

# Le scénario SUNBURN de relance du nucléaire mondial

B Dessus (Global Chance) et Ph Girard (CEA)\*

Parmi les solutions proposées pour répondre au défi d'une rapide augmentation des émissions de gaz à effet de serre, l'énergie nucléaire est aujourd'hui présentée comme un des axes majeurs du salut escompté à moyen terme. Les partisans d'une relance massive de cette solution se fondent sur deux arguments principaux : l'énergie nucléaire ne produit pas (ou très peu) de gaz carbonique et sa substitution aux énergies fossiles retarde d'autant l'épuisement de celles qui sont actuellement majoritairement employées pour la production d'électricité (charbon et gaz naturel).

Il nous a donc semblé intéressant d'étudier un scénario de relance très volontariste du nucléaire mondial, le scénario SUNBURN (Scénario Ultra Nucléaire), pour évaluer l'enjeu qu'il pourrait représenter, en termes de lutte contre les émissions de gaz carbonique et de préservation des ressources de charbon, de pétrole et de gaz naturel, s'il était mis en œuvre sans délai comme une priorité mondiale absolue.

Nous nous proposons d'analyser également les autres conséquences de la réalisation d'un tel scénario, en termes de ressources de combustibles fissiles, en termes économiques, en termes de risques environnementaux et en termes de risques de prolifération vers les applications militaires. Pour rester en cohérence avec les projections du WEO (2004), l'horizon de notre étude est l'année 2030.

## Les principales hypothèses du scénario SUNBURN.

La construction du scénario suppose la mise en place d'un certain nombre d'hypothèses et de paramètres que nous discutons rapidement ci dessous.

### I – L'universalité de la solution.

Si la relance du nucléaire doit apparaître comme une priorité internationale pour faire face à un enjeu environnemental mondial, il ne peut être sérieusement question d'exclure, pour des raisons idéologiques, politiques, économiques ou de compétences, certains pays du champ d'une action considérée comme indispensable. La discrimination de pays « autorisés et non autorisés », pour des raisons diverses, à mettre en œuvre un programme nucléaire civil considéré comme prioritaire, se heurterait évidemment de front au choix des critères d'autorisation et à celui du panel de pays chargés de mettre en œuvre ces critères. De plus cela restreindrait d'autant son ampleur.

### II – Le maintien du caractère national des programmes.

Jusqu'à ce jour, les programmes nucléaires civils se sont toujours développés dans un cadre étroitement national pour des raisons diverses (sûreté et sécurité, indépendance nationale, liaison fréquente avec des programmes militaires). Nous avons retenu l'hypothèse d'une poursuite de cette tendance dans les 25 ans qui viennent, comme de très loin la plus probable. Nous faisons donc l'hypothèse que l'alimentation en électricité d'un pays ou d'un ensemble de pays par un pays voisin restera encore marginale et qu'aucun programme régional d'envergure n'aura encore vu le jour en 2030.

\* Les opinions exprimées par les auteurs n'engagent pas leurs organismes de rattachement

### III – Les conditions d'emploi du nucléaire.

Les centrales nucléaires de la génération actuelle présentent un certain nombre de caractéristiques de taille, de flexibilité de production, et d'économie qui conduisent à limiter leur utilisation à des conditions déterminées.

*A – L'hypothèse d'une utilisation en « base ».*

On sait que le coût de production de l'électricité nucléaire comporte une part très majoritaire de coûts fixes (amortissement de l'investissement initial et coûts fixes de production qui représentent plus de 70 % du coût total annuel des réacteurs) et une part faible de coûts proportionnels à la quantité d'électricité produite annuellement (combustibles, etc.). Le coût de production du kWh nucléaire est donc très dépendant de la durée d'utilisation annuelle des réacteurs. On sait d'autre part que de fortes modulations horaires des réacteurs actuels se heurtent à de nombreux problèmes techniques. On a donc retenu pour hypothèse une contribution aux besoins de « base » pour l'électricité nucléaire (7 500 heures par an) comme plafond raisonnablement envisageable en moyenne mondiale. Dans la très grande majorité des pays du monde, ces besoins dits de base sur le réseau interconnecté représentent de l'ordre de 50 % des besoins d'électricité.

