

Développement de l'énergie nucléaire

# **L'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable**

AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE  
ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

## **ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES**

En vertu de l'article 1<sup>er</sup> de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996) et la Corée (12 décembre 1996). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

### **L'AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE**

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1<sup>er</sup> février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays Membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 27 pays Membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

- d'aider ses pays Membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques ; et
- de fournir des évaluations faisant autorité et de dégager des convergences de vues sur des questions importantes qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales des politiques réalisées par l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable.

Les domaines de compétence de l'AEN comprennent la sûreté nucléaire et le régime des autorisations, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, les sciences nucléaires, les aspects économiques et technologiques du cycle du combustible, le droit et la responsabilité nucléaires et l'information du public. La Banque de données de l'AEN procure aux pays participants des services scientifiques concernant les données nucléaires et les programmes de calcul.

Pour ces activités, ainsi que pour d'autres travaux connexes, l'AEN collabore étroitement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne, avec laquelle un Accord de coopération est en vigueur, ainsi qu'avec d'autres organisations internationales opérant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

#### **© OCDE 2000**

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France. Tél. (33-1) 44 07 47 70. Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

## **AVANT-PROPOS**

Cet ouvrage vise à aider les pouvoirs publics à évaluer dans quelle mesure l'énergie nucléaire est compatible avec les objectifs du développement durable et comment elle peut contribuer à mieux les atteindre. Il examine les caractéristiques spécifiques de l'énergie nucléaire au regard des trois dimensions – économique, environnementale et sociale – du développement durable en mettant l'accent sur les questions les plus pertinentes pour les décideurs.

Il ne préjuge pas des politiques des pays Membres en matière d'énergie nucléaire. Il fournit des données et des analyses sur l'option nucléaire que les décideurs des politiques pourront utiliser avec des informations sur les autres sources d'énergie pour appuyer leurs propres évaluations, arbitrages et choix dans le domaine énergétique, en tenant compte du contexte et des priorités nationales.

Cet ouvrage est une contribution de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) au projet de l'OCDE sur le développement durable. Il a été préparé par le Secrétariat de l'AEN assisté par des experts dans le domaine de la politique nucléaire, de l'économie, de l'environnement et du développement durable. Le texte a bénéficié des commentaires et suggestions des comités techniques permanents de l'AEN et d'experts d'autres Directions de l'OCDE ainsi que de l'Agence internationale de l'énergie. Il est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>Avant-propos</b> .....	3
<b>Résumé</b> .....	7
<b>1. Introduction</b> .....	13
Le projet de l'OCDE .....	13
Destinataires, objectifs et portée de ce document.....	14
Énergie et développement durable .....	15
<b>2. Les concepts du développement durable</b> .....	19
Les actifs.....	19
Risque et incertitude .....	20
Équité et participation.....	20
Ressources naturelles.....	21
<i>Ressources non renouvelables</i> .....	22
<i>Ressources renouvelables</i> .....	22
Recherche, développement et innovation .....	23
Évaluation et comparaison – Recherche d'indicateurs.....	24
Les valeurs dans le temps – Le taux d'actualisation .....	26
Instruments d'action et instruments économiques.....	26
Changement climatique .....	28
<b>3. Développement durable et énergie nucléaire</b> .....	31
Indicateurs .....	31
Dimension économique .....	33
<i>Concurrence</i> .....	33
<i>Subventions</i> .....	36
<i>Coûts et avantages externes</i> .....	37
Dimension environnementale .....	39
<i>Gestion des ressources naturelles</i> .....	40
<i>Radioprotection</i> .....	41
<i>Sûreté</i> .....	43
<i>Responsabilité civile</i> .....	45
<i>Gestion des déchets radioactifs</i> .....	47

Dimension sociale .....	49
<i>Capital humain</i> .....	50
<i>Cadre institutionnel</i> .....	50
<i>Non-prolifération</i> .....	51
<i>Participation du public et aspects politiques</i> .....	53
<i>Coopération internationale</i> .....	55
<b>4. Principaux problèmes et rôle des gouvernements</b> .....	<b>57</b>
Annexe 1 : Cycle du combustible nucléaire d'un réacteur à eau ordinaire .....	61
<b>Références</b> .....	<b>63</b>

## RÉSUMÉ

Ce document est la contribution de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) au projet de l'OCDE sur le développement durable. Il contient des informations sur l'énergie nucléaire utiles pour définir des politiques de développement durable. Dans ce cadre, on examine les caractéristiques spécifiques de l'énergie nucléaire au regard des dimensions économiques, environnementales et sociales du développement durable. Ce rapport traite de l'énergie nucléaire, et fournit des données et des analyses sur l'option nucléaire que les décideurs pourront utiliser, conjointement avec des informations sur d'autres options, pour alimenter leur réflexion en fonction de leur contexte spécifique et de leurs priorités.

Le propos de ce document n'est pas de juger si l'énergie nucléaire peut être considérée comme une technologie durable dans des circonstances ou des pays donnés dans la mesure où la réponse dépend de tout un éventail de facteurs, pour la plupart propres aux situations locales. En outre, le document ne préjuge aucunement de la politique que chaque pays Membre entend mener dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Il s'agit plutôt de déterminer les principales incidences de l'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable, d'indiquer quelques uns des facteurs qu'il convient de prendre en considération pour apprécier le rôle qu'elle peut éventuellement jouer dans la réalisation des objectifs du développement durable et de souligner les obstacles qu'il faut vaincre pour lui permettre d'avoir une contribution positive. Les données et les analyses produites représentent les efforts de coopération du Secrétariat de l'AEN relayés par les comités techniques permanents concernés de l'AEN et par d'autres experts. Il convient de noter à cet égard que les résultats de l'analyse des caractéristiques de l'énergie nucléaire dans le cadre du développement durable peuvent varier considérablement en fonction de préférences et de circonstances spécifiques. C'est pourquoi certains éléments d'information contenus dans ce document n'appellent pas nécessairement les mêmes conclusions dans tous les pays Membres.

Le concept du développement durable est né à la fin des années 80, époque à laquelle il a été défini dans le rapport Brundtland comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Dans son sens le plus large, le développement durable recouvre l'équité entre citoyens d'un même pays, entre pays et entre générations et englobe en outre la croissance économique, la protection de l'environnement et le bien-être social. Les politiques de développement durable doivent relever un défi majeur, à savoir n'exclure aucune de ces trois dimensions, en mettant à profit leurs interactions et en procédant au besoin aux arbitrages indispensables.

Le développement durable a pour premier objectif de préserver ou d'accroître l'ensemble des actifs (qu'ils soient naturels, produits, humains ou sociaux) transmis aux générations futures. Le développement de l'énergie nucléaire permet d'élargir la base de ressources naturelles utilisables pour la production d'énergie et augmente les actifs humains et produits. Le cadre des mesures réglementaires, institutionnelles et techniques déjà en place dans les pays de l'OCDE doit permettre de s'assurer que l'utilisation de l'énergie nucléaire ne réduira pas sensiblement des actifs naturels

irremplaçables. Le maintien de ce cadre est indispensable pour répondre aux préoccupations sociales et environnementales. Si l'on réussit à trouver des solutions satisfaisantes à ces problèmes, l'industrie nucléaire, ainsi que les connaissances scientifiques et l'infrastructure institutionnelle sur lesquelles elle s'appuie peuvent constituer un capital pour les générations actuelles et futures.

La technologie est vitale au développement économique mais nécessite une surveillance et une maîtrise rigoureuses pour être compatibles avec les objectifs sociaux et environnementaux du développement durable. Dans le domaine énergétique, des services sont indispensables pour alimenter le développement économique et accroître le bien-être social, mais la production et la consommation d'énergie, quelle que soit la source ou la technologie utilisée, peuvent avoir des répercussions négatives sur la santé humaine et l'environnement. Il convient donc de réduire au minimum les charges environnementales et sociales si l'on veut atteindre les objectifs du développement durable.

La compétitivité économique est un préalable indispensable pour qu'une technologie puisse contribuer au développement durable. Pour évaluer la compétitivité, il convient, dans l'idéal, de comparer les coûts totaux supportés par la société, et notamment les coûts sociaux et environnementaux. La plupart des centrales nucléaires en service sont compétitives sur la base des critères actuels, y compris ceux des marchés de l'électricité déréglementés, car leurs coûts marginaux de production sont faibles comparés à ceux de leurs concurrentes thermiques. Considérée du point de vue du développement durable, leur compétitivité est solide dans la mesure où la plupart des coûts sanitaires et environnementaux de l'énergie nucléaire sont déjà internalisés. En effet, les consommateurs d'électricité paient pour la sûreté nucléaire et les assurances contre les accidents nucléaires, le démantèlement des installations nucléaires et le stockage des déchets radioactifs.

Les nouvelles tranches nucléaires devront concurrencer un large éventail d'autres options, dont les combustibles fossiles, les énergies renouvelables et la gestion de la demande, sur la base de la totalité des coûts de production : à savoir les coûts du capital, de l'exploitation, de la maintenance et des combustibles. Les énormes investissements que nécessitent les centrales nucléaires engendrent des risques financiers, surtout sur des marchés déréglementés et rendent leur compétitivité extrêmement sensible au taux d'actualisation appliqué lorsque l'on choisit les investissements. Les efforts de R&D actuellement déployés pour abaisser les coûts en capital des centrales nucléaires doivent être poursuivis si l'on veut obtenir des résultats intéressants. Des taux d'actualisation faibles qui sont plus favorables à des projets exigeant d'énormes capitaux, comme les installations nucléaires, reflètent une préférence pour un avenir compatible avec les objectifs du développement durable. En outre, la compétitivité future de l'énergie nucléaire dépendra des valeurs attribuées dans chaque pays à des ressources environnementales, comme le climat mondial et la qualité de l'air, et à des objectifs sociaux, comme la diversité et la sécurité de l'approvisionnement en énergie. Toutefois, les choix technologiques dans le secteur énergétique seront conditionnés par la concurrence sur le marché et il reviendra aux gouvernements par leur action de prendre en compte l'intérêt de diverses sources d'énergie pour le développement durable.

L'énergie nucléaire possède une vaste base de ressources. Les réserves actuelles sont suffisamment importantes pour assurer la production de combustible nucléaire pendant encore des décennies. Étant donné que le coût du combustible nucléaire ne représente qu'une faible partie du coût de l'électricité nucléaire, une hausse des prix pourrait se traduire par une augmentation considérable des ressources disponibles sans porter atteinte à la compétitivité de l'énergie nucléaire. En outre, la base de ressources de l'énergie nucléaire pourrait être élargie en recyclant des matières fissiles et en mettant en œuvre des cycles du combustible avancé permettant de convertir l'uranium et le thorium fertiles en matières fissiles. En élargissant la base de ressources naturelles, l'énergie nucléaire répond aux objectifs de développement durable : création et exploitation efficace des actifs naturels et leur préservation pour les générations futures.

Trouver des politiques permettant efficacement de contrer le changement climatique fait partie des défis à relever pour assurer un développement durable. L'énergie nucléaire ne produit pas de carbone et contribue à réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre qui sont responsables du réchauffement climatique de la planète ainsi que de la pollution atmosphérique au niveau local. Même si l'on a le choix entre plusieurs solutions techniques et mesures gouvernementales pour atténuer les risques d'un changement climatique planétaire, la stabilisation de la teneur en dioxyde de carbone de l'air nécessitera probablement des politiques d'envergure mettant à contribution tout un éventail de technologies et d'instruments économiques et réglementaires. L'intégration de l'option nucléaire dans l'ensemble des outils destinés à régler les problèmes du changement climatique est donc conforme aux principes de précaution et aux objectifs de développement durable.

À en juger par le bilan de plusieurs décennies d'exploitation commerciale de l'énergie nucléaire dans les pays Membres de l'OCDE, les centrales nucléaires et les installations du cycle du combustible dans les conditions normales de fonctionnement sous le contrôle d'un appareil réglementaire efficace et indépendant ont eu des incidences sanitaires et environnementales relativement minimales. Les régimes de radioprotection basés sur le principe du niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (ALARA) ont généralement permis de limiter efficacement la radio-exposition du personnel travaillant dans les installations nucléaires et de la population dans son ensemble à des niveaux inférieurs aux limites réglementaires qui elles-mêmes sont définies avec prudence.

Les rejets radioactifs des installations nucléaires sont extrêmement faibles dans les conditions normales d'exploitation, les travailleurs et les membres du public ne courant un risque important qu'en cas d'accident. Un accident grave est une préoccupation majeure dont la prise en compte a donné lieu à l'adoption d'une réglementation sur la sûreté nucléaire et des mesures spécifiques. Les objectifs de sûreté nucléaire définis sur la base du principe de précaution ont été renforcés progressivement et les enseignements tirés des deux accidents graves qui se sont produits dans des réacteurs nucléaires, à savoir Three Mile Island en 1979 et Tchernobyl en 1986, ont permis de procéder à des améliorations importantes. Les progrès technologiques, la qualification et la formation de la main-d'œuvre, les mesures de gestion des accidents et une efficacité réglementaire renforcée ont permis de réduire les risques et les probabilités d'accidents nucléaires.

Les déchets radioactifs produits par le secteur nucléaire ne représentent que de faibles volumes qui peuvent être isolés de la biosphère à des coûts raisonnables mais suscitent d'importantes craintes dans le public. Dans de nombreux pays, des dépôts aménagés pour stocker des déchets radioactifs à vie courte sont en service. Pour les déchets radioactifs à vie longue, l'industrie nucléaire s'est déjà fixé pour objectif de les confiner en toute sécurité pendant les très longues périodes où ils peuvent présenter un danger. Cette tâche ambitieuse qui est conforme à l'objectif de développement durable est selon les experts techniquement et économiquement réalisable. Il existe des installations permettant d'entreposer provisoirement en toute sécurité les déchets pour plusieurs décennies. À plus long terme, plusieurs options peuvent être envisagées sachant que le stockage dans des formations géologiques est une stratégie qui selon plusieurs pays de l'OCDE devrait pouvoir satisfaire des préoccupations éthiques et environnementales fondamentales. L'aménagement de dépôts selon des modalités examinées avec le public et qu'il accepte permettra de franchir une étape déterminante sur la voie du développement durable.

Le risque de prolifération des armes nucléaires est un problème essentiel évoqué en relation avec les applications pacifiques de l'énergie nucléaire, bien que le régime international de garanties et de non-prolifération se soit révélé très efficace jusqu'à présent. En outre, étant donné que la prolifération des armes nucléaires est avant tout le résultat d'incitations et de craintes politiques, c'est par des moyens également politiques qu'il faut la combattre. Il convient de signaler que la plupart des pays qui choisissent d'acquiescer des armes nucléaires le font par le biais de structures militaires spécialisées,

souvent clandestines, et non en détournant des matières provenant de programmes nucléaires civils qui sont pour la plupart soumis au régime des garanties internationales. Il n'en demeure pas moins que le détournement est un moyen possible d'acquérir des matières fissiles, c'est-à-dire de franchir une étape technique déterminante pour la construction des armes. De ce fait, il faut que le régime de non-prolifération soit étendu de façon à rendre extrêmement probable la détection, et partant la dissuasion de ce type de détournement. Ceci est d'autant plus important que des programmes électronucléaires sont entrepris dans de nouvelles régions et de nouveaux pays.

L'énergie nucléaire repose sur des progrès scientifiques majeurs du XX<sup>e</sup> siècle qui complètent le stock d'actifs produits, humains et sociaux dont disposeront les générations futures. Etant donné qu'une grande partie du coût des installations nucléaires est imputable aux recherches scientifiques et technologiques et non aux ressources, les performances et la sûreté de ces installations peuvent être sans cesse améliorées par le biais de travaux de recherche et développement et des progrès des technologies de l'information, et d'une formation efficace. Les connaissances scientifiques et techniques, l'expérience industrielle ainsi que les institutions et le cadre réglementaire qui assurent la qualité de la conception, de l'exploitation et de la réglementation des activités nucléaires, représente des actifs humains et sociaux précieux. Dans les pays où l'énergie nucléaire est utilisée, elle offre des emplois hautement qualifiés et augmente la diversité et la sécurité de l'approvisionnement en énergie.

Répondre aux préoccupations du public est essentiel si l'on veut atteindre les objectifs sociaux du développement durable. À cette fin, et compte tenu de la crainte que suscitent une grande partie de la population les risques nucléaires, il est impératif de faire participer le public à un processus démocratique de décision lui permettant ainsi de se convaincre que ses points de vue et ses craintes ont été entendus. La mise en œuvre de projets nucléaires requiert la participation du public tant au niveau national que local et l'échange de tout un éventail d'informations et d'idées sur des aspects scientifiques, techniques, économiques et sociaux. Il faut que le public soit en mesure de comparer les aspects sociaux, éthiques et politiques de l'énergie nucléaire aux problèmes posés par d'autres sources d'énergie, et notamment les diverses charges transmises aux générations futures, comme les déchets à vie longue, le changement climatique et l'épuisement des ressources. Il revient aux gouvernements de créer les conditions d'un processus de décision compatible avec l'équité intergénérationnelle et les objectifs sociaux et environnementaux du développement durable.

Les centrales nucléaires produisent près du quart de l'électricité consommée dans les pays Membres de l'OCDE et sont arrivées, après plusieurs décennies d'expérience, à la maturité commerciale. Quelque 350 tranches nucléaires sont connectées au réseau dans les pays de l'OCDE, et sur ce nombre, la plupart resteront en service plus de 10 ans encore. À moyen terme, la demande d'énergie et d'électricité s'accroîtra principalement dans les pays non-membres où ces projets nucléaires verront aussi de plus en plus le jour. Les gouvernements des pays de l'OCDE auront un rôle important à jouer sous forme de transfert des technologies, d'assistance et de coopération techniques dans le domaine nucléaire, afin de garantir la prise en compte des objectifs du développement durable.

Les politiques de développement durable dans le secteur de l'énergie s'appuieront sur l'évaluation comparative de diverses options compte tenu de leurs incidences économiques, sanitaires, environnementales et sociales au niveau local, régional et mondial. Alors que l'AEN peut aider les pays Membres grâce à ses travaux systématiques et approfondis sur les indicateurs applicables à l'énergie nucléaire sous l'angle du développement durable, des travaux horizontaux plus généraux devront être menés au sein de l'OCDE pour élaborer un cadre général d'évaluation et de comparaison des diverses options énergétiques. Ces travaux pourraient fournir des orientations sur une internalisation cohérente des coûts externes permettant aux mécanismes du marché d'être compatibles avec le développement durable.

Les décisions de politique nationale sont le fruit d'arbitrages à l'intérieur de chacune des dimensions du développement durable ainsi qu'entre ces dimensions. Ces compromis sont fondés sur des données factuelles mais reflètent des conditions socio-économiques et politiques spécifiques à chaque pays. Le contexte énergétique général, l'attention prêtée à l'environnement, les évolutions culturelle et historique ainsi que les attitudes politiques, qui sont différents d'un pays à l'autre, auront une incidence sur les arbitrages réalisés et les décisions adoptées.



## 1. INTRODUCTION

Ce document est la contribution de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) au projet triennal de l'OCDE sur le développement durable. Il fait partie des rapports de fond qui seront publiés dans le cadre de ce projet, et, comme tel, il a essentiellement pour objectif de déterminer dans quelle mesure l'énergie nucléaire est compatible avec les objectifs de développement durable et comment elle peut au mieux y contribuer et, en outre, de recenser les problèmes que l'énergie nucléaire doit surmonter pour concourir plus efficacement à ce développement. Ce document a pour objet de soulever les questions pertinentes en vue de faciliter la réflexion sur l'énergie nucléaire dans le cadre général de la définition des politiques et de permettre d'établir les liens entre l'énergie nucléaire et le développement durable.

Ce chapitre est consacré à la présentation du rapport et examine la situation de l'énergie nucléaire par rapport à la capacité de production d'électricité et d'énergie, et de sa croissance, dans le monde aujourd'hui. Le chapitre 2 décrit brièvement le cadre et les concepts fondamentaux du développement durable qui font l'objet d'un examen plus détaillé dans le rapport analytique de l'OCDE. Le chapitre 3 expose les traits caractéristiques de l'énergie nucléaire et ses liens avec les objectifs du développement durable sur le plan économique, environnemental et social. Le chapitre 4 fait le point des principaux problèmes et enseignements.

### **Le projet de l'OCDE**

Le projet horizontal triennal sur le développement durable a été lancé, en avril 1998, par les ministres des pays de l'OCDE qui ont demandé à l'Organisation de définir sa stratégie « dans les domaines du changement climatique, de la technologie, des indicateurs de durabilité et de l'incidence des subventions sur l'environnement ». En outre, ils ont invité l'OCDE à « approfondir son dialogue avec les pays non-membres dans ces domaines et à les faire participer plus activement » [1]. Ce projet permet d'aborder des problèmes de politique intéressant les gouvernements des pays Membres dans un cadre intégré et notamment leur interaction avec l'industrie et les pays non membres. Il devrait aboutir à l'élaboration de nombreux produits pour la réunion du Conseil de l'OCDE au niveau des ministres de 2001. Parmi ces produits, citons le rapport d'orientation à l'intention des ministres, un rapport analytique et une série de rapports de fond, comme celui-ci, qui sont le fruit des travaux de diverses directions et organes autonomes de l'OCDE.

Ce projet de l'OCDE vise à rendre le concept de développement durable applicable dans les politiques gouvernementales et devrait aider les pays Membres à régler des questions fondamentales du développement durable [2]. Le cadre du développement durable mentionné dans le projet de l'OCDE permettra en intégrant les facteurs économiques, sociaux et environnementaux de répondre aux préoccupations de la société au coût le plus faible et fera ressortir les liens et les arbitrages entre ces différents domaines. Ce cadre reflète, en outre, le besoin d'équité à l'échelle nationale et internationale de même qu'intergénérationnelle.

Dans cette optique, l'accent habituellement mis par l'OCDE et les pays Membres sur la croissance économique devra être mis à parité avec les préoccupations environnementales et sociales. Le projet de l'OCDE fait ressortir la nécessité de procéder à une intégration horizontale des politiques dans tout un ensemble de secteurs et de disciplines. Il examinera le rôle fondamental des services énergétiques dans le développement social et économique et l'intégration des préoccupations sanitaires et environnementales dans les stratégies d'approvisionnement en énergie permettant d'atteindre les objectifs de développement durable. Comme nous l'avons déjà souligné précédemment, ce document est la contribution de l'AEN à cet effort.

### **Destinataires, objectifs et portée de ce document**

Ce document est avant tout écrit à l'intention des responsables des politiques au sein de l'OCDE et des gouvernements des pays Membres. Les gouvernements conservent leur mission essentielle de définition des politiques générales, d'élaboration de la réglementation sanitaire et environnementale et d'examen des incidences à long terme des décisions et des mesures adoptées à présent, même si leur rôle s'amenuise progressivement dans un monde qui s'en remet de plus en plus aux forces du marché. Ce document intéressera également tous ceux qui prennent des décisions relatives au nucléaire, à l'énergie et à l'environnement, ainsi qu'aux personnes intéressées et concernées du public dans son ensemble. Afin que les lecteurs, y compris ceux d'entre eux qui ne sont pas spécialisés dans les questions d'énergie nucléaire ou peu familiarisés avec les concepts du développement durable, puissent disposer d'un document qui se suffit à lui-même, tout un ensemble d'informations sont données en insistant sur les politiques mais en abordant également les aspects techniques et économiques, si nécessaire.

Il s'agit dans ce document d'examiner l'énergie nucléaire à la lumière des objectifs du développement durable. Il sera avant tout utile aux gouvernements qui souhaitent réfléchir à la place à donner au nucléaire parmi l'ensemble des options dont ils disposent pour assurer l'approvisionnement en énergie de leur pays dans l'avenir. En revanche, d'autres pays Membres peuvent trouver de l'intérêt à ce document dans la mesure où les questions nucléaires ont de nombreuses incidences internationales et transfrontières.

