International Affairs.

Crooks E., 2011, Enthousiasm for reactor investment cools*, Financial times*, September 29, 2011

DECC, 2011, Planning our electric future : a White Paper for secure, affordable and low carbon electricity

Dooley J.E., Hansson B., Kaperson J.X., O'Riordan T., 1987, *The management of nuclear risk in five countries: political culture and institutional settings* in Dooley ed., *The social contours of risks : Risk analysis, Corporation and Globalization of risks*. Volume 2, Chap. 2

Ethics Commission (for a Safe Energy Supply) (2011), *Germany's Energy Transition: A Collective Endeavor for the Future, Berlin 30 May 2001.*

Findlay T. et Frechette L., 2010, *The Future of Nuclear Energy to 2030: Final Report of the Nuclear Energy Futures Project*. February 4, 2010.

Finon D, Staropoli C., 2001, "Institutional and technological co-evolution in the French electronuclear industry", Industry and Innovation, 8 (2), août 2001, p. 179-199.

Finon D., 2005, La nouvelle concurrence sur le marché mondial des réacteurs nucléaires, *Revue de l'Energie ,* n°5, Mai-Juin 2005, p.

Finon D., 2008, « Force et inertie de la politique nucléaire française. Une co-évolution de la technologue et des institutions », in A. Beltran et al. dir., *État et Énergie, XIX°-XX° siècle*, Paris , La Documentation Française (Comité pour l'histoire économique de la France), p.183-215.

Finon D., Roques F. (2008). Contractual and financing arrangements for nuclear investment in liberalized markets : which efficient combination?, *Journal of Competition and Regulation in Network industries*, vol.9, n°3, September, p.147-181.

Gielecki M. and Hewlet M., 1994, *Commercial nuclear power in the United States: Problems and propects.* Energy Information Administration, Monthly Energy review, august 1994.

IEA & Nuclear Energy Agency (OECD), 2005, Projected Generation Costs

IEA & Nuclear Energy Agency (OECD), 2010, Projected Generation costs

IEA 2011, *World Energy Outlook* 2011, Paris, OECD/IEA

INSAG, 2006, Strengthening the global nuclear safety regime, INSAG-21, a report by the international nuclear safety group, IAEA: Wien.

Jasper, J.M., 1992, Gods, Titans and Mortals: Patterns of State Involvement in Nuclear Development. *Energy Policy* 20(7):653–659.

Joskow P., 2006, *The Future of Nuclear Power in the United States: Economic and Regulatory Challenges,* Working Paper 06-25, AET- Brookings Joint center for regulatory studies, December 2006

Joskow P. & Parsons J.E., 2012, The future of nuclear power after Fukushima, *Economics of energy and environmental policy,* Vol.1, *n°2, p.99-113*

Kadak A. et Matsuo T., 2007, The nuclear industry's transition to risk-informed regulation and operation in the United States. *Reliability Engineering and Nuclear Safety*, Vol. 92, p. 609–618

Kip Viscusi W. (1984).A Bayesian perspective on biases in risk perception, *Economic Letters*, vol. 17, 1-2, p.59-62

Komanoff C. 1981*, Power Plant Escalation: Nuclear and Coal Capital Costs, Regulation, and Economics*, New York: Van Nostrand, 1981

Hultman, N. E., Koomey, J. and Kammen.D. 2007. "What history can teach us about the future costs of U.S. nuclear power." *Environmental Science & Technology*, vol. 41, n°7, p. 2088-2093.

Lester R.K and. McCabe M.J.,1993, The Effect of Industrial Structure on Learning by Doing in Nuclear Power Plant Operation, *The RAND Journal of Economics,* Vol. 24, No. 3 (Autumn, 1993), p. 418-438
MacKerron G., 1992, Nuclear costs: Why do they keep rising? Energy Policy, Vol.20, n°7

Meserve R.A. (2009), The global nuclear safety regime, Daedalus, Fall 2009, Vol. 138, No. 4, Pages 100-111

MIT, 2003, *The Future of Nuclear Power*, MIT report

MIT, 2009, The Future of Nuclear Power, Update of the MIT Report 2003,

Nakamura A., Kikuchi M. « What We Know, and What We Have Not Yet Learned: Triple Disasters and the Fukushima Nuclear Fiasco in Japan," Public Administration Review, ,Vol. 21(6), p. 893-899).

Newbery D.2010, A Nuclear Future? UK Government Policy and the Role of the Market, EPRG Working Paper 1011, Cambridge Working Paper in Economics 1019

Rong J.*, Nuclear Power Projects Financing Experiences and Strategies of China*, 10 December 2009

Slovic P, Feschoff B and Lichtenstein S., 1980, Facts and fears: understanding perceived risk in *Societal risk assessment: how safe is safe enough?* New York : Plenum Press NY

Stoffaes C., 2004, "Energie Nucléaire : le Nouveau Débat mondial", Collection E7 Observer, Editée par Fonds E7 pour le Développement Énergétique Durable

Thomas, S. (1988) *The Realities of Nuclear Power: International Economic and Regulatory Experience* Cambridge, Cambridge University Press.

The Economist, 2011, "Nuclear energy: The dream that failed". *The Economist*, (special report) March 10, 2012

Walker W. & Lonnroth M., 1984, *Nuclear Power struggles, Industrial competition and proliferation Control,* London, George Allen and Unwin.

Wood C. 1987*, Nuclear safety: risks and regulation*, American Enterprise Institute Studies 370

World Energy Council (2012). *World Energy Perspective: Nuclear Energy One Year After Fukushima*, London: WEC, March 2012

WNA (World Nuclear Association (2012*), Safety of Nuclear Reactors*, consulter sur http://www.world-nuclear.org/info/inf06.html (avril 2012)