Notre approche permet d'appréhender l'évolution de l'équilibre offre-demande en énergie mais non en puissance qui nécessiterait de faire une analyse pays par pays de la demande d'extrême pointe prenant en compte l'ensemble des moyens de production électrique et les interconnexions entre réseaux électriques. La fourniture d'extrême pointe est assurée à partir d'installations hydrauliques (barrages) ou thermiques (fuel lourd, diesel).

*B – Un seuil minimum de demande électrique annuelle.*

Les réacteurs des générations actuelles ou prévus pour les 20 ans qui viennent présentent des puissances de l'ordre du GW (700 MW pour un CANDU à 1 600 MW pour un EPR). Pour éviter des ruptures d'approvisionnement dangereuses en cas de panne ou d'arrêt pour entretien d'un réacteur, nous avons fait l'hypothèse d'une mise en place d'un minimum de 4 GW nucléaires (3 à 4 réacteurs). Nous avons d'autre part fait l'hypothèse d'un facteur de charge moyen mondial de 85 % de ces réacteurs (chiffre obtenu aujourd'hui dans les pays les plus avancés). Dans ces conditions le seuil de production nucléaire annuelle est de l'ordre de 30 TWh.

*En combinant cette hypothèse avec celle d'une utilisation en base on voit que le seuil d'accès au nucléaire pour un pays se situe autour de 60 TWh de demande brute d'électricité sur le réseau (incluant les pertes transport distribution, environ 6-7 % de la consommation nette).*

### IV – Les durées de vie des ouvrages.

Nous avons fait l'hypothèse qu'aucune des centrales existantes, (fossile, fissile ou renouvelable) ne serait déclassée avant la fin de sa durée de vie normale. Les réacteurs nucléaires viendront donc couvrir de nouveaux besoins ou se substituer aux centrales arrivées en fin de durée de vie. Nous avons retenu les hypothèses suivantes pour les différentes filières :

En années	Nucléaire existant	Nucléaire futur	Charbon	Gaz naturel	Pétrole	Hydraulique	Eolien	Autres
Durée de vie	35-50	50	45	35	40	> 100	20	30

### V – La contribution des autres filières à la production d'électricité de base.

Puisque la question à résoudre est celle des émissions de CO<sup>2</sup>, c'est la contribution de l'ensemble des filières sans carbone qu'il faut prendre en compte pour estimer la contribution du nucléaire à ces besoins de base. Nous avons retenu les hypothèses suivantes de contribution à la production de base pour les différentes filières de production renouvelable d'électricité :

- Hydraulique : 30 % (à l'exception de quelques pays, comme le Brésil, la Norvège ou le Canada dont la production hydraulique « au fil de l'eau » est nettement supérieure à ce chiffre).
- Éolien : 20 % du productible annuel estimé avec un facteur de charge de 25 %.
- Biomasse : 60 % du productible annuel.
- Géothermie, Déchets : 100 %.

## VI – Les délais et les rythmes industriels

On a retenu comme temps de construction (ce qui n'inclut pas les délais nécessaires pour obtenir les différentes autorisations préalablement au démarrage de la construction) pour les différentes filières :

En années	Nucléaire	Charbon	Gaz naturel	Pétrole	Hydraulique	Eolien	Autres
Construction	6	4	3	3	6	1	3

En ce qui concerne les délais de mise en route des programmes nucléaires nous n'avons prévu aucun délai pour les pays déjà équipés, mais un délai de 3 ans entre la mise en service industrielle (MSI) du premier réacteur et le suivant et un délai de 3 à 5 ans entre la prise de décision et la première MSI pour mettre en place les infrastructures administratives et techniques indispensables (autorité de sûreté, formation du personnel, etc.), pour les pays qui accèdent au nucléaire civil.