Le propos de ce document n'est pas de juger si l'énergie nucléaire peut être considérée comme une technologie durable dans des circonstances ou des pays donnés dans la mesure où la réponse dépend de tout un éventail de facteurs, pour la plupart propres aux situations locales. En outre, le document ne préjuge aucunement de la politique que chaque pays Membre entend mener dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Il s'agit plutôt de déterminer les principales incidences de l'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable, d'indiquer quelques uns des facteurs qu'il convient de prendre en considération pour apprécier le rôle qu'elle peut éventuellement jouer dans la réalisation des objectifs du développement durable et de souligner les obstacles qu'il convient de vaincre pour lui permettre d'avoir une contribution positive. Les données et les analyses produites représentent les efforts de coopération du Secrétariat de l'AEN relayés par les comités techniques permanents concernés de l'AEN et par d'autres experts. Il convient de noter à cet égard que les résultats de l'analyse des caractéristiques de l'énergie nucléaire dans le cadre du développement durable peuvent varier considérablement en fonction de préférences et de circonstances spécifiques. C'est pourquoi certains éléments d'information contenus dans ce document n'appellent pas nécessairement les mêmes conclusions dans tous les pays Membres.

Les concepts du développement durable qui sont décrits dans ce document sont destinés à refléter l'approche de l'OCDE. Ils sont basés essentiellement sur les publications de l'OCDE, les travaux en cours et les contributions des directions de l'Organisation et de ses organes autonomes, qui sont le fruit des débats et des commentaires suscités par les différentes versions successives du rapport. D'autres publications et avis d'experts faisant autorité ont été utilisés en complément des documents de l'OCDE. La description de ces concepts sert de toile de fond à l'évaluation des principales caractéristiques de l'énergie nucléaire en fonction des objectifs et critères du développement durable sur les plans économiques, environnementaux et sociaux.

Tous les principaux aspects de l'énergie nucléaire et leurs liens avec le développement durable sont examinés ne serait-ce que brièvement. L'analyse de l'énergie nucléaire, en elle-même, s'appuie essentiellement sur des travaux réalisés au sein de l'AEN même si d'autres sources ont aussi été utilisées, le cas échéant. Les sources d'information employées dans le document sont citées soit dans les références ou dans la bibliographie. Cette analyse n'est pas le fruit de recherche originale mais d'informations disponibles et de contributions d'experts et de décideurs des pays Membres qui ont été consultés tout au long de la rédaction du rapport.

Des travaux actuellement consacrés aux indicateurs de développement durable pourraient bien aboutir à l'élaboration d'indicateurs agrégés applicables à toutes les activités et secteurs industriels. Plusieurs organisations, dont l'OCDE, participent activement à la préparation d'un cadre et d'indicateurs harmonisés qui pourraient servir aux analyses et aux évaluations dans divers secteurs. L'évaluation de l'énergie nucléaire sous l'égide du développement durable devra à terme être basée sur une série d'indicateurs applicables au secteur nucléaire qui auront été choisis dans un cadre d'ensemble harmonisé. En attendant, des indicateurs spécifiques au secteur nucléaire ont été employés dans ce document pour illustrer dans la mesure du possible l'évolution vers le développement durable.

Bien que, dans le cadre de la réflexion sur le développement durable, il soit nécessaire de comparer différents choix énergétiques, ce document ne se lance pas dans une évaluation comparative car l'AEN n'a pas les compétences voulues pour effectuer une analyse de l'ensemble des technologies et des politiques énergétiques. Si l'OCDE et l'AIE décidaient d'entreprendre ce type d'étude comparative des avantages, coûts, risques et incidences, l'AEN pourrait apporter son concours sur des questions nucléaires pertinentes, et ce document pourrait être une contribution préliminaire à un travail de ce genre.

## **Énergie et développement durable**

L'énergie a des liens avec les trois dimensions du développement durable : économique, environnementale et sociale. Les services énergétiques sont essentiels pour le développement économique et social. À mesure que la consommation d'énergie croîtra, ses incidences sur la santé et l'environnement devront être maîtrisées, limitées ou atténuées afin de parvenir aux objectifs du développement durable. Le principal enjeu pour le secteur énergétique, s'il veut contribuer à un développement durable, consistera à faire profiter des services énergétiques l'ensemble du monde ainsi que les générations futures sans pour autant porter atteinte aux systèmes nécessaires à la vie ou à la capacité de charge de l'environnement. Les techniques de production de l'énergie, comme le nucléaire, ont un rôle à jouer dans ce contexte.

L'énergie est le moteur, l'élément vital de la civilisation moderne. Les services énergétiques sont primordiaux pour le bien-être humain et contribuent au renforcement de la stabilité sociale grâce à l'augmentation du niveau de vie. L'énergie est cruciale pour le développement et la prospérité économiques. Bien que l'intensité énergétique des économies modernes diminue progressivement,

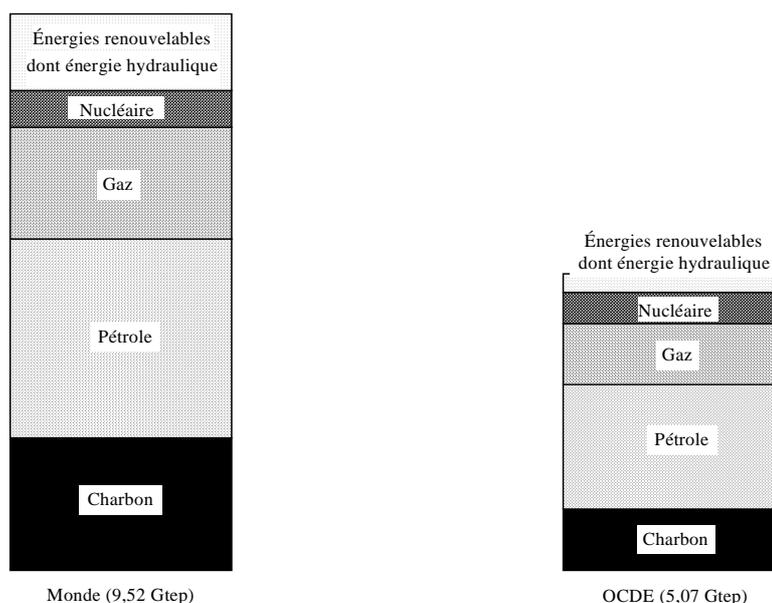
il faudra d'énormes quantités d'énergie pour améliorer les conditions de vie dans les pays en développement. Le secteur énergétique lui-même occupe une place importante dans l'économie mondiale en termes d'emploi, de revenu et d'échanges.

Les habitants des pays Membres de l'OCDE consomment l'essentiel de l'énergie. Plus de la moitié de l'énergie primaire et plus de 60 % de l'électricité produites dans le monde sont consommées dans les pays de l'OCDE [3]. Deux milliards d'hommes vivant dans les pays non-membres sont privés d'électricité et deux autres milliards ne peuvent s'offrir ni réfrigérateurs ni eau chaude [4,5].

Les combustibles fossiles sont de loin la source d'énergie la plus importante, puisqu'ils représentent à eux seuls 80 % de la consommation mondiale d'énergie primaire, comme il ressort de la figure 1.1, contre 7 % pour l'énergie nucléaire. En moyenne, chaque habitant de la planète utilise environ 1,3 tonne d'équivalent pétrole (tep) de combustibles fossiles chaque année pour un total de 7,6 milliards de tep. Dans les pays de l'OCDE, les parts respectives des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire sont de 83 et 11 %. La part des combustibles fossiles dans l'ensemble des énergies primaires devrait augmenter encore dans les prochaines décennies dans le cadre des scénarios « au fil de l'eau » [6].

Figure 1.1 **Consommation mondiale d'énergie primaire en 1997**

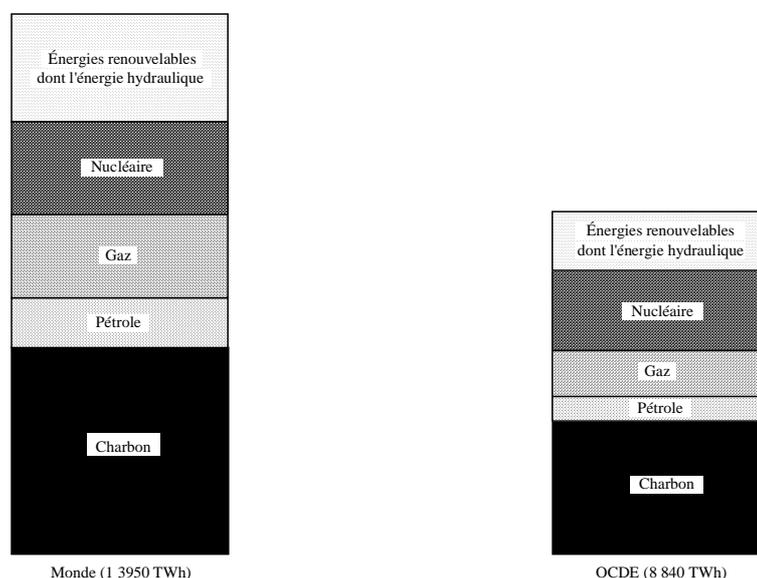
Source : AIE/OCDE. Bilans énergétiques des pays non-membres – Édition 1999 [7]



La production d'électricité représente quelque 37 % de la consommation totale d'énergie primaire dans le monde et 39 % dans les pays Membres de l'OCDE. La consommation moyenne d'électricité dans les pays de l'OCDE avoisine 7 500 kWh par habitant contre seulement 2 200 kWh par habitant au niveau de la planète et moins de 1 200 kWh dans les pays non-membres. Comme on peut le voir sur la figure 1.2, les combustibles fossiles fournissent environ 63 % de l'électricité produite dans le monde (dont 38 % pour le charbon, 16 % pour le gaz et 9 % pour le pétrole), l'énergie nucléaire 17 % et l'énergie hydraulique et les autres énergies renouvelables environ 18 %. Dans les pays de l'OCDE, la répartition n'est pas très différente même si la part du nucléaire est plus importante et celle des combustibles fossiles moindre.

Figure 1.2 **Production d'électricité dans le monde en 1997**

Source : AIE/OCDE. *Bilans énergétiques des pays non-membres – Édition 1999* [7]



Quelque 430 centrales nucléaires sont exploitées aujourd'hui dans le monde, représentant une puissance installée d'environ 350 GWe. Elles ont produit 2 400 TWh en 1999 (voir tableau 1.1). Dans la zone OCDE, 16 pays exploitent des centrales nucléaires. La part du nucléaire dans la production totale d'électricité varie dans les pays de l'OCDE de 4 à 75 % et avoisine en moyenne 25 %. La consommation de combustible nucléaire s'élève à quelque 50 000 tonnes d'uranium par an dans les pays de l'OCDE contre en gros 10 000 tonnes dans les pays non-membres.

Tableau 1.1 **Énergie nucléaire en 1998**

Source : AEN, *Données sur l'énergie nucléaire 2000* [8] et AIEA, *PRIS 2000* [9]

	Monde	OCDE
Nombre de pays produisant de l'électricité d'origine nucléaire	31	16
Nombre de tranches nucléaires en service	434	348
Puissance nucléaire installée (GWe)	349	296
Production d'électricité nucléaire (TWh)	2 401	2 075
Part du nucléaire dans la production d'électricité (%)	17	24
Besoins d'uranium (tonnes)	60 000	50 000
Production de combustible usé (tonnes)	9 600	8 260
Émissions de gaz carbonique évitées (Mtonnes CO <sub>2</sub> )	1 920	1 660
(part des émissions de 1990)	9%	10%

\*Calculées en supposant que les émissions correspondant à la production d'1 kWh avec des combustibles fossiles représentent 800 g de CO<sub>2</sub>.

Dans les pays de l'OCDE, la stabilité démographique, les gains d'efficacité et l'évolution progressive vers des économies consommant moins d'énergie devraient contribuer à freiner la croissance de la demande d'énergie. Dans les cinquante prochaines années, environ, la demande d'énergie croîtra principalement dans les pays non-membres. Partant d'un chiffre plus faible et alimentée par la croissance démographique et économique, la demande d'énergie augmentera rapidement dans ces pays, se

traduisant par un accroissement continu de la consommation totale d'énergie primaire dans le monde [10].

Même si l'utilisation de l'électricité bénéficie de gains d'efficience, il est probable que la demande d'électricité croîtra énormément durant les vingt prochaines années, à des rythmes d'environ 3 % par an dans le monde et de 5 %, si ce n'est plus, dans les pays en développement selon les projections du scénario au fil de l'eau [6]. Il s'ensuit qu'en 2020, il faudra que la capacité mondiale de production, qui avoisine actuellement 3 000 GWe, ait doublé sans compter le remplacement d'environ 600 GWe d'installations obsolètes. La croissance se situera pour la plus grande partie dans les pays en développement. Dans le scénario au fil de l'eau, la part de la consommation d'énergie primaire, d'électricité et d'énergie nucléaire des pays de l'OCDE tombera à 42 %, 46 % et 72 % respectivement d'ici 2020.

La production et la consommation d'énergie ont un impact important sur la santé et l'environnement. L'énergie implique des flux considérables de matières et nécessite des infrastructures de grande envergure pour l'extraire, la traiter, la stocker, la transporter et l'utiliser ainsi que pour prendre en charge les déchets. Beaucoup de grands cours d'eau dans le monde sont dotés de barrages ou de dérivations pour la production d'hydroélectricité. Parallèlement aux sources d'énergie commerciales, de gros volumes de bois non marchand et d'autres formes de biomasse sont brûlés pour satisfaire des besoins d'énergie, en particulier dans les pays non membres de l'OCDE. Les émissions de particules et de gaz acides provenant de la combustion des combustibles fossiles détériorent la qualité de l'air au niveau local et régional. Certaines substances radioactives ont des durées d'activité très longues à l'instar d'autres substances dangereuses, naturelles et produites. À l'échelle de la planète, le risque d'un changement climatique important, surtout provoqué par les émissions de gaz à effet de serre provenant de la combustion des combustibles fossiles, essentiellement du gaz carbonique, constitue une menace pour le développement durable et l'avenir de la civilisation humaine.

Les moyens de production de l'énergie déterminent en grande partie l'impact sur la santé et l'environnement du secteur. L'efficacité et la qualité des formes d'énergie sont des facteurs importants de leur croissance. La part de la production d'électricité dans la consommation mondiale croissante d'énergie primaire devrait augmenter. Sa commodité, flexibilité et propreté au point de consommation ainsi que son rôle dans l'économie d'information sont autant de caractéristiques qui la rende attrayante et garantissent la progression future de sa demande. La diversité des sources d'énergie pouvant être utilisées pour la produire multiplie les options aux incidences différentes sur le développement durable. Ainsi, le tableau 1.1. montre clairement que l'énergie nucléaire permet d'éviter les émissions de gaz carbonique.

Si l'on veut assurer à l'ensemble de la population mondiale un niveau de vie suffisant, il semble raisonnable d'inclure dans les objectifs du développement durable une croissance importante de la demande mondiale d'électricité. Cette croissance interviendra essentiellement en dehors de la zone OCDE. L'infrastructure énergétique qui devra être mise en place dans les pays non membres dans les vingt prochaines années, durant lesquelles on attend une croissance rapide, déterminera en grande partie la durabilité de l'offre et de la consommation d'énergie dans le monde au-delà de cette période. Les pays de l'OCDE joueront un rôle important à cet égard en tant que source d'une grande partie de la technologie et du financement nécessaires. Ces deux groupes de pays bénéficieront de la coopération dans des domaines du développement institutionnel, comme les politiques, la réglementation et le recours aux instruments économiques, principalement en matière de développement durable.

## 2. LES CONCEPTS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le développement durable est défini dans le rapport Brundtland comme étant « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » [11]. Il est souligné dans ce rapport que la définition du développement durable repose sur deux concepts principaux : d'une part, le concept de « besoins », « plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité », et d'autre part « l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose à la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir »

La définition des besoins est dynamique. En effet, elle varie avec le temps et en fonction des différents groupes et cultures concernés. Certains de nos ancêtres auraient été surpris de voir ce que l'homme, avec ses revenus accrus, juge nécessaire aujourd'hui et, dans le même temps, déçus que les besoins fondamentaux de beaucoup d'hommes ne sont pas satisfaits. Néanmoins, la génération actuelle se doit de transmettre toute une série d'options aux générations futures pour les aider à satisfaire leurs besoins, surtout les plus fondamentaux d'entre eux.

Le développement durable, en fait, correspond plus à l'itinéraire d'un voyage qu'à une destination. L'objectif immédiat est de prendre les dispositions qui conviennent pour élargir l'éventail des options disponibles plutôt que d'en supprimer ne serait-ce qu'une. Tout au long de cette route, il conviendra de procéder à d'autres choix et arbitrages.

### Les actifs

On peut utilement préciser la notion de développement durable en expliquant qu'il s'agit d'assurer pour chaque habitant le maintien au même niveau du bien-être. Il suffit de s'imaginer la transmission de la capacité aux générations futures sous forme d'un stock d'actifs – produits, naturels, humains et sociaux. Les actifs produits incluent les bâtiments, les équipements et l'infrastructure sous forme de routes, ports et aéroports, systèmes d'adduction d'eau, oléoducs, réseaux de transport d'électricité. Les actifs naturels comprennent les ressources renouvelables et non renouvelables ainsi que l'environnement. Parmi les actifs humains et sociaux, citons l'enseignement, la santé, le savoir, les connaissances scientifiques, la technologie, la culture et le comportement humain, la capacité de création et d'innovation, la capacité de stocker et de communiquer les connaissances, les institutions et les réseaux sociaux.

On peut entièrement consommer les actifs d'une catégorie mais transmettre davantage d'actifs d'un autre type à condition qu'ils soient pleinement interchangeables. Cette possibilité de substitution et d'arbitrage entre catégories d'actifs correspond à la notion de « durabilité faible ». Dans le cadre de ce concept, certaines charges environnementales peuvent être transmises, ou des actifs utilisés, du moment que cet héritage négatif est compensé par la transmission de richesse et de capacités suffisantes pour pouvoir l'assumer. Dans le passé, les êtres humains ont utilisé ou transformé certains actifs naturels, par exemple en convertissant des forêts et des herbages en terres agricoles ou des minerais et de l'énergie en actifs produits. Ce faisant, ils ont étoffé le stock de connaissances et fait

progresser la science et la technologie ainsi que les arts et la vie civique donnant ainsi à l'homme des possibilités d'épanouissement inconcevables, ne serait-ce qu'il y a cent ans. Globalement, les pays de l'OCDE ont vu leur richesse et leur population grandir, et, dans le même temps, ont connu une forte augmentation du bien-être et un élargissement sensible de l'éventail d'options offert aux individus et aux sociétés. La plupart des pays non-membres ont aussi vu leur bien-être progresser nettement au cours des dernières décennies, et bon nombre d'entre eux connaissent actuellement une croissance et une mutation sociale sans précédent ; mais comme ils ont démarré plus tard et à partir d'une base plus faible, ils connaissent encore de nombreux problèmes.

Ces croissances démographique et économique peuvent-elle se poursuivre indéfiniment ou bien y a-t-il une limite au-delà de laquelle les pertes de capital environnemental commencent à réduire, peut-être radicalement, le stock total des actifs transmis ? L'air propre et l'eau sont rares dans de nombreuses parties du monde. Les concentrations plus fortes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère peuvent entraîner des changements irréversibles du climat. La biodiversité et l'habitat de nombreuses espèces sont menacés. Conformément au concept connu sous le nom de « durabilité forte » on reconnaît que certaines aménités environnementales peuvent être essentielles et irremplaçables, que leur perte peut être définitive et qu'il n'existe aucun substitut ou compensation possible. Ce concept implique que l'on limite l'utilisation ou la dégradation des ressources environnementales pour éviter de porter atteinte à des systèmes fondamentaux nécessaires à la vie. Il exige une préservation des systèmes écologiques cruciaux et la protection de l'air, de l'eau et d'autres biens environnementaux qui sont essentiels à la vie humaine et ne peuvent être remplacés.

### **Risque et incertitude**

Le développement durable exige que l'on prenne des décisions et des mesures recouvrant un large éventail d'activités humaines, caractérisées chacune par ses risques et incertitudes, qui de plus gagnent en ampleur à mesure que l'on se projette plus loin dans l'avenir. Les méthodes d'évaluation et de gestion des risques seront des outils essentiels pour les décideurs désireux d'atténuer les effets négatifs, éviter les catastrophes, préserver les systèmes nécessaires à la vie et maintenir ou accroître l'ensemble du stock de capital.

Les investissements dans la recherche et le développement peuvent contribuer à réduire les incertitudes en améliorant notre compréhension des systèmes naturels et produits par l'homme. Préserver un grand nombre d'options diverses, dans le secteur énergétique et ailleurs, peut aider à éviter des perturbations quand l'une d'entre elles vient à manquer. Les innovations au niveau des produits et des processus peuvent contribuer à franchir des étapes sur la voie du développement durable. À ce jour, les innovations ont généralement bien servi l'humanité mais leurs répercussions sont parfois devenues si importantes que leurs futurs bénéfices globaux sont difficiles à évaluer. Certaines innovations peuvent se révéler des expérimentations indéfinies avec la biosphère. S'agissant des progrès susceptibles d'avoir d'énormes conséquences irréversibles, quoiqu'incertaines, il semblerait prudent de prendre quelques mesures préventives de mitigation. C'est là l'essence même du principe de précaution qui veut que l'on n'attende pas d'être scientifiquement sûr de la matérialisation d'un risque majeur pour adopter des mesures destinées à prévenir ou atténuer ce risque.

### **Équité et participation**

L'équité est un objectif essentiel du développement durable. Une société qui respecte les principes du développement durable requiert plus d'équité que celle qui règne dans le monde actuel [12]. Dans le monde entier, les gens aspirent à des niveaux de vie qui leur permettent au moins

de satisfaire leurs besoins fondamentaux. Le désir de prendre soin des générations futures et de l'environnement où vit l'humanité implique d'avoir le même souci des gens vivant actuellement. Il faut donc s'efforcer d'instaurer l'équité non seulement dans les pays de l'OCDE, mais entre pays Membres et pays non-membres si l'on veut réaliser les objectifs du développement durable.

Les pays Membres de l'OCDE, dont la population avoisine 1 milliard d'habitants, c'est-à-dire moins de 20 % de la population mondiale, possèdent 80 % des richesses. Dans les prochaines décennies, la quasi-totalité de la croissance démographique et une grande partie de la croissance économique interviendront dans les pays non-membres avec un impact croissant sur les possibilités de développement durable dans le monde. Or, les pays de l'OCDE possèdent certaines des ressources indispensables pour régler ces problèmes de croissance : crédits, sciences et techniques, connaissances et savoir-faire, institutions. De ce fait, les pays Membres de l'OCDE s'intéresseront de plus en plus aux décisions prises par les pays non-membres, non seulement pour leur propre bien mais aussi par devoir vis-à-vis de l'ensemble de la planète [13]. Il est donc important de mettre en place une coopération étroite entre les pays Membres de l'OCDE et les pays non-membres afin que des transferts importants de ressources permettent de parvenir à une plus grande équité et que, grâce aux efforts communs, les objectifs de santé et d'environnement puissent être atteints. Le transfert de l'expertise institutionnelle, d'une réglementation efficace par exemple, sera un facteur important.

Le concept du développement durable a un profond retentissement dans la mesure où il fait partager une vision commune à des gens dont les points de vue diffèrent énormément. Le développement durable implique que l'on accorde la même importance aux dimensions quantitative et qualitative de la croissance et, de ce fait, tient compte des préoccupations des défenseurs du développement économique, du bien-être social et de la protection de l'environnement, sans exclusive. Les liens entre ces trois dimensions du développement durable peuvent créer des synergies et favoriser l'adoption de mesures qui ne présentent que des avantages. Néanmoins, il sera difficile de réaliser tous les objectifs du développement durable en même temps : prendre soin des générations actuelles, de l'environnement et des générations futures demandera des arbitrages entre des objectifs contradictoires.

La dimension sociale du développement durable nécessite non seulement une cohésion sociale mais également des actions de coopération à tous les échelons de l'organisation sociale, du niveau local au niveau mondial. Sur le plan politique, ce ne sera pas facile. Même si certaines initiatives sont susceptibles de procurer des avantages nets à toutes les parties, d'autres, en revanche, exigeront que certains se sacrifient pour le bien des autres. En outre, les problèmes du développement durable, qui se posent à l'échelle de la planète entière et qui s'inscrivent dans une perspective à long terme, risquent de ne pas véritablement inciter à prendre sans délai des actions au niveau local. Avant de mettre en péril leur bien-être immédiat, la plupart des gens voudront être sûrs que les transferts nécessaires sont équitables, qu'ils contribuent réellement aux objectifs globaux et que, dans l'idéal, ils se traduiront par quelques avantages en retour. Pour que des individus et des groupes se décident à faire les choix souvent difficiles qui sont indispensables, il faudra qu'ils comprennent bien en quoi leurs décisions pourront influencer non seulement sur les objectifs à long terme du développement durable, mais aussi sur l'évolution à court terme dans leurs collectivités locales. De ce fait, l'éducation et la participation seront déterminantes pour assurer le succès des politiques de développement durable.