## VII - Les performances des installations fossiles et fissiles

Les performances des installations de production électrique devraient continuer à s'améliorer au cours des prochaines décennies en termes de rendement et par conséquent de consommation de combustibles et d'émission de CO<sup>2</sup> (pour les installations fossiles).

À l'horizon 2030, nous avons retenu comme objectifs pour les installations mises en service pour un fonctionnement en base (charbon, gaz naturel) ou en pointe (pétrole) :

	Charbon	Gaz naturel	Pétrole
Emission de CO <sup>2</sup> en tonne par MWh	0.75	0.33	0.7
Rendement	47.4 %	62.2 %	40.3 %
Besoins en combustibles par MWh	0.304 tonnes (25 GJ/tonne)	1 608 MWh	0.223 tonnes (40 GJ/tonne)

L'amélioration des performances globales est plus rapide dans le scénario Sunset (décrit plus loin) du fait qu'un plus grand nombre d'installations thermiques classiques sont mises en service.

Pour les réacteurs nucléaires, on a retenu comme objectif un taux de combustion de 60 GW.j/tonne, un enrichissement maximal de 4.9 % et un rendement de 40 %. Ces valeurs adaptées aux réacteurs à eau pressurisée ou bouillante ne sont pas atteignables pour d'autres modèles comme les CANDU.

### Les scénarios SUNBURN et SUNSET.

Le scénario SUNBURN établit par pays ou par zone géographique, et année après année, sur la base du scénario BAU de l'AIE (voir article « L'impasse des politiques actuelles ») :

- les besoins d'électricité de base,
- les capacités existantes en service et leur contribution à la production de base,
- les capacités renouvelables mises en place et leurs contributions à la production de base,
- les besoins restants susceptibles d'être satisfaits par l'énergie nucléaire.

Une part plus ou moins grande de ce besoin résiduel est alors rempli par l'énergie nucléaire, compte tenu du délai initial de démarrage des programmes et des dynamiques industrielles discutées en VI.

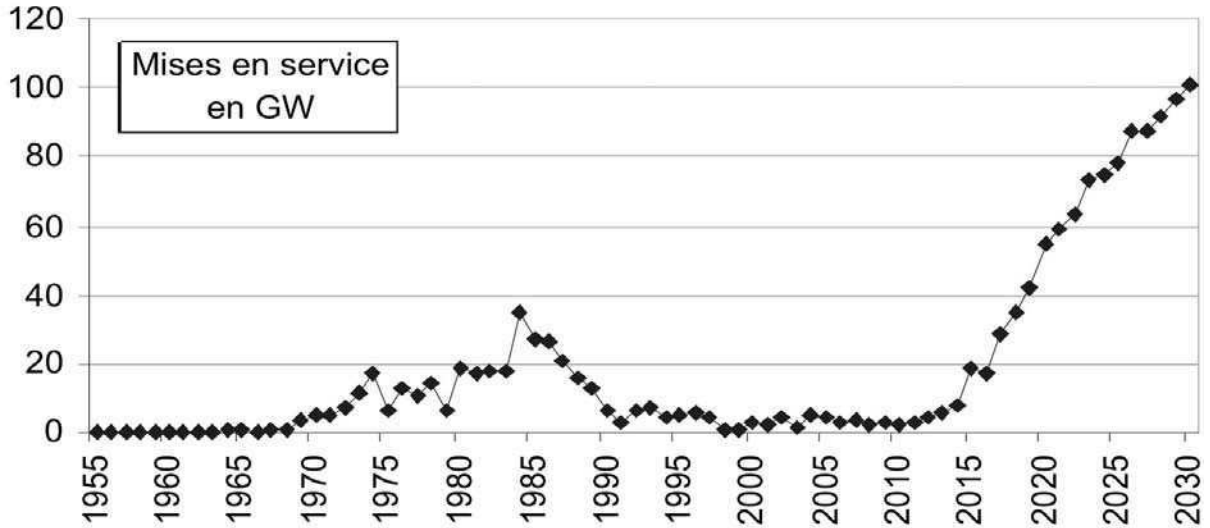
Le scénario SUNSET explicite quant à lui par pays les conséquences de l'absence de toute nouvelle construction de réacteurs à partir de 2006 au-delà des projets actuellement engagés (dernière divergence 2012).

## I - Les principaux résultats des scénarios SUNBURN et SUNSET.

### Le scénario SUNBURN

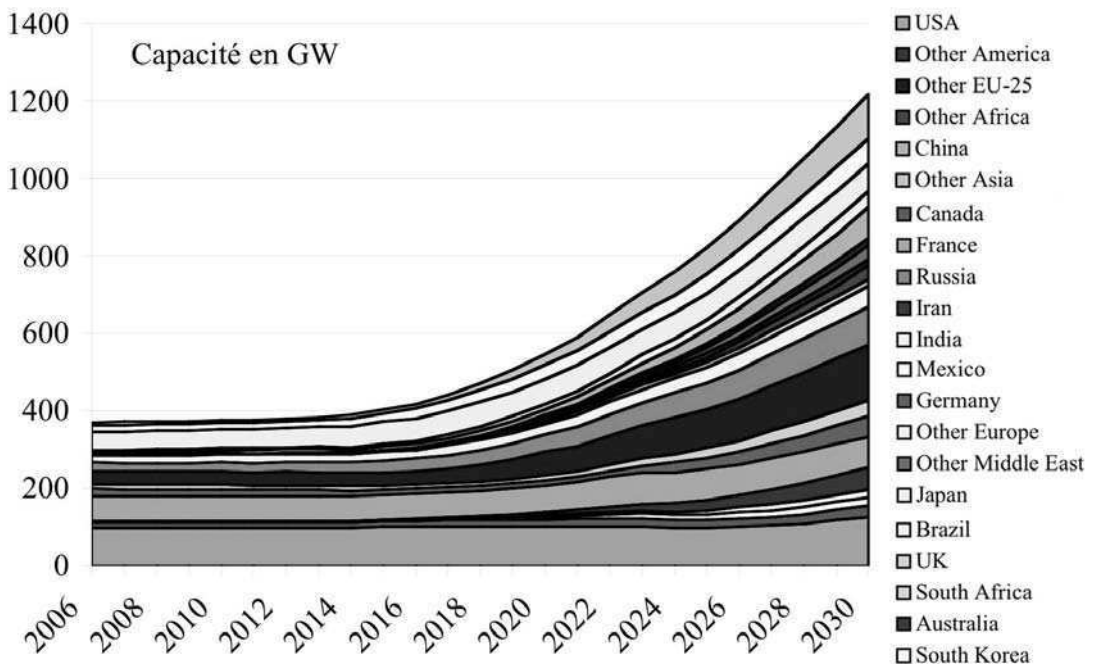
On assiste à un développement extrêmement rapide du nucléaire mondial à partir de 2015 :