## **Ressources naturelles**

Les ressources naturelles sont un capital essentiel pour le développement durable et prennent des formes extrêmement variées : air et eau propres, minerais et énergie, terres agricoles, paysages et nature sauvage dans toutes leurs diversités. Même si le monde naturel peut avoir des valeurs de non-usage,

les entités naturelles ne deviennent généralement des ressources économiques que lorsqu'il y a une demande, elle-même suscitée par la découverte de leurs utilisations possibles, qui sont fonction à leur tour de la technologie et du goût. Les plages, les rivières sauvages et les pentes des montagnes enneigées n'étaient guère prisées avant que les gens souhaitent y passer leurs vacances et puissent y accéder par avion, train et automobile. L'uranium n'est devenue une ressource énergétique que lorsque la fission nucléaire a été découverte en 1939. On considère à présent que les déchets recyclables sont des ressources. C'est pourquoi les ressources doivent toujours être vues dans un contexte dynamique en constante évolution.

### ***Ressources non renouvelables***

Les ressources non renouvelables, bien que limitées, ne semblent généralement pas poser de problème de disponibilité en début de cycle. Même si les réserves économiques connues de nombre d'entre elles ne sont disponibles que pendant quelques décennies au rythme actuel de consommation, il ne s'agit là que d'un instantané des ressources découvertes grâce à des recherches actives. En effet, comme il n'est pas rentable d'investir de vastes sommes dans la recherche de ressources pendant de nombreuses décennies encore, il n'est pas surprenant que l'on se borne à un inventaire des ressources disponibles pour le court terme. Lorsque de nouvelles ressources seront nécessaires, les efforts indispensables de prospection et de développement seront financés et d'autres réserves seront définies. La technologie améliore en permanence nos capacités à trouver et à exploiter des gisements de qualité inférieure ou plus éloignés et à exploiter des ressources plus efficacement. Les prix de nombreux produits de base atteignent ou avoisinent des planchers historiques, ce qui laisse supposer que la pénurie n'est pas imminente, bien que la répartition géographique de certains d'entre eux, comme le pétrole, puisse avoir une incidence sur leurs prix ou leurs disponibilités. Le principal problème que soulèvent à court et moyen terme les ressources non renouvelables provient, à la fin de leur cycle, de la capacité de l'environnement à absorber les déchets qu'elles génèrent.

Même si les coûts et la disponibilité ne posent pas de problèmes aujourd'hui, une consommation croissante dans un monde fini aura inévitablement des répercussions. En effet, l'extraction de ressources de qualité moindre dans des régions plus retirées se traduit non seulement par des coûts énergétiques plus élevés et une plus grande quantité de déchets, mais aussi par l'ouverture de nouveaux domaines d'innovation. Une conversion plus importante des combustibles primaires en produits de consommation finale d'une qualité de plus en plus grande risque de rallonger la chaîne de transport et d'abaisser la rentabilité générale du cycle complet du combustible. La diminution de l'utilisation des matières et de l'énergie grâce à l'abaissement de la consommation ou à l'augmentation du rendement énergétique, aussi bien au niveau de la production que de la consommation finale, ne peut qu'être bénéfique pour l'environnement. L'efficacité et la productivité de la ressource sont donc des facteurs essentiels de la durabilité.

### ***Ressources renouvelables***

La durabilité des ressources renouvelables peut être définie de manières différentes. On peut maintenir la production économique d'un écosystème (par exemple une forêt exploitée) ou bien préserver l'intégrité de l'ensemble de l'écosystème (forêts primaires). Parallèlement à la valeur immédiate associée à ses produits économiques, l'écosystème d'où sont tirées les ressources peut avoir des valeurs d'option pour des usages futurs éventuels et des valeurs d'existence découlant simplement de la valeur attribuée par les gens à sa préservation. Les écosystèmes ont une valeur d'information en tant que modèles de fonctionnement de systèmes essentiels au maintien de la vie, complexes et interdépendants, sur lesquels il nous reste beaucoup à apprendre. Les valeurs d'option et d'existence

sont moins tangibles et plus difficiles à mesurer que la production économique immédiate et peuvent revêtir la même importance, en particulier si l'on se place dans le long terme.

Les ressources renouvelables peuvent subir toute une série de pressions, souvent plus fortes que celles qui s'exercent sur les ressources non renouvelables. Elles sont inépuisables en ce sens qu'elles peuvent être recyclées en permanence mais cela ne signifie pas pour autant qu'elles existent en quantités infinies et qu'elles ne risquent pas d'être détériorées. Les ressources renouvelables, comme l'air, l'eau et la terre, sont soumises aux pressions d'usages multiples, parfois incompatibles. L'air et l'eau sont particulièrement exposés à la pollution parce qu'il s'agit de ressources librement accessibles et facilement utilisables comme récepteurs et disséminateurs de déchets. Les habitats des espèces animales et végétales peuvent être extrêmement vulnérables à des effets environnementaux et facilement détruits. De ce fait, les ressources renouvelables doivent être considérées comme finies et sensibles aux pressions.

Ainsi, le réseau hydrographique peut être utilisé à des fins multiples : production d'électricité, consommation d'eau, irrigation, usage industriel, pêches commerciale et sportive, loisirs divers : rafting, canoe-kayak, natation, voile ou promenade en bateau à moteur sur les lacs naturels et artificiels, randonnée et camping, vacances dans des hôtels ou des maisons, ou jouissance de sites restés totalement sauvages. Lorsqu'une de ces activités s'est développée, une autre ne peut être entreprise sans nuire aux intérêts déjà en place qui ont valorisé la ressource. Quelques-unes de ces utilisations peuvent détériorer la qualité de l'eau ou la rendre impropre à d'autres usages. Dans certains cas, une quantité si énorme d'eau est prélevée pour divers usages que le débit qui parvient à la mer ou à l'océan est très faible : le Nil et le Colorado sont parfois dans cet état. Cet appauvrissement du débit peut se répercuter ensuite sur les courants côtiers et la qualité de l'eau, la salinité de l'eau dans le delta, etc. Les politiques relatives aux ressources renouvelables, y compris les politiques de tarification, doivent refléter leur valeur de rareté, leurs usages multiples et leur vulnérabilité à la dégradation ou la possibilité de leur perte irréversible.

## **Recherche, développement et innovation**

La science et la technologie sont une composante vitale du capital humain et social que l'homme a su amasser au cours des siècles passés. L'innovation sera déterminante pour la transition vers un développement durable. La R&D peut contribuer aux connaissances scientifiques et à l'innovation technologique qui seront indispensables pour parvenir aux objectifs de développement durable. En effet, elle peut élargir la base de ressources existantes et créer de nouvelles catégories de ressources en permettant de trouver des moyens nouveaux et plus efficaces d'utiliser les matières premières. En outre, la R&D peut réduire les incertitudes grâce à une meilleure compréhension scientifique des technologies et de leurs impacts. Comme les problèmes associés au développement durable sont complexes et globaux par essence, la R&D nécessaire sera, pour une large part, de nature interdisciplinaire et de portée internationale.

Les gouvernements ont, dans le passé, compris qu'il leur fallait effectuer ou financer des recherches fondamentales dans l'intérêt général en laissant à l'industrie la charge de réaliser les recherches appliquées à finalité commerciale. Avec les difficultés budgétaires, néanmoins, les gouvernements sont devenus moins enclins à financer des recherches à long terme qui ne portent pas immédiatement leurs fruits et risquent de passer à d'autres pays, et ont eu tendance à investir, dans le cadre de partenariats avec l'industrie, dans des recherches stratégiques mais à plus court terme qui contribuent directement à des objectifs nationaux à court terme. Le développement durable exigera une aide prolongée à la recherche s'appuyant sur une vision à long terme qui nécessitera peut-être une modifications des politiques actuelles.

Parallèlement à la R&D, les gouvernements peuvent aussi faire beaucoup pour créer le cadre et les infrastructures propices à l'innovation. Ils peuvent, par exemple, mettre en place une série d'incitations à l'innovation destinées à protéger l'environnement. La conception de nouveaux produits, procédés et systèmes sur la base de toute leur durée de vie dès le départ, visant des niveaux élevés de santé, de sécurité et de protection de l'environnement, est l'un des meilleurs moyens de réaliser les objectifs du développement durable. Cela est particulièrement vrai des systèmes énergétiques qui peuvent avoir des répercussions à grande échelle et ont des durées de vie extrêmement longues.

En raison de l'importance de l'énergie pour le développement durable et de la nécessité de satisfaire une demande toujours croissante de services énergétiques tout en limitant les répercussions globales sur l'environnement, les R&D seront amenés à jouer un rôle décisif dans ce domaine. Les innovations détermineront, en grande partie, l'impact de l'énergie sur les objectifs économiques, environnementaux et sociaux dans les prochaines décennies et assurément à un horizon beaucoup plus lointain. Dans un rapport récent sur le changement climatique et l'énergie nucléaire, la Royal Society préconise que l'on investisse dans la recherche internationale 25 milliards de dollars par an pour étudier toutes les options permettant de faire face à la demande d'énergie, y compris le nucléaire, tout en réduisant la probabilité et les répercussions d'un changement climatique [14].

### **Évaluation et comparaison – Recherche d'indicateurs**

Pour pouvoir comparer les diverses répercussions des activités humaines, il est utile de leur affecter des valeurs, tout comme on donne une valeur monétaire à des biens et des services mis sur le marché. Bien qu'il soit souhaitable d'utiliser un indicateur commun, ou une unité de mesure commune, pour comparer les répercussions, il est difficile d'affecter des valeurs à des entités non marchandes. Parmi ces entités, il y a des actifs naturels comme l'air pur et l'eau propre, les écosystèmes tels que les zones humides, le littoral, les forêts pluviales, les montagnes et les déserts ainsi que les actifs sociaux, comme les institutions, la participation aux débats démocratiques et l'accès à l'information. Il n'est pas facile de trouver un indicateur commun pour attribuer une valeur à ces entités, sachant d'autre part que les méthodes économiques risquent de ne pas traduire leur importance réelle pour la société, du point de vue du développement durable, des biens et services pour lesquels il n'existe pas de marché à l'heure actuelle.

La recherche d'indicateurs communs est compliquée par la variété des incidences économiques, sociales et environnementales à prendre en considération. Ces incidences peuvent être locales, régionales ou mondiales, toucher la population, les écosystèmes ou les systèmes macroéconomiques et se faire sentir à court ou long terme ; elles peuvent encore concerner les travailleurs ou la population. Elles peuvent être le résultat de conditions normales de fonctionnement ou d'un accident. Les événements de faible probabilité mais à fortes conséquences, comme un accident nucléaire grave, demanderont peut-être d'être traités différemment de ceux dont les probabilités sont élevées et les conséquences limitées, comme les rejets de routine de polluants, alors que ces deux catégories entraînent une augmentation de la mortalité et de la morbidité. En outre, différents groupes attribueront des importances variables aux répercussions selon leurs origines sociales et culturelles et leur sensibilité.

Les diverses sources d'énergie utilisables pour produire de l'électricité auront des effets sanitaires et environnementaux différents qu'il est difficile de comparer en les mettant sur le même plan. Les combustibles fossiles rejettent dans l'atmosphère des gaz acides et à effet de serre ainsi que des particules. L'énergie nucléaire produit des rayonnements et des déchets radioactifs. L'énergie hydraulique nécessite l'aménagement sur les systèmes fluviaux de barrages et de centrales, modifie l'écoulement des cours d'eau et dans bien des cas oblige à noyer de vastes superficies pour créer les

réservoirs. Pour d'autres sources d'énergie renouvelables, on peut s'inquiéter de l'affectation de superficies très étendues ou exceptionnelles à des systèmes de captage de l'énergie. Les unités de mesure utilisées pour un éventail aussi large de répercussions varient énormément.

Bien qu'il soit difficile de mesurer des répercussions différentes à l'aide d'une seule et même unité et d'exprimer leurs valeurs par un seul indicateur, des individus, des entreprises et des pouvoirs publics prennent des décisions qui supposent qu'ils ont procédé à une évaluation implicite de ces répercussions, même si celle-ci était simple ou intuitive. Une évaluation explicite est destinée à rendre plus transparents les facteurs intervenant dans la prise de décisions. L'utilisation d'une unité commune ou de quelques brefs indicateurs oblige à examiner les différentes répercussions dans un cadre commun. Les décisions peuvent alors être prises de manière cohérente et systématique en espérant qu'elles aboutiront à de meilleurs résultats généraux.

Les unités monétaires sont bien comprises et sont déjà utilisées lorsque les marchés existent. Elles ont l'avantage de refléter les préférences réelles, ce qui est utile pour les étendre à des entités non marchandes. Elles peuvent tenir compte des calendriers préférés, des risques et des incertitudes. L'attribution d'une valeur à des répercussions contribue à terme à internaliser leur coût et permet aux mécanismes du marché de favoriser plus efficacement le développement durable.

L'adoption d'une série d'indicateurs a aussi ses avantages. En effet, ceux-ci peuvent être choisis de façon à correspondre plus précisément aux caractéristiques des répercussions et des récepteurs. Une récente étude de l'AIE montre comment un examen des indicateurs détaillés tout au long de la chaîne énergétique peut aider à définir une politique en matière d'émissions de carbone [15]. Ainsi, des indicateurs adaptés à chaque secteur d'activité peuvent être spécialement conçus pour mesurer la progression vers le développement durable et les évolutions dans une branche industrielle spécifique.

L'OCDE et d'autres organismes internationaux travaillent actuellement à l'élaboration d'une pyramide d'indicateurs [2, chapitre 6]. À la base de cette pyramide, on trouve des indicateurs qui décrivent l'incidence en termes physiques et monétaires du développement et des politiques au niveau sectoriel : énergie, agriculture et transport, par exemple. À l'échelon supérieur, on trouve les indicateurs de ressources qui décrivent l'accumulation et l'épuisement de différentes formes de capital. Ces indicateurs peuvent servir à élaborer une comptabilité nationale verte comportant, parallèlement aux indicateurs économiques classiques, des indicateurs environnementaux et éventuellement humains et sociaux pour donner un aperçu général des véritables économies réalisées. Il est ainsi possible de mesurer l'évolution du stock global de capital et, donc, la progression vers le développement durable. Bien qu'il soit difficile de mesurer précisément les facteurs humains et sociaux, les travaux effectués à ce jour indiquent qu'ils constituent la plus large part de la richesse nationale dans la plupart des pays et sont des domaines où les investissements sont fortement productifs [16]. Au dessus de cet échelon, on trouve les indicateurs de résultats dans les domaines économique, environnemental et social. Au sommet, enfin, se trouvent les indicateurs synthétiques qui permettent de dresser le bilan des progrès déjà accomplis sur la voie du développement durable.

Les indicateurs utilisés par l'AEN, et plus généralement par la communauté nucléaire, sont pour la plupart spécifiques à l'énergie, l'électricité et l'énergie nucléaire. Il s'agit, entre autres, de quelques indicateurs économiques exprimés en unités monétaires qui peuvent être comparés et intégrés à l'intérieur d'un cadre mondial recouvrant l'ensemble des secteurs d'activité. D'autres indicateurs relatifs aux répercussions sanitaires et environnementales, par exemple les doses collectives ou les volumes et l'activité des déchets, sont spécifiques et nécessitent encore des travaux complémentaires avant de pouvoir être intégrés à une évaluation générale des diverses sources d'énergie. À mesure que progressent les travaux d'élaboration de séries plus globales d'indicateurs, les indicateurs employés dans le secteur de l'énergie nucléaire se révéleront utiles dans ce cadre. Entre temps, l'analyse

multicritères peut être utilisée pour recenser fiablement les problèmes stratégiques principaux et pour leur affecter des ressources et prendre des mesures appropriées.

### **Les valeurs dans le temps – Le taux d’actualisation**

Le développement durable a pour objectif notamment de prendre en considération les besoins des générations futures et nécessite donc d’attribuer une valeur explicite aux futures activités et actifs à un horizon très éloigné. Le taux d’actualisation est un outil essentiel de définition des politiques sous l’angle du développement durable dans la mesure où il révèle notre survalorisation du présent aux dépens du futur [17]. Un taux d’actualisation nul indique que le présent et le futur ont la même valeur. Dans l’optique du développement durable, toutes nos activités ont des répercussions à long terme qui devraient dans leur intégralité être gérées sans perdre de vue l’avenir. Attribuer la même importance aux générations actuelles et futures peut nécessiter des taux d’actualisation plus faibles que ceux donnés par les mécanismes du marché.

Les gouvernements et les autres instances publiques portant la responsabilité des conséquences sociales et environnementales à long terme de décisions adoptées aujourd’hui peuvent avoir recours à des taux d’actualisation faibles pour marquer la priorité accordée au bien-être des générations futures. Néanmoins, des questions politiques spécifiques et le niveau de développement économique auront une influence déterminante sur les choix qui varieront d’un pays à l’autre. S’ils veulent récolter les fruits d’investissements qui ne seront rentables qu’à très long terme, les gouvernements peuvent utiliser un taux d’actualisation bas pour l’évaluation de ces investissements ou attribuer une forte valeur à ces bénéfices, de sorte que même après actualisation, leur valeur actuelle reste importante.

Un taux d’actualisation élevé révèle une forte préférence pour le présent. Les décisions qui sont prises aujourd’hui sur la base d’un taux d’actualisation élevé ne subissent pour ainsi dire pas l’influence des coûts et des profits qui interviendront après quelques décennies. Les personnes démunies qui luttent pour survivre utiliseront implicitement un taux d’actualisation élevé car elles préfèrent les améliorations dont elles pourront bénéficier à très court terme. Les investisseurs privés qui visent des temps de retour courts utilisent explicitement des taux d’actualisation élevés.

L’ouverture à la concurrence du secteur de l’électricité à l’échelle de la planète, en même temps que celle d’autres secteurs, se traduit par une augmentation des pressions en faveur de l’utilisation de taux d’actualisation plus élevés dans les évaluations de projet. Les projets nécessitant de forts investissements en capitaux et se caractérisant par de longs délais de mise en œuvre, comme les centrales nucléaires, deviennent moins intéressants dans ces conditions. Dans le cadre des politiques de développement durable, il convient de rechercher des mécanismes et des mesures permettant de récolter les éventuels bienfaits futurs d’options à forte intensité de capital lorsque l’on estime que l’on peut atteindre ainsi des objectifs de politique générale.

### **Instruments d’action et instruments économiques**

Dans son approche du développement durable, l’OCDE privilégie les instruments d’action et les instruments économiques. Les instruments d’action comprennent la R&D, la réglementation contraignante traditionnelle concernant les effets sur la santé, la sécurité et l’environnement, des outils plus généraux, comme l’évaluation environnementale, l’éducation, l’information et les procédures de participation, ainsi que les mesures volontaires et les programmes, comme l’étiquetage des produits et les récompenses. Parmi les instruments économiques, on peut citer les taxes, les subventions et les

systèmes de permis négociables, la réglementation économique traditionnelle et les mesures destinées à internaliser les coûts externes des conséquences sanitaires et environnementales.

La réglementation est une mission essentielle des pouvoirs publics qui leur permet d'assurer la santé et la sécurité et de garantir l'équité et l'efficacité des mécanismes du marché. Le défi consiste à atteindre ces objectifs sans surcharger l'économie ou contrecarrer les effets bénéfiques de l'innovation. Pour ce qui est de la sûreté et de l'impact sur l'environnement, il s'agit aussi de trouver le juste équilibre entre les risques et les bienfaits pour tout un éventail d'activités. La réglementation tend souvent à être disparate en ce sens que les instances et les règlements ne sont pas les mêmes pour différents risques, comme les produits chimiques toxiques, les rayonnements, les dangers naturels, le crime, la maladie, etc. Les responsables de la réglementation s'intéressent essentiellement aux risques qui relèvent de leurs compétences alors qu'un système intégré pourrait accroître l'efficacité générale du système réglementaire. Ainsi, la réglementation sur la sûreté nucléaire est un aspect essentiel de la politique énergétique. Une approche cohérente du risque dans l'ensemble de la société permettrait d'affecter les ressources avec plus d'efficacité, répartissant en principe de façon équitable les bienfaits marginaux produits par toute augmentation supplémentaire des dépenses engagées pour la santé, la sûreté et l'environnement.

L'éducation, l'information et la participation sont des composantes essentielles de la politique du développement durable et souvent favorisent l'adoption par les pouvoirs publics de mesures au meilleur coût. Si la société comprenait mieux le développement durable et participait davantage aux décisions fondamentales, elle se montrerait plus disposée à prendre les mesures qui y conduisent. Il serait probablement avantageux dans beaucoup de pays de faire participer plus activement le public à un débat sur l'énergie s'étendant à l'ensemble des options disponibles. Si l'on associait toutes les parties intéressées et concernées au processus de décision, il serait plus facile de s'entendre sur le rôle qu'il convient de faire jouer aux différentes options, y compris l'énergie nucléaire, dans les stratégies du développement durable.

Les gouvernements ont recours à une série d'instruments économiques, dont les taxes, les subventions et les programmes d'échanges de droits d'émissions qui incitent à s'orienter vers certains objectifs sans pour autant préciser aux acteurs comment les atteindre. Les acteurs sont donc libres de choisir leurs propres moyens d'y parvenir qui, de fait, peuvent se révéler plus novateurs et plus rentables que ceux imposés par des instances de réglementation. Les instruments économiques aident à atteindre le juste prix qui reflète la valeur que la société attribue à l'ensemble des conséquences qui peuvent apparaître dans le temps. Ils peuvent aider à créer des marchés là où ils n'existaient pas encore et donc un cadre d'évaluation.

Les subventions ont souvent produit des effets négatifs dans le passé quand elles ont été utilisées pour aider des industries inefficaces ou des projets de développement régionaux mal conçus. Elles ont incité certaines industries du secteur des ressources à créer une capacité dépassant les besoins du marché ou les capacités de charge de l'environnement. Les aides accordées aux activités traditionnelles dans certaines régions ont retardé la diversification et la modernisation indispensables, freinant par là même le développement de l'économie. On s'accorde à dire que dans le secteur énergétique, et notamment dans l'industrie nucléaire, comme dans les autres secteurs, les subventions doivent faire l'objet d'une réforme. Néanmoins, des subventions transparentes visant des objectifs fixés par les pouvoirs publics et précisément adaptées à ces objectifs – développement de sources d'énergie moins polluantes, de procédés plus efficaces ou transports publics – peuvent contribuer au développement durable en facilitant l'arrivée de technologies qui auraient autrement bien du mal à se faire une place sur des marchés concurrentiels.

Les taxes et les échanges de droits d'émission peuvent venir compléter les subventions et peuvent n'avoir aucune incidence sur les revenus. Des sanctions économiques peuvent être utilisées à l'encontre d'activités dommageables, comme la pollution, à des fins de protection environnementale ou sociale. Les écotaxes peuvent décourager des activités polluantes bien déterminées conformément au principe pollueur-payeur. Les taxes ont une incidence directe sur les prix mais aussi un effet indirect sur la quantité de polluants émis. En revanche, les échanges de droits d'émission peuvent directement limiter les émissions mais leur impact sur les prix sera indirect. Ces deux types d'instruments permettent d'attribuer efficacement une valeur aux polluants, contribuant ainsi à internaliser leurs incidences sanitaires et environnementales. L'évaluation de ces coûts et leur internalisation sont des facteurs essentiels pour parvenir au juste prix et adopter les bonnes politiques. Tout comme pour les subventions, le défi ici consiste à atteindre l'objectif visé par la politique en minimisant le coût global pour la société.