**Scénario SUBURN : chronologie des mises en service**

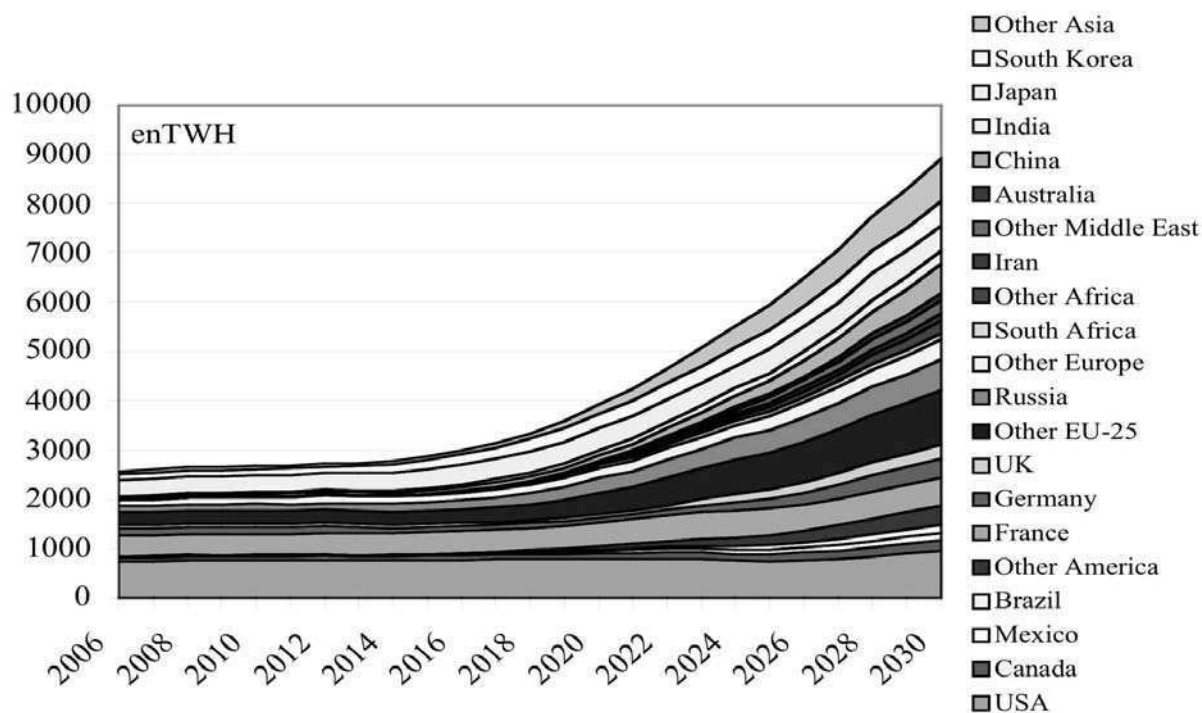


Alors que les mises en service de nouvelles capacités n'ont pas dépassé 3,5 GW par an en moyenne au cours des cinq dernières, elles atteignent une vingtaine de GW dès 2015, 40 GW en 2020 75 GW en 2025 et plus de 100 en 2030 (soit l'équivalent du parc américain actuel). Le marché mondial est donc multiplié par 50 en 25 ans. Compte tenu de la mise hors service des tranches nucléaires les plus anciennes, la capacité nucléaire mondiale, de 370 GW en 2006, augmente rapidement à partir de 2015 pour atteindre 1 215 GW en 2030. De même la production électrique après avoir stagné vers 3 000 TWh augmente à partir de 2015 pour atteindre 8 900 TWh en 2030, soit 28 % de l'électricité mondiale, contre 2 577 TWh et 15 % en 2006.

**SUNBURN : Évolution des contributions des pays à la capacité nucléaire mondiale**



## SUNBURN : Évolution des contributions des pays à la production d'électricité nucléaire



Le rythme de progression est très variable selon les régions ou pays. Aux États-Unis par exemple, où plus de 200 GW de capacités de production de base (CGCN) ont été construites entre 2000 et 2005, la progression du nucléaire reste faible jusqu'en 2025. Il en est de même jusqu'en 2020 en France puisque les réacteurs existants couvrent largement les besoins de base jusqu'à cette date. Par contre on assiste à une progression très rapide du nucléaire dans le reste de l'Union Européenne dès 2015 (de 250 TWh en 2006 à 1 090 en 2030), dans les pays d'Asie (hors Chine, Japon, Inde et Corée du Sud) avec plus de 840 TWh en 2030 contre 60 en 2006. La Chine, et l'Inde, malgré l'abondance de charbon bon marché dont ils disposent, atteignent respectivement des productions nucléaires de 592 et 274 TWh en 2030, la Corée du Sud 510 TWh. La Russie atteint une production de 640 TWh en 2030 (contre 150 en 2006), l'Iran 120 TWh. Au total, la simulation prévoit que vingt-neuf nouveaux pays accèdent au nucléaire civil.