## **Changement climatique**

Le changement climatique est l'un des problèmes les plus délicats que doivent contribuer à résoudre les politiques du développement durable. Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et leur concentration dans l'atmosphère augmentent. Bien que la nature et l'ampleur probable de leur impact ne puissent pas encore être évaluées avec une grande certitude statistique, les décideurs sont de plus en plus préoccupés par le changement climatique et ont résolu d'appliquer le principe de précaution dans ce cas.

De gros efforts sont faits à l'échelle internationale pour comprendre les aspects scientifiques du changement climatique et trouver des mesures d'atténuation, de réduction et d'adaptation. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) représente une étape majeure sur la voie de la maîtrise et de la limitation des émissions de gaz à effet de serre. Aux termes du Protocole de Kyoto signé en décembre 1997 dans le cadre de la CCC, les pays développés se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre en-dessous des niveaux de 1990 d'ici 2008-2012. Quoique indéniablement de nombreux pays auront du mal à atteindre les objectifs définis à Kyoto, des réductions supplémentaires seront requises après 2012 si l'on veut que les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère se stabilisent à des niveaux acceptables.

Les principaux gaz à effet de serre sont le gaz carbonique et le méthane. La combustion de combustibles fossiles a produit environ 6.4 milliards de tonnes de carbone sous forme de gaz carbonique en 1998, soit en gros une tonne par habitant de la planète, auxquels est venu s'ajouter 1 milliard de tonnes supplémentaires, si ce n'est plus, produites par la combustion des forêts. Plus de la moitié des émissions de carbone produites par les combustibles fossiles proviennent aujourd'hui des pays Membres de l'OCDE. Néanmoins, dans les décennies à venir, l'augmentation de la consommation d'énergie et, par conséquent, des émissions de carbone se situera essentiellement dans les pays non-membres. L'accroissement de la demande d'énergie pour les besoins de la production d'électricité et des transports sera particulièrement rapide en dépit de l'amélioration du rendement énergétique. Les transports continueront de consommer essentiellement du pétrole ; en revanche, pour la production d'électricité, on pourra choisir entre diverses sources d'énergie dont le charbon, le gaz naturel, l'énergie nucléaire, l'énergie hydraulique, la biomasse, l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

Il sera important de faire appel à des sources d'énergie propres pour produire l'électricité dans les grandes villes où l'industrie et le transport feront croître la consommation des combustibles fossiles et des émissions de gaz de toutes sortes. L'électricité devrait contribuer à réduire le risque d'un changement climatique planétaire. Construire des centrales électriques à l'échelle voulue constituera un défi majeur non pas en raison des ressources en combustible requises mais plutôt du fait du

financement, des institutions, de l'infrastructure et des technologies qui sont indispensables pour faire face aux impératifs économiques et environnementaux.

Du point de vue du développement durable, il semblerait essentiel de s'assurer que les effets pouvant entraîner un changement climatique ou d'autres effets environnementaux soient internalisés dans la mesure du possible dans les coûts des activités qui en sont la source. À l'heure actuelle, la taxation inexistante ou minime des émissions de carbone contribue à envoyer les mauvais signaux, à encourager les émissions et à décourager les solutions qui ne produisent pas ou peu de carbone. En effet, l'absence d'une valeur attribuée aux émissions de carbone se traduit par des économies très importantes pour les combustibles fossiles. Un traitement approprié des émissions de carbone contribuerait pour une large part à la définition d'un juste prix des sources d'énergie, à la réalisation des engagements de Kyoto et à une réduction plus poussée des émissions au-delà des dates fixées.

Même si l'on finit par attribuer une valeur aux émissions de carbone par le biais de taxes ou de permis, les gouvernements qui aspirent avant tout à un développement rapide ainsi que les producteurs et les consommateurs d'énergie ne souhaiteront pas qu'une valeur élevée soit affectée aux émissions de carbone. En raison de la place qu'ils occupent dans l'économie de chaque pays, il semble improbable que les combustibles fossiles soient un jour évincés du marché de l'électricité du fait de prix trop élevés. En outre, la technologie des combustibles fossiles continuera probablement de s'améliorer. Les sources exemptes de carbone, comme l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables, pourraient contribuer énormément à la réduction des émissions mais elles devront affronter la concurrence sur des marchés où les combustibles seront vraisemblablement abondants et relativement peu coûteux. Quels que soient leurs avantages sur le plan des émissions, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables devront se révéler compétitives dans les conditions existantes et, de plus, sûres et acceptables par la population dans le cas de la première.



### 3. DÉVELOPPEMENT DURABLE ET ÉNERGIE NUCLÉAIRE<sup>1</sup>

La situation actuelle de l'énergie nucléaire est décrite au chapitre 1. Plus de 400 centrales nucléaires sont en service dans 31 pays et totalisent une puissance installée de 350 GWe environ. L'industrie nucléaire représente d'énormes actifs sous forme de plusieurs types de capitaux. La valeur de remplacement des centrales nucléaires en service, qui avoisine 700 milliards d'USD, est une mesure possible du capital produit. Les techniques d'exploitation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques sont éprouvées et profitent de la vaste expérience acquise lors de la conception et de l'exploitation des réacteurs et des installations du cycle du combustible ainsi que de la réglementation des activités nucléaires civiles. L'exploitation des centrales nucléaires représente une expérience cumulée d'environ 9 000 années-réacteurs.

Plus de 80 % de la puissance nucléaire est installée dans les pays de l'OCDE. Les pays non-membres, en particulier ceux dotés d'un secteur urbain et industriel important, connaîtront de fortes croissances de la demande d'électricité, de sorte que vraisemblablement c'est dans ces pays que l'énergie nucléaire se développera principalement dans les décennies à venir. Pour garantir que la croissance de l'énergie nucléaire reste compatible avec les objectifs du développement durable, les pays de l'OCDE auront une mission de coopération à remplir avec ces pays sous forme de transfert de technologies, de formation, d'échanges d'expériences et de mise en place d'institutions.

Lorsque l'on considère l'énergie nucléaire sous l'angle du développement durable, il faut analyser ses caractéristiques en termes d'incidences économiques, environnementales et sociales, positives et négatives, pour pouvoir déterminer dans quelle mesure et dans quelle condition, l'énergie nucléaire pourra contribuer à réaliser les objectifs du développement durable. L'analyse qui suit est consacrée à ces aspects et doit permettre de fournir aux décideurs les éléments qui leur permettront d'évaluer les avantages et les inconvénients de l'énergie nucléaire par rapport à d'autres solutions.

#### Indicateurs

L'OCDE et l'AIE travaillent actuellement sur les indicateurs de développement durable dans le secteur énergétique. Ces indicateurs peuvent prendre la forme d'indicateurs sectoriels et d'indicateurs de ressources, ainsi que d'indicateurs de résultats et synthétiques qui mesurent la progression vers le développement durable [2, chapitre 6].

---

1. « Énergie nucléaire » est un terme qui recouvre un vaste éventail d'activités, comme la conception, la construction et l'exploitation de réacteurs ainsi que la fourniture de services du cycle du combustible (voir annexe 1). Ces activités sont réalisées dans de nombreux pays avec des technologies et des infrastructures institutionnelles différentes ainsi que des niveaux de performances divers. Ce terme est repris dans l'ensemble du document pour des raisons de commodité et de simplicité mais il faut savoir qu'il y a une grande diversité au sein du secteur nucléaire et entre les démarches à l'égard de l'énergie nucléaire adoptées par les différents pays.

Ces indicateurs peuvent donner les informations suivantes sur le secteur énergétique :

- répartition géographique et disponibilité des ressources (compte tenu d'une définition dynamique de ces ressources) ;
- les échanges ;
- l'intensité énergétique et les flux de matières (par habitant, par unité de PIB, ou par unité de produit fini, par exemple kWh d'électricité, voyageurs-km dans les transports), y compris ceux qui se rapportent à l'environnement (émissions de carbone, entre autres) ;
- impact sur la santé de différents groupes (par exemple exprimé par les fonctions dose-réponse) ;
- limites critiques de charge de l'environnement pour des matières et des récepteurs donnés ;
- utilisation des sols et impact sur l'habitat naturel ;
- possibilités de dommages considérables et irréversibles à l'environnement.

Les indicateurs sont souvent énumérés en fonction de différentes catégories d'incidences sur l'environnement : biodiversité, changement climatique, smog d'été et d'hiver, demande biologique en oxygène des lacs et des cours d'eau, produits chimiques toxiques, etc. D'autres éléments moins tangibles joueront aussi un rôle important pour la durabilité : les politiques des pouvoirs publics en matière d'enseignement, de formation, d'aide financière et de R&D ; valeur marchande et valeur pour le consommateur ; estimation de la valeur de la santé et de l'environnement et unités pour exprimer ces valeurs ; qualité des réglementations sanitaire, environnementale, économique et relative à la sécurité ; efficacité des institutions.

Compte tenu du niveau actuel des connaissances scientifiques, il semble logique de commencer par des indicateurs adaptés à chaque activité et effet, et ensuite de s'efforcer de les agréger à l'aide d'unités appropriées. Le problème le plus complexe à ce niveau est de déterminer les éléments les plus importants afin de se focaliser sur eux.

Il est difficile d'évaluer la progression vers le développement durable et de comparer les progrès accomplis pour différentes sources d'énergie. En fait, des indicateurs pourraient être utiles pour choisir des techniques de production d'électricité lorsque les besoins en énergie et électricité seront mieux compris dans une perspective de développement durable. Il en ressort donc qu'il faut élaborer des indicateurs utilisables pour les comparaisons.

En se référant aux dimensions économique, sociale et environnementale proposées par l'OCDE, il est possible de recenser et de mesurer un certain nombre d'indicateurs se rapportant à l'énergie nucléaire (tableau 3.1). Les exemples figurant dans cet encadré sont donnés à titre d'exemple sachant que certains d'entre eux, comme les doses et l'activité des déchets, ne s'appliqueront pas à d'autres sources d'énergie. Par ailleurs, l'utilisation des sols intervient beaucoup moins pour l'énergie nucléaire ou l'électricité produite à l'aide de combustibles fossiles que pour l'énergie hydraulique, l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Les dommages sanitaires et environnementaux causés par différents polluants, comme le SO<sub>x</sub>, le NO<sub>x</sub>, les gaz à effet de serre et les émissions radioactives se prêtent difficilement à une comparaison quantitative.

**Tableau 3.1 Indicateurs du développement durable  
(exemples d'indicateurs s'appliquant à l'énergie nucléaire)**

<b>Indicateurs économiques</b>	<b>Indicateurs sociaux</b>	<b>Indicateurs environnementaux</b>
Coût du capital (\$/kWe)	Dose à la population (Sv/kWh) <sup>2</sup>	Volume de déchets solides (m <sup>3</sup> /kWh)
Coût marginal (\$/kWh)	Emploi (homme/kWh)	Activité des déchets solides (Bq/kWh) <sup>3</sup>
	Enseignement (nombre de cursus universitaires)	Consommation de combustible (tU/kWh)
		Activité des effluents liquides et gazeux (Bq/kWh)

Sachant que la mise au point d'indicateurs génériques pour l'énergie et des domaines plus vastes peut prendre du temps, il semble justifié que le secteur nucléaire recense des indicateurs importants et porte toute son attention sur leur mesure en vue d'évaluer les tendances relevant du développement durable. Ces travaux ont déjà été entrepris au niveau national et international, et des séries de données sont collectées, harmonisées et publiées régulièrement.

### **Dimension économique**

L'efficacité économique est un composant du développement durable, et la compétitivité est un indicateur pertinent dans la mesure où les prix du marché reflètent les coûts totaux d'un produit ou d'une activité pour la société. Les aspects économiques de l'énergie nucléaire sont examinés et présentés ci-dessous sous cet angle, compte tenu des critères applicables à la concurrence sur le marché, aux externalités et aux subventions.

Le recours à l'énergie nucléaire dans la panoplie des énergies auxquelles fait appel un pays augmente la diversité des technologies et des combustibles et crée une concurrence avec d'autres sources d'énergie utilisées pour produire l'électricité, ce qui contribue à améliorer l'efficacité globale et la rentabilité des systèmes énergétiques au profit des consommateurs.

### **Concurrence**

S'agissant de leur compétitivité avec les nouvelles centrales thermiques, les centrales nucléaires existantes peuvent être réparties en trois catégories selon les coûts de leur production [18,19] :

- un premier groupe pourra concurrencer les nouvelles centrales à combustibles fossiles même si la totalité des coûts en capitaux des centrales nucléaires sont pris en compte. Les installations de ce groupe seront les principales candidates à un prolongement de la durée de vie ;

---

2. Le Sievert (Sv) est l'unité de dose utilisée en radioprotection pour mesurer l'effet biologique des rayonnements ionisants.

3. Le Becquerel (Bq) est l'unité d'activité utilisée pour mesurer le nombre de désintégrations par seconde des matières radioactives ; 1 becquerel est égal à une désintégration par seconde.

- un deuxième groupe sera concurrentiel sur la base des coûts marginaux (combustible, coût d'exploitation et de maintenance) mais ne pourra amortir la totalité des capitaux investis qui formeront la dette restante. Néanmoins, comme leurs coûts en capitaux ont déjà été déboursés, il peut sembler plus avantageux de continuer à les exploiter, afin de récupérer au moins une partie de l'investissement. Lorsqu'il paraît intéressant de continuer à les exploiter en raison de leurs faibles émissions, pour des raisons de sécurité énergétique et/ou pour sauvegarder les compétences nucléaires et préserver l'option nucléaire dans l'avenir, on peut envisager des mesures d'aide ;
- un troisième groupe n'est pas compétitif sur le plan des coûts marginaux de sorte que les installations de ce groupe ont toutes les chances de fermer si leurs performances ne s'améliorent pas. Néanmoins, il semble que l'extension actuelle des coûts marginaux des centrales nucléaires, par exemple aux États-Unis [20] est principalement due à des problèmes de gestion individuelle des installations, ce qui signifie que les centrales les plus coûteuses pourraient en fait abaisser leurs coûts marginaux.

La plupart des centrales nucléaires devraient normalement continuer à fonctionner jusqu'à la fin de leur durée de vie programmée. Il sera probablement rentable pour la majorité d'entre elles de prolonger cette durée de vie. Les travaux de rénovation nécessaires pour étendre leur durée de vie amélioreront les performances de l'installation, aideront à respecter des normes de sûreté de plus en plus sévères et offriront la possibilité d'une remise à niveau. L'installation pourra ainsi produire davantage d'électricité pour des coûts d'investissement plus bas que la plupart des solutions de rechange.

Les centrales actuellement en service ont pour la plupart été raccordées aux réseaux dans les années 70 et 80. Compte tenu d'une durée de vie programmée de 40 ans, il faudrait les remplacer en 2030. Même s'il est prévu que nombre d'entre elles verront leur durée de vie prolongée de 10 ans, voire plus, de nouveaux modèles de réacteurs, évolutifs ou plus novateurs, devront être éventuellement mis au point. Ils devront concurrencer d'autres sources d'électricité sur la base de la totalité des coûts tout en continuant à respecter des normes de sûreté élevées. Il faut que par rapport aux centrales actuelles leur construction soit moins coûteuse et plus rapide et qu'en outre leur maintenance soit plus facile. Il s'agit là d'un défi difficile à relever mais en même temps d'une condition sine qua non si l'on veut que l'énergie nucléaire soit viable à long terme.

Les nouvelles centrales nucléaires qui devront remplacer les installations parvenues à la fin de leur durée de vie utile et qui seront nécessaires pour faire face à la demande d'électricité, entreront en concurrence avec tout un éventail d'options de production. Les centrales au gaz naturel (turbines à gaz à cycle combiné) semblent actuellement la technique de prédilection qu'il faudra être capable de concurrencer dans les prochaines décennies pour se voir confier la construction de nouvelles installations dans des régions où le gaz est facilement disponible. Dans de nombreux pays non-membres, il semble bien que le plus gros concurrent de l'énergie nucléaire sera le charbon.

Le coût moyen total de production d'électricité par de nouvelles tranches nucléaires qui seront commandées dans les années à venir se situera dans une fourchette de 2.5 et 6 cents par kWh compte tenu d'un taux d'actualisation de 5 % et de 4 et 8 cents par kWh pour un taux d'actualisation à 10 % [21].

Les estimations du coût auxquelles on se réfère pour prendre des décisions dépendent énormément du taux d'actualisation adopté. Des taux d'actualisation bas reflétant une valeur relativement élevée dans l'avenir, ce qui est peut-être recommandé pour un développement durable, augmentent la compétitivité des technologies à forte intensité de capital comme le charbon et l'énergie

nucléaire. Si l'on prend un taux d'actualisation de 5 %, les centrales nucléaires de la génération actuelle seraient compétitives par rapport aux solutions de rechange dans un certain nombre de pays de l'OCDE et dans les pays non-membres sachant, toutefois, que sur un marché déréglementé et concurrentiel un taux d'actualisation de 10 % est plus vraisemblable.

L'énergie nucléaire se caractérise par de forts coûts en capitaux et de faibles coûts marginaux de production de l'électricité. Les centrales nucléaires sont en règle générale de grandes installations et coûtent des milliards de dollars. Selon l'étude de l'AIE/AEN sur les coûts projetés de production de l'électricité [21], avec un taux d'actualisation de 5 %, les investissements en capitaux, y compris les intérêts intercalaires, représenteront environ 60 % du coût total de production de l'électricité d'origine nucléaire contre 25 % pour l'exploitation et la maintenance et autour de 15 % pour le combustible.

**Tableau 3.2 Coûts de production de l'électricité nucléaire**

	Taux d'actualisation	Investissement (%)	E&M (%)	Combustible (%)	Coût total (cent/kWh)
Canada	5%	67	24	9	2.5
	10%	79	15	6	4.0
Finlande	5%	59	21	20	3.7
	10%	73	14	13	5.6
France	5%	54	21	25	3.2
	10%	70	14	16	4.9
Japon	5%	43	29	27	5.7
	10%	60	21	19	8.0
République de Corée	5%	55	31	14	3.1
	10%	71	20	9	4.8
Espagne	5%	54	20	26	4.1
	10%	70	13	17	6.4
Turquie	5%	61	26	14	3.3
	10%	75	17	9	5.2
États-Unis	5%	55	27	19	3.3
	10%	65	19	13	4.6

Les coûts en capital des centrales nucléaires varient selon la conception, les fournisseurs des composants, les méthodes de construction, les qualifications de la main-d'œuvre et de la hiérarchie et leurs relations, l'assurance-qualité, les procédures réglementaires et d'autorisation. Les coûts totaux d'investissement, y compris les provisions pour le démantèlement et les intérêts intercalaires, pour des centrales nucléaires de conception actuelle s'échelonnent entre 2 000 et 2 500 USD par kWh. Pour une centrale de 1 GWe, il faut donc un investissement dépassant 2 milliards d'USD. Les concepteurs et fabricants de nouveaux réacteurs se sont fixé pour objectif de fortement réduire les coûts en capitaux de 25 % ou plus pour la prochaine génération de centrales nucléaires [22].

Les coûts de la sûreté et du déclassement sont compris dans les coûts en capital des centrales nucléaires et amortis par l'exploitant sur toute la durée de vie de la tranche. Les prix payés par les consommateurs d'électricité incluent les coûts de déclassement, de sorte que la charge financière pesant sur les générations futures est minimale ou nulle. Les producteurs d'électricité mettent de côté des fonds destinés à couvrir les dépenses nécessaires le moment venu [23]. L'estimation des coûts de déclassement est essentiellement basée sur l'expérience acquise avec des installations de recherche ou de petits réacteurs, mais à mesure que le retour d'expériences augmente, moins d'incertitudes pèsent

sur ces coûts. Les coûts non actualisés varient entre 10 et 20 % des coûts d'investissements initiaux mais lorsqu'on les actualise, ne dépassent pas quelques pour cent du coût total d'investissement dans la mesure où les plus fortes dépenses seront acquittées plusieurs décennies après la fermeture de la centrale [24].

La part des coûts en capital dans la totalité des coûts de production de l'électricité varie considérablement d'une centrale à l'autre et en fonction du taux d'actualisation, le capital pesant plus lourd lorsque les taux d'actualisation sont élevés. À ce jour ils ont toujours représenté une part plus importante dans les centrales nucléaires que dans les installations thermiques. Pour les centrales au charbon, les coûts en capital s'échelonnent en général entre 1 000 et 2 000 USD par kWh ; pour les centrales à gaz, ils sont encore plus bas puisqu'ils ne dépassent pas 500 à 900 USD par kWh. En outre, les délais de construction sont plus courts pour les centrales au gaz (deux à trois ans) et pour les centrales au charbon (environ cinq ans) que pour les centrales nucléaires pour lesquelles ils sont de cinq à sept ans. Pour les centrales au charbon, les coûts sont ventilés de la façon suivante : environ 35 % d'investissements, 20 % de dépenses d'exploitation et de maintenance et 45 % pour le combustible. Pour les centrales au gaz, les capitaux investis représentent environ 20 %, l'exploitation et la maintenance 10 % et le combustible 70 % (cf. tableau 3.2 et [21]).

Une fois en service, une centrale nucléaire permet d'avoir des coûts de production stables. Le coût du minerai d'uranium en lui-même ne constitue que quelques pour cent de la totalité des coûts de l'électricité produite à partir d'énergie nucléaire, de sorte que même une augmentation sensible de son prix n'aura pas une grande influence sur le coût de production de l'électricité. En revanche, le coût du combustible représente un pourcentage important de la totalité des coûts de production des centrales thermiques, en particulier des centrales au gaz (environ 70 % au moins). De ce fait, l'extrême volatilité dans le passé des prix des combustibles fossiles aura une influence importante sur la compétitivité de ce mode de production d'électricité.

L'énergie nucléaire peut concurrencer d'autres sources d'énergie sur des marchés déréglementés de l'électricité dans les pays où il existe de vastes programmes électronucléaires basés sur des tranches standardisées et où les centrales sont exploitées et gérées avec efficacité. Si une centrale nucléaire fonctionne avec un facteur de charge supérieur à celui programmé ou pendant une période plus longue que prévu, sans nécessiter de rénovations importantes, le retour sur investissement peut être important. Dans les pays où le marché de l'électricité a été déréglementé, les tranches nucléaires ont obtenu d'assez bons résultats en règle générale et ont contribué à la production d'une électricité dont les prix sont à la fois bas et stables.

### ***Subventions***

Il est essentiel de supprimer les subventions qu'il n'est pas souhaitable de conserver pour parvenir aux objectifs du développement durable sur un marché déréglementé. Il s'agit, dans le secteur nucléaire, des subventions accordées pour aider les activités de R&D autres que la recherche scientifique et fondamentale, pour financer les exportations ainsi que les garanties de l'État couvrant les charges financières et la responsabilité civile en cas d'accident grave. À mesure que l'industrie nucléaire se rapprochait de la maturité commerciale, le financement des exportations et les garanties financières de l'État pour les charges et responsabilités ont été sensiblement réduites. Les aides à la R&D sur une technologie donnée doivent être évaluées en fonction des objectifs de politiques générales du pays, notamment la sécurité de l'approvisionnement en énergie et la protection de l'environnement.

Les aides financières versées par les organismes nationaux de développement des exportations, souvent accordées au profit de projets nucléaires mis en œuvre dans des pays non-membres, ne sont pas spécifiques au nucléaire. Les pays Membres de l'OCDE qui exportent dans le secteur nucléaire, ont accepté de se plier à des règles qui ont évolué à tel point que tout financement public se pratique pour ainsi dire à des taux commerciaux bien que la formation, les transferts de technologies, les garanties et autres domaines fassent l'objet d'une certaine souplesse. Dans la mesure où les financements auxquels participe le gouvernement sont assimilés à une subvention, même lorsqu'ils sont pratiqués à des taux commerciaux, il faudrait les apprécier en fonction des objectifs de politique nationale, tels que la réduction des émissions mondiales, et des pratiques commerciales de promotion d'autres produits et services.

Un objectif essentiel du développement durable est d'éviter la transmission de trop lourdes charges aux générations futures. D'autres charges financières associées au déclassement des installations et au stockage des déchets radioactifs nécessiteront peut-être des subventions si les fonds provisionnés par l'industrie nucléaire pour ce faire se révèlent insuffisants. Dans la mesure où le démantèlement et le stockage des déchets interviennent longtemps après la production d'électricité, il se peut que l'acteur économique responsable de l'installation et de ses déchets n'existe plus lorsque viendra l'heure de verser les fonds. Dans les pays de l'OCDE, le coût du déclassement des centrales nucléaires et du stockage des déchets radioactifs est inclus pour une large part dans les coûts de production [21, annexe 7] et répercuté sur les utilisateurs actuels de l'électricité. Des projets en place dans les pays de l'OCDE pour assumer les futures charges financières découlant des activités nucléaires garantissent que des fonds seront disponibles pour financer les dépenses de démantèlement au moment voulu [23].

Les régimes d'assurance des responsabilités nucléaires assurent de nombreuses garanties aussi bien à l'industrie qu'aux victimes éventuelles d'accidents, et l'indemnisation des dommages est de plus en plus prise en charge par les exploitants nucléaires. L'énergie nucléaire a été un des premiers secteurs à mettre en place des régimes de responsabilité et à réfléchir aux charges à long terme. Des pressions s'exercent de plus en plus sur d'autres industries afin que celles-ci assument leurs coûts externes et leurs charges futures à l'instar de l'industrie nucléaire. Comme la responsabilité limitée des sociétés exploitant des installations nucléaires peut être assimilée à une subvention à l'industrie nucléaire, il conviendrait de la comparer aux autres régimes de responsabilité dans d'autres domaines.

La R&D publique, y compris la construction et l'exploitation d'équipements, comme les réacteurs de recherche, continuera vraisemblablement à être la principale subvention à l'énergie nucléaire comme par le passé. Un énorme effort de R&D est nécessaire pour concevoir et développer des modèles respectant des normes de sûreté plus sévères, se caractérisant par des performances techniques supérieures et capables de concurrencer d'autres sources d'énergie. Les aides publiques à la R&D doivent être justifiées par la contribution attendue des résultats à des objectifs de politique générale, comme le bien-être social, la protection de l'environnement et le développement durable. Elles devraient être attribuées à un éventail d'options selon leurs contributions respectives aux objectifs communs du pays, et les raisons justifiant la démarche adoptée doivent être parfaitement transparentes. À cet égard, la part de la R&D nucléaire dans le budget total de la R&D technologique et énergétique doit être proportionnée au rôle qu'il est prévu de faire jouer à l'énergie nucléaire dans la politique nationale.

### *Coûts et avantages externes*

Les coûts des impacts sanitaire et environnemental des émissions et charges résiduelles constituent des externalités négatives. Les normes et les réglementations réduisent les incidences de la chaîne de

production d'électricité et internalisent *de facto* les coûts de la protection de l'environnement et de la santé. Les coûts externes restants sont supportés par la société dans son ensemble sous la forme de taxes, de dommages sanitaires et environnementaux et de charges transmises aux générations futures. Les coûts non internalisés peuvent être assimilés à des avantages consentis aux producteurs et utilisateurs des technologies à l'origine des effets. Dans la mesure où ces coûts ne sont pas reflétés dans les prix du marché, ils empêchent les mécanismes du marché de favoriser le développement durable.

L'industrie nucléaire doit respecter des règlements limitant rigoureusement les émissions atmosphériques et les effluents liquides et est tenue de confiner ses déchets et de les maintenir isolés de la biosphère aussi longtemps qu'ils représenteront un danger pour l'environnement et la santé de l'homme. De ce fait l'industrie nucléaire a assumé la pleine responsabilité de ses émissions, effluents et déchets et a internalisé les coûts correspondants qui sont répercutés sur l'utilisateur d'électricité. Cette internalisation englobe la gestion des déchets, le stockage des déchets et le démantèlement des installations. Elle s'applique également à la responsabilité civile en cas d'accident majeur bien qu'elle fasse l'objet d'un plafonnement et que les gouvernements prennent en charge le risque résiduel.

L'impact de différents cycles du combustible sur la santé humaine et l'environnement est examiné dans un certain nombre d'études qui fournissent des informations sur les progrès accomplis en matière d'identification, d'évaluation et d'internalisation des coûts externes. Les études les plus ambitieuses dans ce domaine sont celles qui ont tenté de regrouper les indicateurs de différentes sortes d'effets sous une même unité, monétaire le plus souvent. Ces études utilisent des préférences révélées par des valeurs marchandes quand elles existent. Lorsque celles-ci font défaut, les chercheurs tentent d'obtenir des valeurs équivalentes par d'autres moyens leur permettant de découvrir les préférences.

L'évaluation est source de controverse et il n'existe pas de consensus sur la faisabilité et la pertinence de l'affectation d'une valeur monétaire à chaque bien, produit de base et services, sans parler de la vie humaine. Il est difficile d'exprimer tout l'éventail des effets divers sur l'environnement par une seule unité et de s'entendre sur la valeur monétaire de certains actifs. Néanmoins, la démarche ne manque pas d'intérêt dans la mesure où elle fait ressortir de manière aussi transparente que possible les préférences et où elle les soumet à une évaluation systématique permettant de déterminer et de comparer les effets les plus prioritaires.

La Commission européenne a procédé à une étude approfondie des incidences sanitaires et environnementales de plusieurs cycles du combustible associés à la production d'électricité en se basant sur des technologies et des sites spécifiques [25]. Depuis, la méthodologie utilisée et les résultats ont été affinés, mais les conclusions de 1995 restent en gros valables. D'autres études ne concordent pas sur certains chiffres, mais leurs conclusions pour une large part sont similaires.

Dans les conditions d'exploitation normales, l'énergie nucléaire n'a que des incidences minimales, comparables à celles du gaz naturel et des énergies renouvelables. L'étude ExternE estime, avec un taux d'actualisation nul, ces incidences à moins de 1 mECU (millième d'écu) par kWh, en dehors de l'incidence mondiale à long terme du retraitement qui s'élève à 2 mECU. Ce dernier chiffre a été obtenu en multipliant de très faibles expositions par un très grand nombre de personnes qui seraient exposées au cours des 100 000 prochaines années. Ce type de vaste extrapolation d'effets minimales ne fait pas l'unanimité. Il est surtout utile dans le cas de populations bien précises et de périodes plus courtes.

Le coût externe d'un accident nucléaire grave, calculé sur la base d'une probabilité de  $5 \times 10^{-5}$  par an d'endommagement du cœur, a été estimé par l'étude ExternE à environ 0.1 mECU. D'autres estimations des coûts externes des accidents graves font apparaître d'assez grandes disparités et sont

jugées discutables. Les résultats obtenus pour les centrales nucléaires respectant de bonnes normes de sûreté qui sont en service dans les pays de l'OCDE révèlent que les accidents graves ont des contributions quantifiables très basses au coût externe de l'électricité nucléaire [26]. Toutefois, même si les estimations économiques sont intéressantes dans ce contexte, elles ne permettent pas d'exprimer de manière adéquate la profonde aversion du public pour les accidents faisant de nombreuses victimes, même si leur probabilité est extrêmement faible. Estimer l'impact d'événements de faible probabilités mais aux vastes répercussions pose le problème du poids supplémentaire que les individus ont tendance à attribuer à ces événements. Une évaluation complète fera intervenir la probabilité, les conséquences et le poids émotionnel que chaque personne confère à ces événements et leur conviction qu'il est possible d'éviter ou d'atténuer les effets négatifs tout en continuant à jouir des avantages. Cette aversion se répercute sur la manière spéciale dont les pouvoirs publics traitent les grands accidents par rapport aux petits, par exemple en mettant en place des organisations de crise ou en prévoyant des régimes particuliers, comme ceux créés pour la responsabilité civile nucléaire.

Les incidences les plus importantes du fonctionnement normal des cycles des combustibles fossiles sont le changement climatique et les effets sur la santé du public des cycles du charbon et du pétrole, qui pour l'essentiel sont des maladies respiratoires causées par les particules et d'autres polluants. Selon l'étude ExternE, ces incidences représentent environ 10 mECU par kWh. Les répercussions sur la santé du public des cycles du gaz naturel sont d'un ordre de grandeur inférieur. Les problèmes de santé professionnels dus au cycle du charbon sont également importants, provenant essentiellement de la pollution (poussière et radon) dans les mines souterraines, mais ils sont en grande partie internalisés par le biais des salaires et seraient beaucoup plus limités pour les mines à ciel ouvert.

Une autre dimension importante des coûts externes est celle de la sécurité énergétique, notamment la valeur de la diversité à l'intérieur du système de production d'électricité. L'énergie nucléaire est une source d'énergie nouvelle et abondante qui n'existerait pas autrement, élargissant ainsi la base des ressources énergétiques de la planète et contribuant à un renforcement de la sécurité d'approvisionnement et de la diversité grâce à ses caractéristiques uniques. Même si la plupart des pays n'attribuent pas une grande importance à la sécurité de l'approvisionnement, il faut souligner que les réserves de pétrole conventionnel, la principale source d'énergie fossile, sont concentrées au Moyen-Orient, ce qui ne serait pas sans soulever quelques problèmes en cas de troubles politiques dans cette région, quoiqu'on considère aujourd'hui que ce marché fonctionne bien. Certains pays importent le gaz naturel dont ils ont besoin de régions éloignées. La diversité et la sécurité de l'approvisionnement sont décrites comme des priorités dans les objectifs communs des pays Membres de l'AIE.

## **Dimension environnementale**

Les principaux indicateurs de la composante environnementale du développement durable comprennent des critères relatifs à la gestion des ressources naturelles, au changement climatique, à la qualité de l'air et de l'eau, à la biodiversité et au paysage. Les risques environnementaux associés à l'énergie nucléaire proviennent essentiellement des émissions et des déchets radioactifs. L'industrie nucléaire des pays Membres de l'OCDE a déployé de gros efforts pour maintenir ces risques dans les limites socialement acceptables définies par des organes de réglementation indépendants.

La chaîne de production de l'électricité d'origine nucléaire ne rejette pas de gaz ou de particules qui acidifient les pluies, contribuent au smog urbain ou appauvrissent la couche d'ozone. La quantité de dioxyde de carbone émis par la totalité du cycle du combustible nucléaire est négligeable. Une seule grande centrale nucléaire de 1 GWe permet d'éviter l'émission d'environ 1.75 million de tonnes de carbone chaque année si elle est utilisée à la place du charbon, près de 1.2 million de tonnes si elle

est utilisée à la place du pétrole et 0.7 million de tonne si elle est utilisée à la place du gaz naturel. Les chiffres actuels dépendront des facteurs de capacité, des rendements thermiques des centrales à combustibles fossiles, des propriétés du combustible, etc. Une centrale nucléaire permettra aussi d'éviter les émissions de SO<sub>x</sub>, de NO<sub>x</sub> et de particules, contribuant ainsi sensiblement à la qualité de l'air local.

### *Gestion des ressources naturelles*

L'efficacité d'utilisation des ressources est un indicateur fondamental du développement durable dans le secteur de l'énergie. Les centrales nucléaires de la génération actuelle exploitées en cycle ouvert extraient plus de 10 000 fois plus d'énergie par unité de masse d'uranium que les autres technologies ne le font des combustibles fossiles ou renouvelables. Cette très forte densité d'énergie est une mesure de l'efficacité d'utilisation des ressources. Une quantité beaucoup plus petite de matières est extraite, transformée, entreposée et transportée pour produire 1 kWh d'électricité qu'avec d'autres sources, et le volume des déchets est aussi proportionnellement plus petit.

En dehors de la production d'énergie nucléaire l'uranium n'a pas d'autre utilisation importante. En produisant de l'électricité avec de l'uranium, on étend donc la base de ressources totales dont dispose l'homme pour ses besoins, on augmente la diversité des choix possibles et on peut employer les autres ressources, comme les hydrocarbures à des usages où ils sont plus efficaces, tels que le transport et la pétrochimie.

Les centrales nucléaires en service dans le monde consomment l'équivalent d'environ 60 000 tonnes d'uranium naturel par an. Les ressources d'uranium connues représentent plus de 70 ans de consommation au niveau actuel [27]. Les réserves d'uranium, prouvées et exploitables économiquement, couvriront les besoins pendant près de 40 ans au rythme actuel de consommation. Le rapport réserves/consommation est similaire pour l'uranium et le pétrole [28]. Comme pour toute autre ressource minérale, les réserves actuelles ne correspondent qu'à celles qui ont été découvertes parce qu'elles ont été prospectées en ayant à l'esprit un amortissement économique à court terme. Il n'y a pas beaucoup d'intérêt à rechercher de l'uranium si on ne se propose pas de le commercialiser avant plusieurs décennies. On sait toutefois que l'uranium est abondant dans l'écorce terrestre, et les ressources conventionnelles sont estimées à quelque 250 années de consommation au rythme actuel de la demande. En outre, les ressources non conventionnelles contenues dans les phosphates marins et l'eau de mer sont supérieures de deux ordres de grandeur.

Les ressources et les réserves d'uranium sont réparties entre de nombreux pays situés dans différentes régions du monde, assurant donc la diversité et la sécurité de l'approvisionnement en combustible. Elles sont présentes dans des formations rocheuses différentes en règle générale de celles qui contiennent des réserves de combustible fossile de sorte qu'il existe aussi une diversité géologique. La forte teneur en énergie du combustible, la stabilité de sa forme céramique et la faible part du combustible dans le coût de production de l'électricité nucléaire font qu'il est possible et rentable de conserver des réserves stratégiques de combustible sur les sites des réacteurs qui assurent une très grande sécurité, laissant beaucoup de temps pour trouver une solution en cas d'interruption de l'approvisionnement.

En outre, le combustible nucléaire peut provenir de plusieurs autres sources que l'uranium fraîchement extrait, par exemple des matières recyclées et du thorium. Le recyclage du combustible nucléaire est une caractéristique exceptionnelle qui distingue ce combustible des combustibles fossiles qui une fois brûlés sont pour la plus large part dispersés dans l'environnement sous forme de gaz ou de particules. Le combustible usé provenant du cycle du combustible sans retraitement contient des

matières fertiles qui peuvent être converties en plutonium fissile dans des réacteurs dont la conception s'y prête. L'actuel cycle du combustible nucléaire sans retraitement utilise principalement l' $^{235}\text{U}$  fissile qui constitue moins de 1 % de l'uranium naturel. La base de ressources peut être étendue d'environ 30 % en retraitant le combustible et en recyclant les matières fissiles sous forme de combustible MOX dans les réacteurs à eau ordinaire. Cette technique a été mise au point et utilisée assez largement en Europe et est en train d'être mise en place au Japon.

En convertissant le gros des ressources d'uranium en matière fissile dans les surgénérateurs à neutrons rapides, ou dans d'autres types de réacteurs avancés, il est possible de produire au moins 60 fois plus d'énergie à partir d'une quantité donnée d'uranium qu'avec le cycle actuel du combustible sans retraitement. Si l'on décidait de passer à ces types de réacteur et de cycle du combustible, les dépôts et/ou les stations d'entreposage de combustible usé pourraient se transformer en une véritable mine de combustible nucléaire. C'est en partie pour cette raison qu'il est intéressant de préserver la possibilité de récupérer le combustible usé, le transformant ainsi d'un déchet en une ressource. Parce que ce type de cycles du combustible permettrait de valoriser au maximum une unité de volume de thorium ou d'uranium naturel, des minerais à bien plus faible teneur pourraient devenir rentables. L'énergie nucléaire pourrait ainsi devenir une source d'énergie à long terme qui pourrait satisfaire une grande partie de la demande mondiale croissante d'énergie. Cette capacité de recyclage contribue à augmenter encore la productivité et l'efficacité totale des ressources et ainsi à atteindre les objectifs de développement durable.

### ***Radioprotection***

La protection radiologique est indispensable pour que l'énergie nucléaire puisse être compatible avec un développement durable. Bien que les risques associés à la radioactivité fassent partie des dangers les plus étudiés parmi ceux auxquels est soumis l'homme, plusieurs facteurs augmentent la crainte suscitée par les rayonnements dans le public. Ils sont invisibles, mal connus, difficiles à comprendre et ont des effets probabilistes, ce qui pour le public est synonyme d'incertitude. Les rayonnements produits par les installations du cycle du combustible nucléaire demandent l'intervention de technologies complexes, sont contrôlés et réglementés par des institutions qui peuvent paraître éloignés de l'expérience locale. Cependant l'énergie nucléaire n'est pas la seule dans ce cas.

Depuis les débuts de l'industrie nucléaire, les pays de l'OCDE ont créé des infrastructures de radioprotection et notamment une législation, des compétences, une réglementation et une sensibilisation aux problèmes de sûreté radiologique [29]. Les principes sur lesquels se fondent le système et la démarche de radioprotection sont compatibles avec les objectifs du développement durable. Le niveau actuel et l'évolution des émissions radioactives des installations nucléaires et de la radio-exposition de la population et des travailleurs permet d'apprécier l'efficacité de ces systèmes.

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR), organisme non gouvernemental formé d'experts, rédige des recommandations relatives à la protection de la population contre les effets nocifs des rayonnements ionisants dont s'inspirent les pays dans leur réglementation nationale. Les dernières recommandations de la Commission dans ce domaine remontent à la publication 60 de la CIPR en 1991 [30].

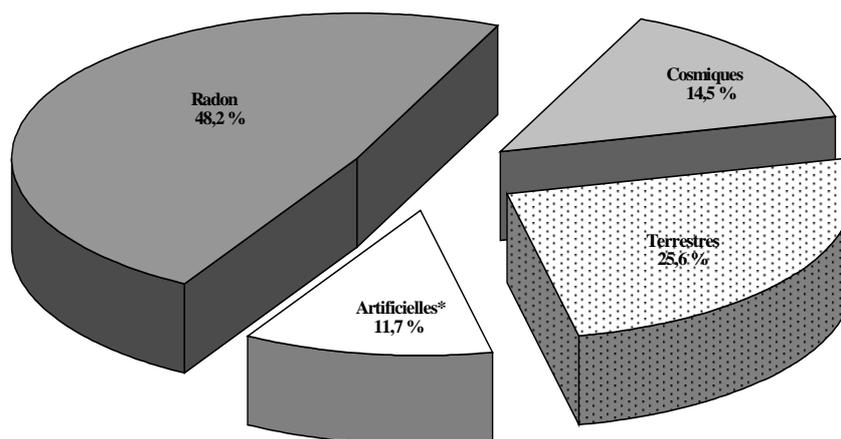
Comme l'indique la CIPR, l'objectif premier de la radioprotection est d'assurer un niveau de protection adéquat à l'homme sans limiter indûment les pratiques bénéfiques qui sont à l'origine de la radio-exposition. Les normes et les recommandations sont définies en cherchant à limiter par tous les moyens raisonnables les risques pour la santé suivant le principe de précaution mais non en tentant

complètement de les éliminer. La protection, en ce qui concerne les pratiques produisant une exposition, repose sur trois principes : justification de l'activité ; limitation, c'est-à-dire maintien des doses individuelles dans les limites réglementaires ; et optimisation, c'est-à-dire maintien des doses au niveau le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre (ALARA), compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

Les normes réglementaires de radioprotection s'appliquent aux activités humaines qui se traduisent par une exposition de la population et/ou des travailleurs. Les limites de dose définies pour ces activités sont de 1 mSv par an<sup>4</sup> pour les personnes du public et de 20 mSv par an pour l'exposition professionnelle. Il convient de rapprocher ces doses de la dose moyenne due à la radioactivité naturelle qui est d'environ 3 mSv par an, en notant toutefois que, dans la réalité, les chiffres varient énormément d'un lieu à l'autre. En effet, la variation du fond naturel de rayonnement est telle que des populations dans certaines régions peuvent être exposées à des doses atteignant jusqu'à 10 mSv par an, sachant que des petites fractions de la population peuvent même recevoir des doses naturelles encore plus élevées sans qu'aucun effet n'ait pu être décelé.

Figure 3.1 **Contribution moyenne des différentes sources naturelles et artificielles à l'exposition annuelle**

Source UNSCEAR, *Ionising Radiation Sources and Biological Effects*, 1994 [31]



\* Répartition des 11,7 % :  
11,3 % pour applications médicales et 0,4 % pour l'énergie nucléaire

Étant donné que la radioprotection professionnelle se conforme au principe ALARA, le public et la plupart des travailleurs ne reçoivent qu'un faible pourcentage des limites imposées par la réglementation dans le cadre des activités du secteur de l'énergie nucléaire. Le plus souvent, dans les populations vivant à proximité des centrales nucléaires, les doses annuelles imputables aux centrales qui sont reçues par les membres du public les plus exposés se situent entre 1 et 20 µSv [31, §146], soit 50 à 1 000 fois moins que la limite annuelle prescrite. Les doses reçues par les individus les plus exposés vivant à proximité des installations de retraitement se situent selon des estimations pessimistes entre 200 et 500 µSv [31, §146], soit moins de la moitié de la valeur limite annuelle prescrite pour le public. La dose annuelle moyenne reçue par les travailleurs pour l'ensemble des activités du cycle du combustible nucléaire tourne autour de 3 mSv [31, tableau 3], un chiffre

4. Comme un Sievert est une dose élevée, on utilise généralement le millisievert (mSv) ou le microsievert (µSv).

comparable à la radioactivité naturelle ou aux 2 à 3 mSv [31, §163] reçus par an par les équipages des avions du fait de leur exposition aux rayonnements cosmiques à de hautes altitudes.

La radio-exposition professionnelle dans les centrales nucléaires ainsi que dans les installations du cycle du combustible en général n'a cessé de diminuer au cours des dix dernières années au point que la dose collective annuelle reçue par réacteur en 1998 est inférieure à la moitié de ce qu'elle était en 1987 [32]. À l'heure actuelle, les doses engagées pour l'ensemble de l'industrie électronucléaire sont pour ainsi dire trois cents fois inférieures à la radioactivité naturelle, sachant en outre que les émissions radioactives par kWh ne cessent d'évoluer à la baisse [31]. En outre, de nouveaux progrès devraient être réalisés grâce à l'amélioration des procédures d'exploitation, aux modifications de la conception des centrales et aux innovations dans le cycle du combustible.

La radioprotection est un domaine dynamique bénéficiant en permanence des travaux de R&D. La recherche consacrée à la sensibilité biologique aux rayonnements pourrait permettre de mieux cibler les normes de protection. Parmi les autres domaines prometteurs, citons les études épidémiologiques et les recherches qui se poursuivent sur les effets de différentes sortes de rayonnement, de doses et débits de dose ; la synergie des rayonnements avec d'autres effets sanitaires et le rôle des rayonnements dans le processus à plusieurs étapes de la carcinogenèse [33]. La radioprotection progressera en outre grâce aux innovations en matière d'instrumentation et de gestion des rayonnements sur le lieu de travail.

S'agissant de la radioprotection, les craintes suscitées dans le public semblent davantage associées aux institutions et aux processus et moins en fait aux risques et aux dangers à proprement parler, que pour d'autres sources d'énergie ou activités industrielles. Il convient donc d'examiner la dimension sociale de ces craintes. Parmi les facteurs qui influent sur la réaction du public, citons les avantages escomptés des activités produisant le supplément de dose reçue, la nécessité de ces activités, leurs avantages par rapport à d'autres sources d'énergie et le contrôle qu'il peut avoir sur la décision [34]. Les politiques et les procédures sont des facteurs déterminants à cet égard bien que la formation et l'information sur les dangers des rayonnements, le régime de radioprotection et les risques en général jouent aussi un rôle important. Il sera peut-être nécessaire, selon les circonstances, de prévoir des procédures qui accordent une place égale à deux types de critères sans sacrifier ni l'un ni l'autre : la nature scientifique des risques en jeu et le droit démocratique des citoyens de participer aux décisions qui les concernent et de voir leurs préoccupations légitimes prises en considération.

### *Sûreté*

Si l'énergie nucléaire doit jouer un rôle dans les politiques du développement durable, les effets sanitaires et environnementaux des installations nucléaires et du transport des matières nucléaires, qui sont infimes dans les conditions de fonctionnement normal, doivent rester inférieurs à des limites socialement acceptables même en cas d'accident. En d'autres termes, il faut que la probabilité d'un accident grave se traduisant par des rejets hors site soit très faible et que les conséquences de ces rejets, le cas échéant, soient limitées. Dans les pays de l'OCDE, les centrales nucléaires et les installations du cycle du combustible nucléaire, dont le fonctionnement est contrôlé par des autorités de sûreté indépendantes et compétentes qui s'appuient sur un ensemble solide de législations, de réglementations et de normes, sont parvenues à un bon niveau de sûreté.