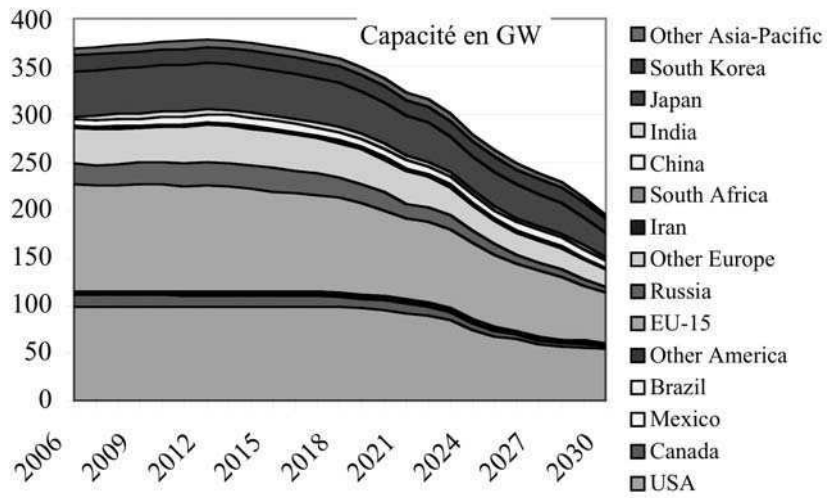
### Nouveaux pays accédants au nucléaire dans SUNBURN

Europe	Amérique	Afrique	Moyen-Orient	Asie-Océanie
Portugal (2017)	Paraguay (2016)	Egypte (2018)	Iran (2006)	Indonésie (2017)
Turquie (2017)	Venezuela (2018)	Maroc (2020)	Arabie Saoudite (2018)	Thaïlande (2018)
Italie (2018)	Chili (2020)	Nigeria (2021)	Israël (2020)	Australie (2018)
Pologne (2018)	Pérou (2023)	Algérie (2022)	UAE (2020)	Malaisie (2018)
Grèce (2019)		Mozambique (2024)	Koweït (2023)	Singapour (2019)
Kazakhstan (2021)				Vietnam (2020)
Autriche (2023)				Nouvelle Zélande (2022)
Danemark (2024)				

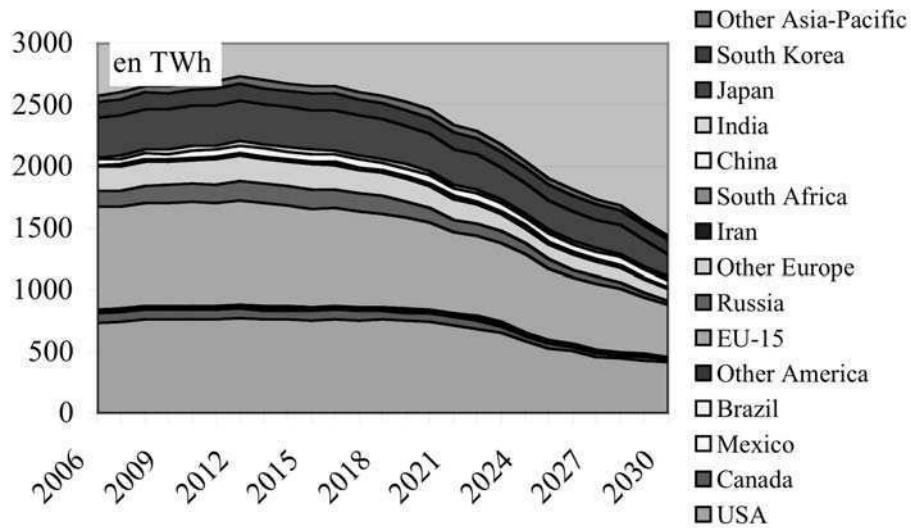
### Le scénario SUNSET

On assiste à une stagnation de la production nucléaire mondiale autour de 2 600 TWh jusqu'en 2020, suivie d'une décroissance jusqu'en 2030, à 1 500 TWh. On remarquera que cette décroissance pourrait se produire plus tardivement si la tendance actuelle de prolongation de durée de vie des centrales existantes jusque vers 60 ans (au lieu des 35 à 50 ans retenus dans notre exercice) se confirmait.