La quantité de combustible qui doit être transportée pour produire de l'électricité nucléaire est faible grâce à la densité d'énergie élevée du combustible nucléaire. Néanmoins, pour transporter le combustible nucléaire depuis et jusqu'aux centrales nucléaires, un conditionnement approprié est indispensable, de même que des mesures réglementaires pour protéger l'homme et l'environnement

des dangers des rayonnements. La sécurité physique des substances sensibles doit aussi être assurée. Des règlements destinés à assurer la sûreté du transport des matières radioactives ont été publiés pour la première fois par l'AIEA en 1961 et sont révisés et mis à jour en permanence. Ce régime réglementaire s'est révélé efficace à en juger par les résultats engrangés au cours des trente dernières années au cours desquelles on n'a enregistré aucun cas de dommages physiques importants produits par la radioactivité par suite du transport de matières radioactives civiles.

Dans la mesure où les installations nucléaires, et en particulier les réacteurs, sont des systèmes complexes comportant un large inventaire de matières radioactives, ils peuvent causer des dommages importants et nécessitent donc des systèmes de sûreté très complets. La sûreté du réacteur repose sur le principe technique fondamental de la défense en profondeur consistant à mettre en place cinq barrières successives. L'application rigoureuse de ce concept dans les centrales nucléaires a abouti à la mise en place d'un certain nombre de systèmes de contrôle-commande et de protection, dont des systèmes de sauvegarde redondants, actifs et passifs. En outre, à divers stades de la phase initiale d'une séquence accidentelle, un système de protection du réacteur interviendra pour interrompre la réaction en chaîne et l'homme interviendra également pour prendre d'autres mesures pour éviter l'accident.

On estime que le risque de voir un accident aboutir à un endommagement du cœur est inférieur à  $10^{-4}$  par année-réacteur pour les réacteurs en exploitation dans les pays de l'OCDE. Compte tenu des mesures de confinement ainsi que des mesures de gestion et de mitigation des accidents graves, la probabilité d'un rejet important de radioactivité à l'extérieur de la centrale devrait encore être inférieure d'au moins un facteur 10. Il s'ensuit pour tout individu vivant à proximité de centrales existantes un risque inférieur à  $10^{-5}$  par an. Depuis le milieu des années 80, des améliorations apportées à la conception des installations et aux procédures d'exploitation ont permis d'abaisser sensiblement le risque d'accident, et les indicateurs de la sûreté des réacteurs ainsi que de la radioprotection ne cessent de s'améliorer.

Il s'agit, pour les nouveaux modèles de réacteurs, d'abaisser le risque d'un facteur 10 par rapport aux modèles en service [35]. La prévention et la mitigation des accidents seront améliorées toutes deux. La prévention des accidents sera renforcée en réduisant la fréquence des défaillances d'équipements et des erreurs humaines grâce à de meilleures interfaces homme-machine, un recours plus important aux technologies de l'information et à des systèmes de protection auto-testables. La diminution des conséquences des accidents sera améliorée en introduisant des dispositifs spécifiques pour les accidents graves qui élimineront pour ainsi dire les forts rejets de radioactivité au cours des premières phases des accidents et, de ce fait, limiteront les conséquences hors site de sorte que les plans d'urgence hors site, y compris l'évacuation du public, ne seront pas nécessaires, même dans le cas d'un accident comportant un fort endommagement du cœur.

La conception et la qualité de construction du réacteur, associées à des pratiques d'exploitation sûres, ne suffisent pas à assurer la sûreté. Les analyses des causes et conséquences des deux accidents nucléaires qui se sont produits, à Three Mile Island aux États-Unis en 1979 et à Tchernobyl en Ukraine en 1986, ont permis d'améliorer sensiblement la sûreté des réacteurs. En particulier, ils ont mis en évidence la nécessité de prêter une plus grande attention aux facteurs humains, notamment à la formation et aux procédures prévues pour les opérateurs, et ont révélé en outre l'importance de la culture de sûreté.

La culture de sûreté signifie qu'on donne une priorité absolue aux problèmes de sûreté, à tous les niveaux : législation nationale au sommet, puis procédures réglementaires, responsables de l'organisation de l'exploitation et, enfin, chaque individu susceptible d'influer sur la sûreté. La culture de sûreté implique aussi d'assurer la remontée de l'expérience d'exploitation de la base au sommet, de tirer des enseignements de l'expérience de l'ensemble de l'industrie nucléaire et de comprendre les

causes premières des incidents pouvant aboutir à des accidents. L'indépendance des autorités de sûreté revêt à cet égard une importance primordiale. Elles mettent au point des méthodes pour évaluer la culture de sûreté dans les organisations en service ainsi que des outils pour intervenir rapidement pour corriger les défaillances [36].

Le contrôle réglementaire est destiné avant tout à s'assurer que l'état du réacteur n'évolue pas jusqu'au stade où l'intégrité des barrières de sûreté est menacée. Si les autorités de sûreté ont des raisons de penser qu'il en est autrement, le réacteur ne sera pas autorisé à fonctionner. Les gouvernements ont pour responsabilité de veiller à ce qu'une législation efficace existe et que les instances de sûreté sont indépendantes, compétentes et possèdent les ressources indispensables pour remplir leur mission. Même s'il incombe au premier chef à l'exploitant de l'installation de veiller à sa sûreté, les autorités de sûreté jouent un rôle essentiel puisqu'elles vérifient que l'exploitant se conforme aux normes acceptées. Elles doivent avoir les pouvoirs et les moyens de mettre en œuvre les mesures de sûreté, y compris de fermer les centrales si nécessaire. Les autorités de sûreté, les exploitants et les gouvernements doivent se méfier des attitudes complaisantes pouvant les amener à accorder une moindre priorité à la sûreté, surtout à une époque où les réacteurs vieillissent et où les pressions de la concurrence se renforcent.

Il faut par ailleurs en venir à procéder à une évaluation comparative des risques et des avantages des diverses activités humaines de manière à parvenir à une répartition optimale des ressources dans une perspective de développement durable. Le public a en effet tendance à s'inquiéter davantage des événements à faible probabilité et à conséquence importante que d'événements plus probables mais dont les conséquences sont plus minimales, même si en fin de compte les effets cumulés des derniers sont beaucoup plus importants [37]. Ainsi, les accidents d'avion attirent davantage l'attention que les accidents de la circulation dont les victimes sont beaucoup plus nombreuses. L'acceptabilité des risques varie aussi énormément selon des facteurs, comme le degré de participation et de contrôle, les avantages, les incertitudes pesant sur la probabilité et les conséquences des événements, la confiance dans les institutions concernées, la connaissance des risques, la crainte des conséquences [38]. Une approche globale et cohérente de la gestion des risques contribuerait à accroître l'efficacité des mesures et systèmes de contrôle, ainsi que la sûreté nucléaire.

La concurrence et la privatisation s'intensifiant, les gouvernements abandonnent petit à petit un rôle qu'ils assumaient traditionnellement, le financement de la R&D nucléaire. Dans la mesure où l'on peut considérer que la recherche sur la sûreté nucléaire est un bien public, à l'instar de la recherche sur la sûreté dans d'autres domaines comme l'alimentation, la médecine et la qualité de l'air, les gouvernements doivent envisager de maintenir un certain niveau d'aide pour cette R&D. La coopération internationale dans le domaine de l'exploitation, de la réglementation et de la recherche sur la sûreté est un moyen efficace de partager les coûts et les installations. La coopération internationale sur les problèmes de sûreté est essentielle pour assurer de hauts niveaux de sûreté dans le monde entier, surtout si l'énergie nucléaire doit être utilisée dans un nombre croissant de pays.

### ***Responsabilité civile***

Le régime de responsabilité civile nucléaire est unique et répond à un certain nombre de problèmes qui relèvent du développement durable. Alors que l'assurance classique concerne des événements à forte probabilité mais à faible conséquence, le régime instauré pour l'énergie nucléaire s'applique à des événements de faible probabilité mais aux conséquences importantes. On réclame de plus en plus que les régimes d'assurance couvrent des dommages d'échelle comparable provoqués par des catastrophes environnementales et naturelles, qui sont devenus très coûteux ces dernières années.

Bien que les normes de sûreté élevées de l'industrie nucléaire se traduisent par un très faible risque d'accident, l'ampleur des dommages qui pourraient être causés aux tiers par suite de cet accident peut être considérable. On a donc été convaincu dès la naissance de l'industrie nucléaire qu'il était nécessaire de créer un régime juridique spécial pour indemniser les victimes des accidents nucléaires ; les règles ordinaires de la législation délictuelle et contractuelle n'étaient simplement pas adaptées pour traiter de manière efficace et rationnelle ce type de situation.

Si la législation ordinaire s'appliquait, les victimes d'un accident nucléaire auraient probablement beaucoup de mal à trouver laquelle des nombreuses entités éventuellement en cause est véritablement responsable des dommages causés. En outre, si le montant des réparations dues par l'entité responsable n'était pas plafonné, celle-ci ne pourrait se couvrir financièrement, par exemple auprès des assurances, contre ce risque. De surcroît, les principes de comptabilité sont tels que les exploitants des installations nucléaires et les fournisseurs des biens et services du secteur ne peuvent absolument pas provisionner dans leur livre des charges susceptibles d'être aussi lourdes, même si un accident nucléaire grave est très improbable.

Les régimes de responsabilité civile nucléaires sont le fruit de la conciliation de plusieurs objectifs : fournir une protection suffisante au public contre des dommages éventuels ; garantir que le développement de l'industrie nucléaire, dont ce même public bénéficie, sera protégé contre des charges excessivement lourdes, mobiliser les ressources du marché international des assurances afin de garantir l'existence des fonds nécessaires pour faire face à d'éventuelles demandes d'indemnisation très lourdes ; et enfin, veiller à ce que les mécanismes d'indemnisation et de responsabilité soient adaptés à la nature transfrontière des dommages nucléaires. On a ainsi abouti à un système, inscrit aussi bien dans les régimes nationaux qu'internationaux, qui repose sur les principes suivants : responsabilité objective et exclusive de l'exploitant nucléaire ; limitation de la période et du montant de la responsabilité de l'exploitant ; et obligation faite à l'exploitant nucléaire de constituer une garantie financière pour faire face à sa responsabilité.

Les régimes nationaux sont mis en place par le biais de la législation dans la plupart des pays Membres de l'OCDE et progressivement dans les pays non-membres. Les régimes internationaux actuels sont définis par les conventions suivantes : la Convention de Paris sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire de 1960, conclue sous les auspices de l'OCDE, dont les parties contractantes sont 14 pays d'Europe occidentale Membres de l'OCDE, et la Convention de Vienne relative à la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires de 1963, conclue sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie atomique, qui est de portée mondiale et qui compte parmi ses parties contractantes quatre pays Membres de l'OCDE. Ces deux Conventions sont reliées par un protocole commun.

Après l'accident de Tchernobyl, la communauté nucléaire internationale a estimé que les régimes spéciaux mis en place dans les années 60 avaient besoin d'être profondément remaniés afin d'accroître la protection des victimes et de promouvoir un régime mondial qui recueille l'adhésion de tous les pays. Les efforts entrepris dans ce sens ont abouti à l'organisation d'une conférence diplomatique de 1997 qui a produit la Convention sur la réparation complémentaire des dommages nucléaires ainsi que le Protocole d'amendement de la Convention de Vienne. Par ailleurs, les travaux de révision de la Convention de Paris devraient s'achever en 2001. Une adhésion généralisée à ces instruments contribuera grandement à internaliser entièrement les coûts des accidents nucléaires et à refléter les objectifs du développement durable.

Le niveau de responsabilité imposé aux exploitants nucléaires par les législations nationales varie considérablement d'un pays Membre de l'OCDE à l'autre. Ces variations s'expliquent par les différentes limites définies par les deux Conventions internationales, l'importance que revêt l'énergie

nucléaire dans la production d'électricité des pays ainsi que d'autres facteurs politiques et économiques. Il convient de noter également que plusieurs pays Membres ont adopté des législations nationales prévoyant une responsabilité illimitée de leurs exploitants nucléaires pour les dommages causés, assortie toutefois de garanties financières correspondantes qui sont nécessairement limitées.

Les adversaires de la limitation de la responsabilité de l'exploitant font remarquer que celui-ci bénéficie en quelque sorte d'une subvention lorsqu'il n'a pas à faire face au coût total de l'accident, de sorte que son intérêt à veiller à la sécurité est moindre, ce qui se traduit par une plus forte probabilité d'accident. Concernant la sécurité, les gouvernements ont objecté que l'exploitant et le personnel d'exploitation ont un intérêt personnel à assurer la sûreté de l'installation et que l'exploitant est strictement contrôlé par un organisme compétent indépendant.

### *Gestion des déchets radioactifs*

Sous l'angle du développement durable, la gestion des déchets doit permettre d'assurer le confinement et le stockage à l'aide de méthodes qui permettront de réduire au minimum les effets nocifs sur l'être humain et l'environnement à tout moment. Les déchets radioactifs peuvent avoir une vie longue ou courte selon leur taux de décroissance. Le principal problème auquel est confrontée l'énergie nucléaire est celui des déchets à vie longue qui restent dangereux pendant de très longues périodes. Néanmoins, les déchets radioactifs ne sont pas les seuls à être dans ce cas. D'autres types de déchets toxiques, comme les métaux lourds, restent dans la biosphère indéfiniment ou ont un impact suffisamment important à court terme pour que celui-ci se prolonge à l'infini. Les déchets issus de l'utilisation de l'énergie nucléaire ne représentent que de petits volumes, généralement moins de 1 % de la totalité des déchets toxiques dans les pays dotés d'un programme nucléaire et peuvent en outre être isolés de la biosphère à des coûts supportables avec les techniques existantes.

Le coût estimé de la gestion et de l'évacuation des déchets représente quelques pour cent de la totalité des coûts de production de l'électricité d'origine nucléaire [21]. Ce coût est pris en compte par les producteurs d'électricité nucléaire et répercutés sur les consommateurs ; en d'autres termes, il est internalisé. Dans la plupart des pays de l'OCDE, les fonds nécessaires au financement des dépôts sont réunis en prélevant cette somme sur les consommateurs de l'électricité dont la production a engendré ces dépôts. Les fonds accumulés et mis de côté seront ensuite utilisés, lorsque nécessaire, pour couvrir les frais de stockage des déchets. Même si le coût total de gestion et d'évacuation des déchets est relativement élevé en valeur absolue, il n'augmente pas sensiblement les coûts de l'électricité d'origine nucléaire, lorsqu'il est réparti sur l'énorme quantité d'électricité produite.

Les matières légèrement contaminées ou les matières dont la contamination radioactive est de relativement courte durée, c'est-à-dire en fait les matières qui représentent le gros des déchets radioactifs, constituent un danger assez faible. Tous les pays de l'OCDE traitent, transportent et entreposent ces déchets couramment, et les méthodes de gestion et de stockage sont bien établies. Leur radioactivité décroît et tombe en quelques centaines d'années au niveau de la radioactivité naturelle, de sorte qu'elle n'est à l'origine d'aucun problème sanitaire ou environnemental important. Ces matières peuvent être placées dans des dépôts de surface ou subsurface qui sont en service déjà dans de nombreux pays Membres et non-membres de l'OCDE. On a tendance à réduire le volume de ce type de déchets par unité d'électricité produite afin d'abaisser les coûts et de diminuer les charges environnementales [39].

Les activités d'extraction et de traitement de l'uranium produisent des résidus, qui sont relativement peu radioactifs pendant de très longues périodes et occupent de nombreux hectares. Les résidus sont de volume équivalent, selon la qualité du minerai, à ceux d'autres activités minières.

L'évaluation des pratiques actuelles en matière de résidus dans les installations autorisées des pays de l'OCDE ont montré que ceux-ci peuvent être gérés efficacement sur de très longues périodes en entraînant un minimum d'effets sanitaires et environnementaux à long terme. Les futurs projets d'extraction d'uranium dans les pays de l'OCDE seront soumis à un examen environnemental minutieux avant d'être autorisés [40].

Les déchets à vie longue, essentiellement des déchets de haute activité solidifiés ayant subi un retraitement, ou le combustible usé dans les pays qui ont décidé de ne pas le recycler ne représentent qu'une petite portion de l'ensemble des déchets. Le volume de combustible usé produit chaque année dans le monde est de l'ordre de 10 000 tonnes. Les déchets de haute activité peuvent rester dangereux pendant des milliers d'années et doivent donc être isolés de l'environnement sur des périodes équivalentes. Néanmoins, la période pendant laquelle le dégagement de radioactivité est le plus intense et la production de chaleur la plus forte est courte. En effet, la radioactivité décroît rapidement au début, rendant la manutention, les traitements complémentaires et le stockage plus faciles à mesure que le temps passe. Dans les pays de l'OCDE dotés d'un programme électronucléaire, le combustible usé ainsi que les déchets à vie longue produits dans des installations autorisées sont entreposés dans des piscines sûres et fiables ou dans des conteneurs de stockage à sec. Les déchets peuvent être placés dans des installations de stockage provisoires en toute sécurité et sans occasionner trop de frais pendant de nombreuses décennies.

Bien qu'il n'y ait pas de raisons environnementales, techniques ou économiques plaidant en faveur d'un stockage rapide, l'entreposage provisoire n'est pas une solution permanente, et le souci du développement durable, pour l'héritage transmis aux générations futures, commande de s'orienter vers le stockage final. Il est généralement admis que la meilleure solution pour isoler à long terme les déchets est de les enfouir dans des formations géologiques stables, concept qui remonte à plus de 40 ans. Ces dépôts sont conçus sur le principe des barrières multiples servant à isoler les déchets nocifs de la biosphère.

Les hypothèses utilisées pour évaluer la sûreté des dépôts ont été testées dans la nature. Il y a plus d'un milliard d'années au Gabon, un réacteur nucléaire naturel a fonctionné par intermittence pendant plusieurs millions d'années, modéré par un écoulement d'eau naturel à travers un dépôt de minerai d'uranium. Les produits de fission engendrés par ces réactions nucléaires ne se sont pas déplacés de plus de quelques centimètres de leur lieu d'origine [41]. De plus, d'autres phénomènes importants pour le stockage géologique, de natures aussi diverses que la corrosion des métaux, l'évolution des propriétés des argiles, la migration des matières dissoutes dans divers milieux, l'absorption chimique et le changement climatique à long terme, ont été étudiés dans des analogues naturels, permettant ainsi de vérifier nos connaissances sur des processus qui sont extrêmement lents ou d'une trop vaste envergure pour être directement mesurés en laboratoire ou *in situ*.

Les chercheurs et les experts estiment que les déchets nucléaires peuvent être maniés en toute sécurité et isolés de l'environnement pour des milliers d'années, si ce n'est plus, jusqu'au moment où ils deviendront inoffensifs. Les techniques de construction et d'exploitation des dépôts sont à présent suffisamment au point pour pouvoir être mises en œuvre, grâce à l'expérience acquise à l'échelle mondiale dans des laboratoires de recherche souterrains ou, comme c'est le cas dans plusieurs pays, dans des installations souterraines de stockage de déchets radioactifs où sont enfouis, entre autres, des déchets contenant des composés radioactifs à vie longue. Le premier dépôt géologique spécialement construit pour recevoir des déchets à vie longue, qui a été mis en service en mars 1999 aux États-Unis, fournira un retour d'expérience supplémentaire.

L'industrie nucléaire a accepté d'assumer la responsabilité à long terme qui lui revient, à savoir d'assurer le confinement de ses déchets tant qu'ils restent radioactifs. Elle a instauré des normes de

gestion des déchets à long terme à une époque où il était peu courant de voir d'autres secteurs travaillant avec des matières dangereuses le faire. Néanmoins, les déchets radioactifs inquiètent plus le public que la plupart des autres types de déchets toxiques qui, pourtant, requièrent aussi des politiques de gestion et de stockage appropriées [42]. La confiance du public dans la sûreté à long terme des déchets radioactifs n'est pas forcément aussi grande que celle de la communauté scientifique et technique. Les incertitudes liées inévitablement à des projections à des horizons éloignés de plusieurs milliers d'années amènent le public à considérer avec une certaine réserve l'engagement dans une voie dont les conséquences ne peuvent pas être pleinement appréciées.

Il faudra pratiquement un siècle pour trouver un site adapté au stockage de déchets de haute activité, concevoir et construire un dépôt, y enfouir les déchets et le fermer. Les dépôts dont la construction est actuellement envisagée ne devraient commencer à recevoir des déchets qu'en 2020 au plus tôt et resteront encore ouverts pendant de nombreuses décennies. Les déchets y seront donc récupérables, du moins pendant les phases initiales, voire même plus tard mais au prix d'un coût plus élevé. Le suivi et la surveillance de ces dépôts peuvent être poursuivis au-delà de la période de fermeture. Ce processus sera conduit en plusieurs étapes, chacune d'entre elles donnant l'occasion d'adopter des mesures réglementaires et de faire participer le public aux décisions. En particulier, on disposera du temps voulu pour mener de vastes réflexions avant de décider des étapes futures, notamment choisir le site. Il sera toujours possible de procéder à des changements ou de mettre à profit de nouvelles technologies. Cette démarche garantit que les générations futures auront tout loisir de faire leur propre choix.

Il convient d'adopter un cadre réglementaire strict et une démarche cohérente ponctuée d'étapes prédéfinies pour prendre des décisions après concertation avec le public. Comme pour d'autres projets sujets à controverse, il n'est pas réaliste de rechercher un soutien universel. En revanche, la société doit être sûre que toute décision adoptée a été mûrement réfléchie. Un processus décisionnel gradué doit permettre à tous les groupes concernés de s'exprimer sur les points qui les intéressent et doit comporter en outre des examens techniques rigoureux. Les informations techniques seront un élément essentiel de la discussion mais pas le seul. Politiquement, les préoccupations du public sont tout aussi essentielles dans le processus de décision sur la gestion des déchets à long terme que la confiance de la communauté scientifique. À terme, il revient au gouvernement de prendre des décisions qui reçoivent le soutien voulu du public tout en assurant un niveau de sûreté acceptable. Si les problèmes posés par la gestion des déchets radioactifs sont d'ordre sociaux et politiques, la solution, bien que reposant sur des bases scientifiques et technologiques solides, doit elle aussi être de nature sociale et politique. Le développement durable ne relève pas uniquement des sciences et de la technologie ; il implique aussi l'équité et la participation.

## **Dimension sociale**

Les dimensions humaines et sociales du développement durable comprennent le capital humain sous forme de savoir, d'éducation et d'emploi, de bien-être humain, d'équité et de participation, et le capital social sous forme d'institutions efficaces et d'associations bénévoles, du principe de l'État de droit et de cohésion sociale. De ces points de vue, l'énergie nucléaire, à l'instar d'un certain nombre de technologies avancées, se caractérise par une contribution nette au capital humain et social mais aussi par une difficulté à se faire accepter par le public compte tenu des perceptions très diverses des risques et des bénéfices qu'elle engendre.

## *Capital humain*

L'énergie nucléaire est une des grandes découvertes scientifiques du XX<sup>e</sup> siècle et une composante précieuse du capital intellectuel qui sera transmis aux générations futures. Elle a une assise scientifique et technologique solide. C'est une source d'énergie qui, plus que la plupart des autres, repose sur les connaissances davantage que sur les matières et, de ce fait, devrait pouvoir être perfectionnée grâce à l'amélioration de la collecte, du traitement et de la communication de l'information. Elle offre des emplois de haute technicité et des possibilités de créativité au niveau le plus haut. La science et la technologie nucléaires ont des interactions productives avec d'autres domaines comme la médecine, la robotique, les capteurs et les systèmes de contrôle-commande, les sciences des matériaux et les technologies de l'information.

Pour l'énergie nucléaire, le capital humain inclut une main-d'œuvre hautement qualifiée qui est essentielle pour la conception, la construction et l'exploitation d'installations complexes de l'ensemble du cycle du combustible, y compris l'extraction d'uranium et la gestion des déchets radioactifs, ainsi que pour les activités réglementaires et la R&D. Ces compétences sont un élément essentiel de l'éventail complet des ressources scientifiques et technologiques d'une société moderne. Le renouvellement de ce capital humain et de la capacité de recherche et de développement du secteur nucléaire permettra à l'énergie nucléaire de continuer à apporter sa part de connaissances scientifiques et de développements technologiques dans le cadre et au-delà du cycle du combustible nucléaire.

Il a fallu de vastes programmes de R&D pour créer une source d'électricité compétitive à partir d'une découverte capitale de la science fondamentale. D'après les statistiques publiées par l'AIE, les budgets publics dégagés pour la R&D sur la fission nucléaire dans les pays Membres de l'AIE entre 1974 et 1995 ont représenté dans leur ensemble entre 4 et 9 milliards d'USD par an [43]. L'énergie nucléaire a à présent atteint la maturité industrielle, et la R&D destinée à améliorer l'exploitation des réacteurs actuellement en service peut être prise en charge par l'industrie ou même réduite quelque peu. Néanmoins, si l'on veut que l'énergie nucléaire puisse efficacement contribuer aux objectifs du développement durable, il faudra probablement effectuer de la R&D orientée sur le plus long terme. Les gouvernements pourront fournir une aide financière en particulier à la R&D nécessaire pour parvenir à des objectifs de politique générale dans des domaines comme la sûreté, la réglementation et l'impact sur l'environnement, et notamment la gestion des déchets. La coopération internationale dans ces domaines permet d'utiliser plus efficacement les ressources humaines et financières ainsi que les installations.

## *Cadre institutionnel*

Le cadre institutionnel créé autour des activités nucléaires pacifiques est unique à bien des égards. La fission nucléaire a été découverte en 1939, et les armes nucléaires ont été la première application importante de cette découverte. Compte tenu des implications pour la sécurité nationale, les gouvernements des pays qui ont mis au point les applications pacifiques de l'énergie nucléaire ont agi aux niveaux politiques les plus hauts en faisant appel à des institutions spécialisées. Dans les États dotés d'armes nucléaires, ces institutions avaient souvent des objectifs militaires et civils à la fois. Les institutions nucléaires nationales ont habituellement précédé la création d'organismes consacrés à l'énergie dans son ensemble. Il en est de même au niveau international, puisque la création de l'AIEA et de l'AEN a précédé de plusieurs années celle de l'AIE et d'autres organes s'occupant de l'énergie dans un contexte plus large. Aujourd'hui encore, l'énergie nucléaire est un domaine généralement examiné par les plus hautes autorités de l'État dans la plupart des pays.

L'ensemble des institutions spécifiquement nucléaires bénéficiant d'un financement séparé et, dans bien des cas, épaulées par des laboratoires nationaux spécialisés a, au départ, favorisé le développement d'une énergie nucléaire correspondant aux objectifs recherchés par les pouvoirs publics. Néanmoins, rétrospectivement, cet isolement des institutions nucléaires a peut être nui à l'intégration de cette source d'énergie à la panoplie d'options envisagées dans le cadre du débat général sur la politique énergétique. En outre, la situation protégée de l'industrie nucléaire n'a pas facilité son adaptation à temps à la concurrence du marché. De surcroît, l'image du nucléaire dans le public a pâti de l'impression de secret engendrée par la séparation des institutions nucléaires des autres organismes publics.

Les premières institutions nucléaires n'étaient pas dans la plupart des cas indépendantes, étant donné que la sécurité nationale l'emportait à l'époque sur la sûreté et la protection de l'environnement. Les activités qui n'ont pas été administrées de manière indépendante et adéquate ont été à l'origine de nombre des problèmes de sûreté et d'environnement les plus graves rencontrés par l'industrie nucléaire. Même si l'exploitant est au premier chef responsable de la sûreté, un appareil réglementaire indépendant et efficace, soutenu par une législation solide, est primordial pour la sûreté nucléaire et la culture de sûreté. Il contribue également à développer la confiance dans l'énergie nucléaire.

Les autorités de sûreté indépendantes mises en place contribuent beaucoup à assurer la réalisation des activités nucléaires conformément à des normes de protection radiologique et de sûreté élevées. Dans les pays de l'OCDE, les autorités de sûreté nucléaire sont parvenues à des niveaux de compétence élevés et à une grande indépendance et ont contribué aux résultats actuels, généralement excellents, en matière de sûreté des réacteurs, de gestion des déchets et de radioprotection. Il est peut-être plus facile d'avoir des autorités de sûreté efficaces dans les systèmes démocratiques où la législation votée par un Parlement élu définit des normes de sûreté acceptables pour le public et où les institutions sont plus susceptibles d'être fiables et de conquérir la confiance du public. Il est indispensable de préserver des autorités de sûreté efficaces et indépendantes si l'on veut que l'énergie nucléaire contribue aux politiques de développement durable, de même qu'il faut encourager les pays non-membres de l'OCDE à se doter d'une réglementation adéquate.

Dans la plupart des pays ayant des activités nucléaires, il existe des textes législatifs stricts pour assurer la santé, la sûreté et la sécurité des travailleurs et du public ainsi que la protection de l'environnement. Néanmoins, tous les pays ne sont pas dotés d'une législation nucléaire complète, et même lorsque les textes législatifs incorporent explicitement les objectifs de développement durable, il peut y avoir des lacunes dans la mise en œuvre de ces prescriptions. Les autorités de sûreté nucléaire ont besoin de ressources, de pouvoirs juridiques et d'incitations au respect de la législation suffisants pour pouvoir veiller à l'application de la réglementation relevant de leurs compétences. Il faudra concevoir, réglementer et financer les institutions destinées à gérer à long terme les déchets nucléaires avec la plus grande attention.

### ***Non-prolifération***

Si l'on veut que l'énergie nucléaire concoure à la réalisation des objectifs du développement durable, elle ne doit pas contribuer à la prolifération des armes nucléaires. Les dirigeants politiques et le public craignent que des matières nucléaires sensibles, en particulier le plutonium et l'uranium hautement enrichi, de même que la technologie et l'équipement mis au point et utilisés dans le cadre d'activités civiles ne soient détournés et employés à des fins militaires ou terroristes. Néanmoins, ce ne sont pas uniquement les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire qui sont à l'origine du risque de prolifération des armes nucléaires de sorte que l'abandon de cette énergie n'entraînerait pas la disparition de ce risque.

Il faut considérer la menace de prolifération dans le contexte politique de la sécurité internationale et du rôle stratégique d'ensemble des armes nucléaires. Le défi politique à relever consiste avant tout à améliorer les relations internationales, et de mieux faire comprendre les conséquences de la guerre nucléaire jusqu'à ce que les pays ne voient plus dans ces armes des instruments légitimes de défense ou de diplomatie. Avec la fin de la guerre froide, le risque d'un conflit nucléaire entre les superpuissances a diminué. Les pays isolés, confrontés à des ennemis et pays puissants dans des régions où les tensions sont fortes, seront probablement ceux qui seront les plus susceptibles d'être séduits par ces armes. En trouvant d'autres solutions à leurs problèmes de sécurité, on réduira peut-être leur tentation de les acquérir.

Le traité de non-prolifération des armes nucléaires de 1970 est le principal instrument mis en place pour décourager la production ou le détournement de matières à usage militaire. Ce traité engage 187 pays et incite explicitement les États non dotés d'armes nucléaires à recevoir les bénéfices de la technologie nucléaire pacifique en échange de leur consentement à renoncer aux armes nucléaires. Le respect des engagements ainsi contractés est contrôlé par un régime international de garanties, régi par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Grâce à son système de garanties, l'AIEA peut s'assurer que les activités nucléaires des États non dotés d'armes nucléaires, parties au traité de non-prolifération, sont exclusivement utilisées à des fins pacifiques. La plupart des pays sont parties à ce traité et acceptent que leur programme nucléaire soit soumis aux contrôles prévus dans le cadre du régime international des garanties. L'efficacité des contrôles a été renforcée récemment afin que l'AIEA soit en mesure d'assurer avec certitude que des matières nucléaires déclarées n'ont pas été détournées et d'attester que des matières et des activités nucléaires non déclarées n'existent pas.

Les techniques de construction de base des armes nucléaires sont assez largement connues bien que de nombreux aspects de la production des matières fissiles et des armes soient encore soigneusement protégés. Si un pays a la volonté politique et les fonds nécessaires, il sera capable de fabriquer des armes à partir du moment où il dispose du savoir-faire industriel et scientifique adéquat. Il suffit d'une décision politique pour qu'un pays puisse acquérir des armes nucléaires indépendamment de tout programme nucléaire civil. En fait, dans le passé, la plupart des États dotés d'armes nucléaires les ont acquises avant même de mettre au point les applications pacifiques de l'énergie nucléaire. Ils ont utilisé des installations et un personnel spécialisés à des fins militaires, notamment pour produire les matières fissiles adaptées à la fabrication d'armes, plutôt que de se lancer dans des programmes électronucléaires civils.

Il faut surmonter un certain nombre de difficultés techniques pour pouvoir utiliser un programme électronucléaire pour se procurer les matières permettant de fabriquer des armes. En particulier, le plutonium provenant du combustible qualité réacteur produit dans les conditions normales de fonctionnement des centrales est beaucoup moins adapté à la fabrication d'armes que celui qui provient des installations spéciales et dont le taux de combustion est faible. En outre, dans les pays qui ont signé les accords de garanties généralisées, toutes les installations nucléaires sont tenues de respecter les engagements concernant l'utilisation pacifique du nucléaire et sont contrôlées par des instances internationales. Les programmes électronucléaires civils régis par les garanties internationales ne se prêtent guère à la fabrication clandestine d'armes, dans la mesure où tout détournement de matières soumises aux garanties aurait de fortes chances d'être détecté. Le pays qui prend la décision politique de se lancer dans un programme militaire utilisera vraisemblablement des installations spécialisées, et probablement clandestines, sous contrôle militaire.

Les installations de recherche et les installations mettant en œuvre de l'uranium fortement enrichi ou du plutonium séparé sont aussi soumises à des contrôles, étant donné que ces matières fissiles peuvent être utilisées pour fabriquer des armes nucléaires. Les technologies permettant d'enrichir l'uranium ou de séparer le plutonium sont jugées sensibles parce qu'elles aussi peuvent servir à

fabriquer des armes. Elles sont utilisées par un nombre limité de pays. L'enrichissement de l'uranium fait appel à un procédé physique complexe pour séparer les différents isotopes de la même espèce chimique. Le plutonium qui est produit dans les réacteurs nucléaires peut être séparé chimiquement du combustible usé, par le biais d'un procédé plus facile à mettre en œuvre mais non dénué de difficultés techniques et de dangers. En règle générale, les technologies à « double usage » qui peuvent avoir des applications critiques aussi bien dans le secteur civil que militaire doivent aussi être soigneusement surveillées. Ces techniques doivent faire et font l'objet d'une grande attention du régime international de non-prolifération. La surveillance de ces activités « à double usage » ainsi que d'autres activités sensibles est aussi effectuée par des moyens techniques nationaux.

Tout comme les programmes électronucléaires doivent être sûrs dans l'ensemble de la planète, ils doivent être protégés contre toute menace de prolifération. En dépit de nettes améliorations, des craintes demeurent au sujet de l'efficacité des contrôles réalisés sur les matières pouvant servir à la fabrication d'armes nucléaires dans certains pays, du trafic de matières fissiles, de la possibilité que certains pays se livrent à des activités clandestines en violation des engagements qu'ils ont pris dans le cadre du traité de non-prolifération ainsi qu'au sujet des activités des pays qui n'ont pas adhéré à ce traité. La communauté internationale doit continuer à s'employer à éviter et décourager tout détournement de matières sensibles. Il s'agit là d'un objectif essentiel du développement durable dont la réalisation doit être assurée grâce à des mesures des pouvoirs publics et aux progrès technologiques, par exemple des modèles de réacteurs et des procédés du cycle du combustible intégrant des critères de non-prolifération y compris les garanties. La Convention sur la protection physique des matières nucléaires et le programme de l'AIEA, destinés à prévenir les commerces illicites se révèlent déjà des outils efficaces dans ce domaine.

### *Participation du public et aspects politiques*

La participation du public à la définition des politiques et son acceptation des procédures et décisions sont des conditions essentielles pour réaliser les objectifs sociaux du développement durable, en termes d'équité et de transparence. Dans les démocraties, il revient aux décideurs de se pencher sur les préoccupations du public et sur les aspects politiques des projets et des mesures. Pour l'énergie nucléaire, comme pour un certain nombre d'autres techniques, la plupart des craintes proviennent de la manière dont le public perçoit les risques en jeu. Pour parvenir à rendre l'énergie nucléaire acceptable, il faudra comprendre la perception des risques et la communication en la matière et en outre créer des mécanismes et des institutions qui permettent une plus grande participation du public. Même si cette participation peut freiner momentanément l'utilisation de l'énergie nucléaire, elle est la clef de l'acceptation sociale indispensable pour qu'une technologie contribue efficacement au développement durable.

L'évaluation et la gestion du risque et la communication correspondante forment une discipline qui est encore en pleine évolution. Au départ, on pensait que les divergences fréquentes entre la perception du risque par les experts et le public provenait du fait que les experts avaient raison et que le public avait tort parce qu'il manquait de connaissances et d'informations sur ces risques. Il s'agissait donc d'éduquer le public afin qu'il puisse comprendre les risques et par là même tomber d'accord avec les experts. Plus récemment, certains ont affirmé que le public n'avait pas tort et qu'il fallait traiter ses préoccupations en se plaçant de son point de vue [44]. Il ne faut pas se contenter d'informer le public mais il faut aussi savoir dialoguer et le faire participer.

La diffusion d'informations exactes est essentielle mais ne semble pas suffisante à elle seule. La communication est un échange, et la confiance accordée au processus de communication semble souvent plus importante que la présentation de données spécifiques sur des problèmes techniques.

Une information péremptoire peut être offensante si elle implique que l'audience doit recevoir cette information en toute confiance et se dire que ses craintes ne sont dues qu'à son ignorance. En outre, même s'il est essentiel de comparer les différentes options disponibles pour prendre de bonnes décisions, faire remarquer que d'autres activités peuvent être à l'origine de bien plus grands maux n'inspire pas en soi véritablement confiance ; en effet, la comparaison des risques dans un contexte de polémique peut être assimilée à une volonté de banaliser les anxiétés et de cacher les problèmes. Le cadre et les critères de comparaison doivent être acceptés pour que les résultats de celle-ci soient crédibles. Le rôle des pouvoirs publics est déterminant sur des dossiers aussi sensibles.

De nombreux facteurs influent sur la manière dont les risques sont perçus. En premier lieu, la perception n'est pas la même lorsque le risque est librement choisi ou imposé. Des risques choisis, par exemple ceux liés à la conduite d'une voiture, sont beaucoup plus facilement acceptés que ceux que l'on estime imposés (cas de l'énergie nucléaire) [45]. En deuxième lieu viennent les avantages perçus qui contrebalancent le risque. Dans le cas de l'énergie nucléaire, les avantages sont extrêmement diffus et jugés atteignables par d'autres moyens. L'énergie nucléaire n'est pas un bien de consommation ou une activité qui engendre un attachement à une marque, comme une voiture, ou qui donne aux gens une impression de participation, comme les fenêtres à haute efficacité énergétique. Souvent, le nucléaire est une composante ignorée du parc de production d'électricité de sorte que les risques qu'on lui attribue semblent plus immédiats et considérables que ses avantages. Lorsque les besoins et les avantages sont clairement établis ou lorsque les installations nucléaires sont familières et considérées comme bien gérées, les risques tendent à être mieux acceptés.

On estime aussi que les risques nucléaires sont plus graves que les risques liés à d'autres énergies comme le changement climatique ou même la pollution de l'air local. Un éventuel accident dans une centrale nucléaire ne compromettra pas obligatoirement l'avenir à long terme de la planète Terre mais on considérera qu'il a un impact négatif très direct sur la vie de la population avoisinante. Si l'impression prévaut qu'un projet présente avant tout un risque pour la communauté, il y a peu de chance que les messages s'y rapportant soient bien reçus. L'annonce de l'implantation envisagée d'une centrale nucléaire n'est peut être pas le moment le plus propice pour commencer à informer la population de la région sur le nucléaire. Il est important que l'information soit permanente et que le processus de décision laisse le temps et donne l'occasion de conduire un dialogue approfondi. La crédibilité ne s'acquiert pas rapidement. En revanche, une fois perdue, elle est difficile à rétablir.

Parmi les autres facteurs qui ont une incidence sur la perception des risques, citons le degré de contrôle, la connaissance de la technologie, le niveau d'incertitude ou de controverse pesant sur une question, la peur des conséquences, le pouvoir et les intérêts perçus des participants, la confiance dans les institutions, les procédures de consultation ou de prise de décisions ainsi que les idées et les valeurs de la collectivité dans laquelle les gens vivent. L'impact des expériences précédentes et le traitement par les médias de cet événement ou d'événements similaires ainsi que les phénomènes politiques et sociaux plus généraux auxquels sont mêlés les participants peuvent tous conditionner la manière de voir des gens et déterminer leur avis sur des questions ainsi que leurs réponses à des messages spécifiques. Il faut donc tenir compte dans les plans de communication et les procédures envisagées de la façon de voir et des attitudes des personnes concernées.

L'acceptabilité de l'énergie nucléaire dépendra en partie d'une meilleure compréhension par le public des questions nucléaires, de la sûreté nucléaire en particulier. Cette acceptabilité s'inscrit dans le problème plus vaste de l'attitude du public à l'égard des nouvelles technologies et du progrès technique. Dans bien des cas, comme nous l'avons déjà dit, il y a un véritable fossé entre l'appréhension des risques par les chercheurs et les experts, d'un côté, et le public profane, de l'autre. Ce fossé est souvent investi par les médias ou par des groupes d'intérêt spéciaux. Si les gens ont l'impression que les autorités ne leur donnent pas des informations complètes et précises ou qu'ils ne

s'inquiètent pas de leurs préoccupations, les autorités en question perdront leur crédibilité et d'autres sources s'insinueront dans le vide ainsi créé. Il est donc primordial que les autorités fournissent rapidement des informations exactes et tiennent compte des craintes du public dès leur manifestation. Les campagnes d'information du public sur l'énergie devront s'adresser à toutes les catégories sociales et à tous les âges.

Les gouvernements qui envisagent de maintenir l'option nucléaire pour contribuer à un développement durable souhaitent peut-être mettre sur pied des procédures donnant aux gens l'impression de participer davantage aux décisions nucléaires. Les auditions publiques et les débats organisés pour le public peuvent amener celui-ci à accorder plus de confiance au bien-fondé de la décision de maintenir le nucléaire. Même si certains des acteurs peuvent profiter de l'occasion pour ressasser des idées arrêtées, il est important que le public s'aperçoive que ses préoccupations font l'objet d'une discussion approfondie dans le contexte spécial de la décision en jeu. Gagner la confiance du public semble une des clés de l'acceptabilité du nucléaire. Pour ce faire, il faut soigneusement écouter les points de vue des gens avant d'agir. Cela ne signifie pas que les décisions devront être basées sur des impressions plutôt que sur la science. En fait, il faut à la fois la science et la confiance. La confiance une fois gagnée, le reste devient plus facile.

Les sociétés doivent, pour l'ensemble des activités humaines, s'efforcer d'aborder la gestion du risque de manière cohérente et généralement acceptable et mettre en place des procédures permettant de le faire. Le développement durable exige une démarche globale à long terme et à l'échelle mondiale. Il dépendra aussi de nombreuses actions et décisions adoptées à court terme à l'échelle locale. L'énergie nucléaire doit donc faire la preuve de son efficacité aux deux niveaux. La prise en compte des préoccupations du public et la négociation de solutions acceptables constitueront un défi. Les gouvernements joueront un rôle décisif à cet égard en mettant en place les mécanismes adéquats, en fournissant des informations objectives et en prenant les décisions indispensables en dernier ressort. Ils devront donc affecter des ressources suffisantes à cette fin.

### ***Coopération internationale***

Les activités nucléaires d'un pays ont un impact sur les programmes des autres pays. À l'instar des autres polluants, les rejets radioactifs peuvent avoir des effets transfrontières. Il existe déjà un cadre de coopération internationale bien établi dans le domaine nucléaire, qui couvre la R&D, la réglementation et les aspects juridiques, les échanges d'informations, les transferts de technologies et le commerce des matières. Il sera possible, grâce au renforcement de la coopération internationale, de mettre en œuvre plus efficacement des politiques nucléaires compatibles avec les objectifs du développement durable.

Alors que l'électricité d'origine nucléaire est essentiellement produite à l'heure actuelle dans les pays Membres de l'OCDE, son expansion dans les décennies à venir devrait très probablement se situer pour l'essentiel ailleurs, dans les pays en développement et en transition. Ces pays auront besoin de coopération et d'aide pour se former, créer et consolider les institutions, la législation et la réglementation ainsi que d'un échange complet d'informations sur l'expérience d'exploitation pour assurer la sûreté et obtenir de bonnes performances. L'énergie nucléaire dispose d'une base institutionnelle solide dans les pays Membres de l'OCDE qui peuvent partager les informations et les expériences dont ils disposent avec les autres pays.

La Convention internationale sur la sûreté nucléaire est un exemple éloquent de l'évolution vers une coopération internationale plus efficace, s'agissant du cadre institutionnel. Elle a été ratifiée par une cinquantaine de pays et vient d'entrer en vigueur récemment. Cette Convention, ainsi que

d'autres – Convention relative à la notification précoce des accidents nucléaires et Convention d'assistance mutuelle en cas d'accidents radiologiques – sont des éléments fondamentaux du régime international actuel de sûreté nucléaire. Les États parties à la Convention sur la sûreté nucléaire sont convenus de se transmettre régulièrement leurs rapports nationaux afin qu'ils soient soumis à un examen collégial. Dans ces rapports, ils sont supposés consigner l'état de la mise en œuvre de toutes les obligations énoncées dans la Convention. La première réunion d'examen a eu lieu en avril 1999. Il s'agira là d'un instrument supplémentaire destiné à encourager les pays à créer et renforcer les institutions compétentes et la culture de sûreté requises.

La sûreté nucléaire a considérablement progressé dans les pays d'Europe orientale et de l'ex-Union soviétique, mais les experts en sûreté continuent à avoir quelques inquiétudes sur certains des réacteurs de conception russe : RBMK du type du réacteur de Tchernobyl et vieilles filières de réacteurs à eau sous pression. Des modifications ont été introduites dans la conception, et les systèmes ont été perfectionnés. L'exploitation des réacteurs, ainsi que les inspections et la maintenance en service se sont également améliorées pour que la culture de sûreté diffuse à tous les niveaux. La législation existe déjà pour l'essentiel dans ces pays, et les instances de sûreté acquièrent actuellement l'indépendance et le pouvoir nécessaires mais les ressources leur font encore souvent défaut. Les organisations occidentales, y compris l'AEN/OCDE, coopèrent avec les autorités de l'ex-Union soviétique et des pays d'Europe orientale dans le but d'améliorer les normes de sûreté et de favoriser la mise en place de régimes réglementaires et législatifs modernes. Des solutions satisfaisantes à ces problèmes sont indispensables dans la perspective du développement durable.

La coopération internationale en matière de R&D nucléaire est particulièrement nécessaire pour augmenter l'efficacité générale des efforts nationaux et faciliter le développement des technologies. Les gouvernements et les industries pourraient tirer profit d'une mise en commun des ressources et de la réalisation d'études en collaboration. À un moment où les budgets publics de R&D nucléaire se contractent, des stratégies coordonnées d'investissement dans des équipements de R&D très coûteux faciliteraient le progrès technique et contribueraient au renforcement de la sûreté. Compte tenu de leur expérience dans le domaine de la coopération et des projets conjoints, des organisations internationales, comme l'AEN, peuvent jouer un rôle important. Un des problèmes de la coopération internationale dans un environnement de concurrence, pour l'énergie nucléaire comme pour toute autre technologie de pointe, est de parvenir à intégrer le travail des entreprises et des fédérations professionnelles aux efforts des gouvernements.

#### 4. PRINCIPAUX PROBLÈMES ET RÔLE DES GOUVERNEMENTS

Les données et les analyses présentées dans le chapitre 3, qui reposent sur l'expérience acquise en matière d'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire, permettent d'apprécier le rôle et l'intérêt de l'énergie nucléaire au regard des objectifs et des politiques du développement durable. L'énergie nucléaire est une des options énergétiques possibles. Ses avantages, coûts et risques doivent être analysés et comparés à ceux des autres options, y compris celui de la gestion de la demande. Comme le présent document ne contient que des informations concernant l'énergie nucléaire, il devra être complété par des analyses et des données similaires sur d'autres solutions pour pouvoir servir de base solide aux responsables politiques. En outre, comme pour toute autre technologie, le recours au nucléaire dans les politiques énergétiques nationales sera décidé sur la base de critères et d'arbitrages qui varieront d'un pays à l'autre en fonction des priorités et situations nationales spécifiques.

Même si la déréglementation économique donne la prépondérance aux mécanismes du marché, les gouvernements continueront à jouer un rôle déterminant dans la définition du cadre indispensable au développement technologique. Ils évalueront l'énergie nucléaire dans le contexte de l'ensemble de leurs politiques en matière d'énergie, d'environnement et de développement durable. Les résultats différeront en fonction des ressources énergétiques nationales, de la dépendance actuelle et passée à l'égard de l'énergie nucléaire, de même que de l'attitude du public vis-à-vis du nucléaire et de considérations politiques. Compte tenu des problèmes transfrontières soulevés par les installations nucléaires, la radioprotection, la sûreté, la responsabilité et la non-prolifération concernent les gouvernements et font partie de leurs responsabilités. Il incombera notamment à ceux-ci d'assurer la transparence de l'information transmise aux autres pays sur la sûreté nucléaire.

L'analyse des caractéristiques de l'énergie nucléaire révèle que la démarche adoptée dans ce secteur correspond assez bien aux objectifs du développement durable, à savoir transmettre un ensemble d'actifs aux générations futures tout en minimisant les charges et les impacts environnementaux. À cet égard, les séries de données statistiques régulièrement établies par le secteur nucléaire constitueront une base préliminaire solide pour la définition des indicateurs de l'évolution vers le développement durable. Les gouvernements et les organismes publics doivent s'employer à maintenir un cadre cohérent destiné à mesurer les progrès dans ce domaine.

D'autres caractéristiques de l'énergie nucléaire rendent incertaine sa contribution future aux politiques du développement durable. La compétitivité économique des centrales nucléaires continuera de poser un problème, même si l'on parvient à établir des règles du jeu plus équitables, et les craintes suscitées dans le public par les risques nucléaires et leur gestion pourraient bien aboutir à une limitation de l'utilisation de cette énergie. Les gouvernements ont un rôle important à jouer ici puisqu'il leur revient de définir un juste prix, qui favorisera l'introduction des technologies les mieux adaptées, et de créer le cadre réglementaire qui contribuera à convaincre le public de notre capacité de maîtriser et de gérer les risques technologiques.

Les centrales en service sont économiquement compétitives dans la plupart des cas et obtiennent de bons résultats sur les marchés déréglementés. Ces centrales sont un atout pour les compagnies d'électricité et pour les gouvernements, en particulier dans le cadre des politiques destinées à contrer

le changement climatique mondial. La construction de nouvelles tranches, néanmoins, est rarement l'option la moins onéreuse sur les marchés actuels et nécessite de forts investissements dont le délai d'amortissement dépasse 20 ans. Il sera donc indispensable de réduire sensiblement les coûts en capital des centrales nucléaires, et il faudra poursuivre les travaux de recherche et de développement dans ce sens, à l'instar du programme Génération IV aux États-Unis.

Toutefois, du point de vue du développement durable, la compétitivité de différentes options énergétiques doit être évaluée sur la base des coûts totaux pour la société, en tenant compte des coûts externes, de la suppression des subventions inappropriées ainsi que de la contribution de ces options à la diminution du risque de changement climatique mondial, à la sécurité et à la diversité des approvisionnements dans un système énergétique mondial largement dépendant des combustibles fossiles. À cet égard, il serait utile de réaliser des études approfondies sur les effets sanitaires et environnementaux respectifs de diverses options, au niveau national et international. Des organismes internationaux, comme l'OCDE, l'AIE et l'AEN, peuvent aider les pouvoirs publics dans ce domaine. Les gouvernements seront responsables en dernier ressort du choix et de la mise en œuvre des mesures destinées à parvenir au juste prix tout en réalisant les autres objectifs de politique générale.

L'aide publique destinée à financer la R&D et l'infrastructure nucléaires doit être évaluée à la lumière des objectifs de politique générale que l'énergie nucléaire peut aider à atteindre et du soutien accordé à d'autres options qui offrent les mêmes possibilités. La R&D publique ne doit pas remplacer la R&D financée par l'industrie mais la compléter dans les domaines qui relèvent essentiellement de l'État, comme les sciences fondamentales, la sûreté et la protection de l'environnement ainsi que tous les concepts novateurs qui ne seront développés qu'à long terme. Le renforcement de la coopération internationale dans ces domaines pourrait améliorer l'efficacité des efforts nationaux grâce à des projets conjoints et aux synergies qu'elle favorise.

Dans les pays Membres de l'OCDE, l'énergie nucléaire dans les conditions normales d'exploitation a des incidences minimales sur la santé et l'environnement. Les normes strictes de protection radiologique et de sûreté des réacteurs garantissent que les accidents et les rejets pouvant se traduire par d'importants effets sanitaires et environnementaux ont une faible probabilité. La plupart des indicateurs de radioprotection, de sûreté des réacteurs et d'impact sur l'environnement tendent à s'améliorer. Pour pouvoir continuer à contribuer à terme aux objectifs du développement durable, l'énergie nucléaire devra se maintenir à un niveau élevé de sûreté en dépit de la concurrence croissante sur le marché de l'électricité, du vieillissement des réacteurs et du développement de cette industrie dans des pays et des régions où elle n'était pas présente. Pour que les systèmes internationaux soient efficaces, il faudra si nécessaire renforcer les accords et les contrôles internationaux.

Les politiques de gestion des déchets radioactifs en place visent à confiner toutes les substances dangereuses sur toute la durée de leur vie active. La pratique actuelle consiste à entreposer dans des installations provisoires sûres les déchets radioactifs à vie longue qui seront à terme stockés dans des dépôts. On a estimé que le stockage en formation géologique est une solution techniquement sûre qui peut être mise en œuvre sans porter atteinte à la compétitivité de l'énergie nucléaire. Même s'il n'est pas techniquement urgent de mettre en service des dépôts de déchets à vie longue, il est important de construire et de mettre en service ces installations pour réaliser les objectifs du développement durable, et notamment l'acceptabilité sociale de l'énergie nucléaire.

Les pouvoirs publics auront pour mission essentielle de définir les cadres et les politiques réglementaires permettant une approche progressive cohérente du démantèlement des installations nucléaires et du stockage définitif de tous les types de déchets radioactifs. Il leur incombera de définir les stratégies d'évacuation des déchets à vie longue ainsi que des mesures garantissant que des sommes suffisantes prélevées sur les usagers au moment où ils tirent profit de l'énergie nucléaire seront mises de

côté et pourront couvrir en temps voulu les dépenses de démantèlement des installations et de stockage des déchets.

Une réglementation efficace et des normes de sûreté exigeantes doivent être préservées dans le domaine nucléaire mais ces normes doivent être mises en perspective. Il est primordial que les gouvernements favorisent une approche cohérente de la gestion et de la réglementation des risques pour l'ensemble des activités de la société, en tenant compte des ressources disponibles, des améliorations possibles et de la perception des risques. Les sociétés doivent répartir les ressources limitées dont elles disposent pour contrôler ces risques de manière à produire les meilleurs résultats.

Les liens possibles entre des utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire et la prolifération des armes nucléaires méritent une attention particulière. Le détournement des programmes électronucléaires pacifiques est un moyen possible, quoique peu probable, pour des pays ou groupes désireux de se doter de l'arme nucléaire, d'acquérir les technologies, l'équipement et les matières fissiles indispensables. Dans la mesure où la prolifération est essentiellement un problème politique, les gouvernements doivent trouver des solutions politiques, notamment renforcer la confiance entre les pays et augmenter la sécurité régionale.

Un régime international de garanties et de non-prolifération a été mis en place pour lutter contre ce risque. Ce régime est régulièrement revu et adapté pour tenir compte du développement de l'accès aux technologies nucléaires dans le monde. Les exportations nationales doivent être contrôlées conformément aux objectifs des accords internationaux dans ce domaine. Il convient en outre d'intégrer la non-prolifération dans la conception des futurs procédés et installations nucléaires.

Les cadres institutionnels nationaux et internationaux dans lesquels s'inscrit l'énergie nucléaire sont bien établis, surtout dans les pays de l'OCDE qui exploitent des installations nucléaires. Le secteur nucléaire pratique de longue date les échanges d'informations et d'expériences et la coopération internationale par le biais d'organismes gouvernementaux, comme l'AIEA et l'AEN, et cette tradition mérite d'être préservée. La législation nucléaire, la réglementation de la sûreté, les systèmes de garanties et les régimes de responsabilité civile forment une infrastructure institutionnelle globale que les gouvernements doivent sauvegarder dans les pays de l'OCDE et s'efforcer de mettre en place dans les pays non-membres qui se lancent dans des programmes électronucléaires.

Si l'on veut réaliser les objectifs de développement durable en matière d'équité et de participation, l'énergie nucléaire devra réussir à mieux se faire accepter par le public qu'elle ne le fait aujourd'hui dans de nombreux pays. Il faut mettre en place de nouveaux mécanismes permettant au public d'intervenir sur les questions nucléaires en s'appuyant sur les meilleures informations scientifiques disponibles tout en se gardant de perdre de vue que la communication doit être un dialogue et qu'il faut écouter et entendre les perceptions et les préoccupations du public. Les gouvernements ont pour mission essentielle de créer ces mécanismes et d'affecter les ressources requises à leur mise en œuvre. Des campagnes d'éducation fondées sur des informations exactes et de bonnes connaissances scientifiques continueront à être fondamentales mais l'équité et la participation auront aussi leur importance. Les problèmes éthiques, comme ceux soulevés par le stockage en formation géologique des déchets radioactifs, doivent être examinés à la lumière des autres charges transmises aux générations futures : effets des émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants et épuisement des ressources naturelles. Les autres problèmes sociaux et politiques doivent être abordés en même temps dans le cadre d'une démarche intégrée qui permet de déterminer l'ensemble des coûts, des avantages et des arbitrages possibles.

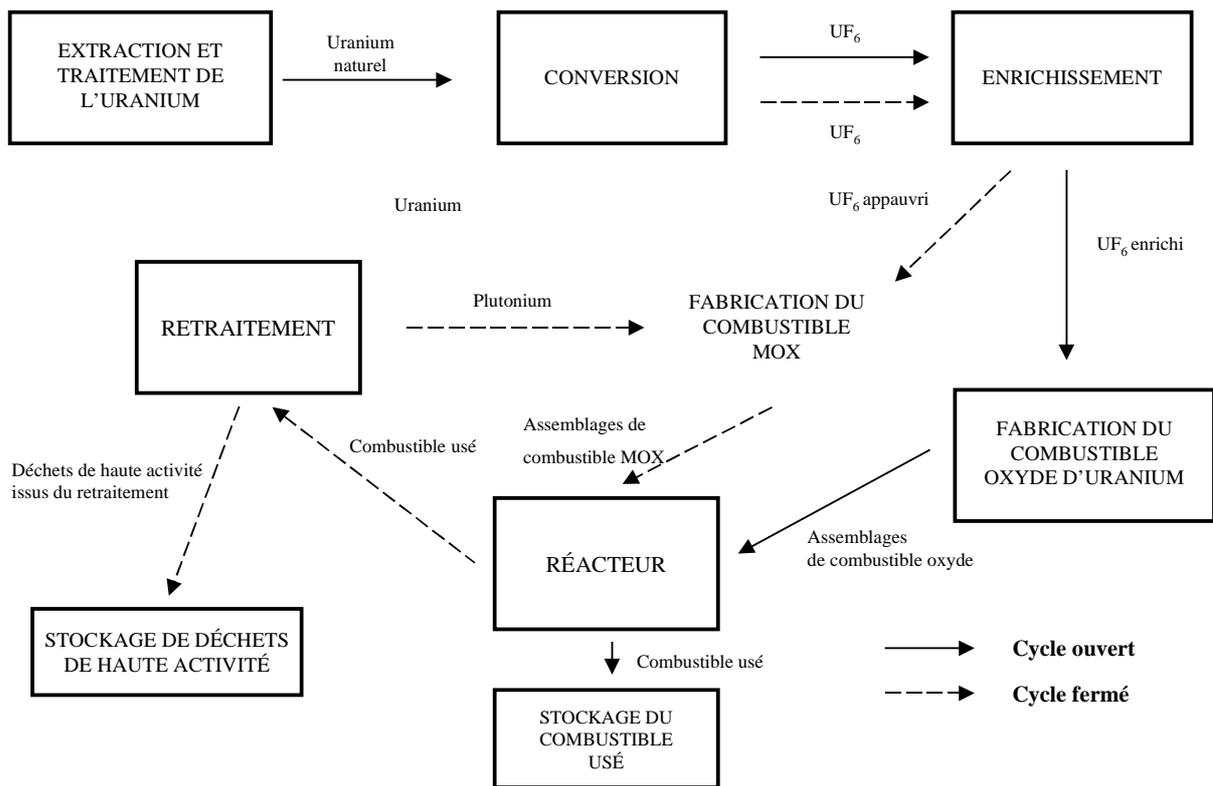
Les transferts de technologies, l'assistance et la coopération techniques qui seront offerts aux pays non-membres revêtiront une importance toute particulière en raison de la croissance de la

demande d'énergie dans ces pays. À moyen terme, la plupart des nouvelles installations nucléaires seront vraisemblablement construites dans les pays non-membres, et les gouvernements des pays de l'OCDE auront pour mission essentielle de fournir à ces pays l'information et les ressources dont ils ont besoin pour résoudre les principaux problèmes qui se posent à eux s'agissant du cadre juridique, de la protection sanitaire et environnementale, de la sûreté et de la gestion des déchets.

Annexe 1

**CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE D'UN RÉACTEUR À EAU ORDINAIRE**

Le diagramme ci-dessous résume les principales étapes du cycle du combustible d'un réacteur à eau ordinaire. Il représente les diverses activités du secteur nucléaire. Les étapes et les niveaux du cycle du combustible varient d'un réacteur à l'autre, mais les principaux éléments restent identiques pour l'ensemble des centrales nucléaires actuelles. Le cycle du combustible d'une centrale nucléaire peut être subdivisé en trois phases principales : l'amont, de l'extraction du minerai d'uranium à la livraison des assemblages combustibles au réacteur ; l'utilisation du combustible dans le réacteur, et l'aval, depuis le déchargement des assemblages combustibles du réacteur jusqu'au stockage final du combustible utilisé ou des déchets radioactifs issus du retraitement.





## RÉFÉRENCES

- [1] OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), (1999), Synthèses n° 8, OCDE, Paris, France.
- [2] OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), (1999), *Projet triennal de l'OCDE sur le développement durable : rapport d'étape*, OCDE, Paris, France.
- [3] AIE (Agence internationale de l'énergie), (1998), *Key World Energy Statistics from the IEA – Data for 1996*, AIE, Paris, France.
- [4] R. RHODES et D. BELLER, (2000), *The Need for Nuclear Power*, in Foreign Affairs, Janvier/février 2000, vol. 79, n° 1, Washington, États-Unis.
- [5] Worldwatch Institute, (1999), *State of the World 1999*, W.W. Norton & Company Inc., États-Unis.
- [6] AIE (Agence internationale de l'énergie), (1998), *World Energy Outlook*, OCDE, Paris, France.
- [7] AIE (Agence internationale de l'énergie), (1999), *Bilans énergétiques des pays non-membres, édition 1999*, OCDE, Paris, France.
- [8] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (2000), *Données sur l'énergie nucléaire*, Paris, France.
- [9] AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), (2000), *Nuclear Power Reactors in the World*, Vienne, Autriche.
- [10] IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) et Conseil Mondial de l'Énergie, (1995), *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, WEC, Londres, Royaume-Uni.
- [11] G. BRUNDTLAND, Présidente de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, (1987), *Notre avenir commun (Rapport Brundtland)*, Oxford University Press, Oxford, Royaume-Uni.
- [12] T. BANURI *et al.*, (1996), *Equity and Social Consideration*, tiré de Changement climatique 1995 – Aspects sociaux et économiques de l'évolution du climat. Contribution du Groupe de travail III au second rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental PNUE/OMM pour l'étude du changement climatique, Cambridge University Press, New York, États-Unis, pp.79-124.
- [13] OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), (1997), *Le monde en 2020. Vers une nouvelle ère mondiale*, OCDE, Paris, France.
- [14] The Royal Society, (1999), *Nuclear Energy: The future Climate*, The Royal Society and Royal Academy of Engineering, Londres, Royaume-Uni.

- [15] L. SCHIPPER *et al.*, (1999), *The IEA Energy Indicators Effort: Extension to Carbon Emissions as a Tool of the Conference of the Parties*, OCDE, Paris, France.
- [16] K. HAMILTON, *Genuine Saving as a Sustainability Indicator*, (1999), Second OECD Expert Workshop, Frameworks to Measure Sustainable Development, OCDE, Paris, France.
- [17] K.J. ARROW *et al.*, (1996), *Équité entre générations, actualisation et efficacité économique*. Tiré de Changement climatique 1995 – Aspects sociaux et économiques de l'évolution du climat. Contribution du Groupe de travail III au second rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental PNUE/OMM pour l'étude du changement climatique, Cambridge University Press, New York, États-Unis, pp.125-144.
- [18] A. GONZALEZ DE UBIETA, (1999), *Economic Sustainability of Nuclear Power*, dans *Nuclear in a Changing World*, Proceedings (vol. II), Commission européenne, Bruxelles, Belgique, pp. 33-50.
- [19] M. FERTEL, (1998), *The Outlook for US Nuclear Plants in a Competitive Electricity Market*, dans *Proceedings from the Uranium Institute Symposium 1998*, Londres, Royaume-Uni.
- [20] W. GALE *et al.*, (1998), *A New Nuclear Consensus*, Compte rendu d'un séminaire organisé parallèlement à ENC'98, Nice, France.
- [21] OCDE/AEN-AIE (Agence pour l'énergie nucléaire – Agence internationale de l'énergie), (1998), *Prévisions des coûts de production d'électricité. Mise à jour 1998*, OCDE, Paris, France.
- [22] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (2000), *Réduction des coûts en capital des centrales nucléaires*, OCDE, Paris, France.
- [23] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1996), *Charges financières futures liées aux activités nucléaires*, OCDE, Paris, France.
- [24] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1991), *Déclassement des installations nucléaires. Une analyse de la variabilité des estimations des coûts du déclassement*. OCDE, Paris, France.
- [25] Commission européenne, Direction générale XII, Science, Recherche et Développement, (1995), *ExternE, Externalities of Energy, vol. 5, Nuclear*, Commission européenne, Bruxelles, Belgique.
- [26] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (2000), *Méthodes d'évaluation des conséquences économiques des accidents nucléaires*, OCDE, Paris, France.
- [27] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire) et AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), (2000), *Uranium 1999 – Ressources, production et demande d'uranium*, OCDE, Paris, France.
- [28] BP AMOCO, (2000), *Statistical Review of World Energy June 2000*, Pillans & Wilson Greenaway, Londres, Royaume-Uni.
- [29] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1994), *La radioprotection aujourd'hui et demain. Opinion collective du Comité de protection radiologique et de santé publique de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris, France.

- [30] CIPR (Commission internationale de protection radiologique), (1990), *Recommandations de la Commission internationale de protection radiologique, Publication 60*, Pergamon Press, Oxford et New York, États-Unis.
- [31] UNSCEAR (Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants), (1994), *Ionising Radiation: Sources and Biological Effects*, UNSCEAR, New York, États-Unis.
- [32] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1999), *Occupational Exposures at Nuclear Power Plants: Eighth Annual Report of the ISOE Programme*, OCDE, Paris, France.
- [33] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1998), *Évolutions de radiobiologie et de radiopathologie : répercussions sur la radioprotection*, OCDE, Paris, France.
- [34] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1998), *The Societal Aspects of Decision-making in Complex Radiological Situations*. Compte rendu de l'atelier organisé à Villigen, Suisse, du 13 au 15 janvier 1998, OCDE, Paris, France.
- [35] L. HOGBERG, (1998), *Reactor Safety*, dans *Nuclear in a Changing World, Proceedings* (vol. II), Commission européenne, Bruxelles, Belgique, pp. 75-93.
- [36] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1999), *Le rôle de l'autorité de sûreté dans la promotion et l'évaluation de la culture de sûreté*, OCDE, Paris, France.
- [37] P. SLOVIC *et al.*, (1979), *Rating the Risks*, *Environment*, vol. 21, n° 3.
- [38] American Chemical Society and Resources for the Future, (1998), *Understanding Risk Analysis: A Short Guide for Health, Safety and Environmental Policy Making*, Washington, États-Unis.
- [39] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1999), *Dépôts des déchets radioactifs de faible activité : Une analyse des coûts*, OCDE, Paris, France.
- [40] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), et AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), (1999), *Aspects environnementaux de la production de l'uranium*, OCDE, Paris, France.
- [41] J. SMELLIE, (1995), *The Fossil Nuclear Reactors of Oklo*, *Radwaste Magazine*, Special Series on Natural Analogs.
- [42] AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire), (1996), *Le point sur la gestion des déchets radioactifs*, OCDE, Paris, France.
- [43] AIE (Agence internationale de l'énergie), (1997), *IEA Energy technology R&D Statistics 1974-1995*, OCDE, Paris, France.
- [44] P. SLOVIC, (1999), *Rating the Risks*, Resources for the future, Washington, États-Unis.
- [45] C. STARR, (1991), *Social Benefit Versus Technological Risk*, *Science*, vol. 165, pp. 1232-38, 1969, Twenty-year Retrospective on 1969, Science Paper of C. STARR, Risk Analysis, Plenum Press, New York, États-Unis.

## ÉGALEMENT DISPONIBLE

### Publications de l'AEN d'intérêt général

*Rapport annuel 1998* (1999)

*Disponible sur le web.*

*Bulletin de l'AEN*

ISSN 0255-7495

Abonnement annuel : FF 240 US\$ 45 DM 75 £ 26 ¥ 4 800

*Le Point sur l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques* (2000)

ISBN 92-64-28425-7

Prix : FF 130 US\$ 20 DM 39 £ 12 ¥ 2 050

*Le Point sur les rayonnements – Applications, risques et protection* (1997)

ISBN 92-64-25483-8

Prix : FF 135 US\$ 27 DM 40 £ 17 ¥ 2 850

*Le Point sur la gestion des déchets radioactifs* (1996)

ISBN 92-64-24692-4

Prix : FF 310 US\$ 63 DM 89 £ 44

### Développement de l'énergie nucléaire

*Données de l'OCDE sur l'énergie nucléaire 2000*

Bilingue

ISBN 92-64-05913-X

Prix : FF 130 US\$ 20 DM 39 £ 12 ¥ 2 050

*Méthodes d'évaluation des conséquences économiques des accidents nucléaires*

ISBN 92-64-27658-0

Prix : FF 200 US\$ 31 DM 60 £19 ¥ 3 250

*Business as Usual and Nuclear Power* (2000)

ISBN 92-64-17175-4

Prix : FF 160 US\$ 25 DM 48 £ 16 ¥ 2 850

*Réduction des coûts en capital des centrales nucléaires* (2000)

ISBN 92-64-27144-9

Prix : FF 240 US\$ 38 DM 72 £ 24 ¥ 4 400

*Aspects environnementaux de la production d'uranium* (1999)

ISBN 92-64-27064-7

Prix : FF 280 US\$ 47 DM 84 £ 29 ¥ 5 550

*Enseignement et formation dans le domaine nucléaire: faut-il s'inquiéter ?* (2000)

ISBN 92-64-28521-0

Price: FF 210 US\$ 31 DM 63 £ 19 ¥ 3 300

*Enseignement et formation dans le domaine nucléaire: faut-il s'inquiéter ?* (2000)

Un rapport de synthèse ISBN 92-64-28260-2

*Gratuit : papier ou Web*

*L'énergie nucléaire face à la concurrence sur les marchés de l'électricité* (2000)

ISBN 92-64-28262-9

*Gratuit : papier ou Web*

***Bon de commande au dos.***



OECD PUBLICATIONS, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
Printed in France