### SUNSET : Évolution des contributions des pays à la capacité nucléaire mondiale

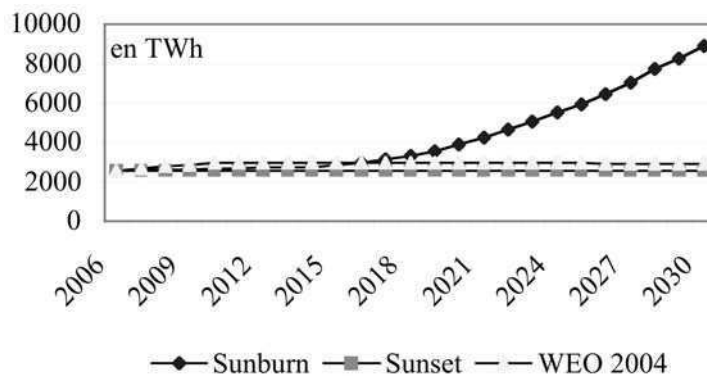


### SUNSET : Évolution des contributions des pays à la production d'électricité nucléaire



Le scénario WEO, quant à lui, prévoit une quasi stabilisation de la production nucléaire sur toute la période. La figure ci-dessous permet de comparer l'évolution des productions des trois scénarios.

### Productions comparées des scénarios Sunburn, Sunset et WEO



## II - Les conséquences en termes d'émissions de CO<sup>2</sup> et de ressources.

### Besoins en énergie fossiles et émissions de CO<sup>2</sup>

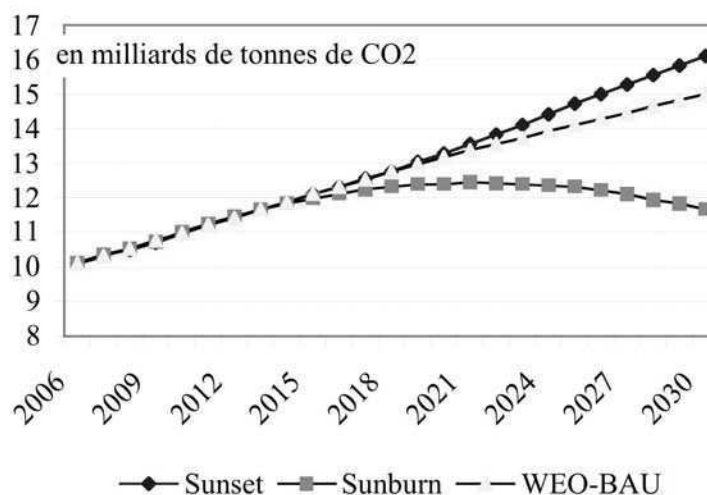
Le tableau suivant compare pour la période 2006-2030 les productions thermiques fossiles cumulées des scénarios Sunset, Sunburn et celui du WEO publié en 2004, ainsi que les besoins en combustibles fossiles et les émissions de CO<sup>2</sup>.

	Production électrique milliers TWh			Combustibles fossiles DTEP			Émissions CO <sup>2</sup> milliard tonnes		
	Sunburn	Sunset	WEO	Sunburn	Sunset	WEO	Sunburn	Sunset	WEO
Charbon	228,6	253,4	237,6	84,2	92,1	- 7,9	218,7	239,2	- 20,5
Gaz naturel	138,4	162,1	159,9	22,9	26,4	- 3,5	54,8	63,2	- 8,4
Pétrole	26,4	27,4	30,5	6,2	6,3	- 0,1	20,5	20,9	- 0,3
Total	393,4	442,9	428,1	113,4	124,9	- 11,5	294,0	323,3	- 29,3

En cumulé, le scénario Sunburn permet une économie en combustibles fossiles de 11.5 Gtep par rapport à Sunset.

Le graphique ci-dessous décrit l'évolution des émissions de CO<sup>2</sup> ainsi évitées entre les scénarios Sunburn, Sunset et WEO.

### Émissions comparées des différents scénarios



Les économies d'émission engendrées par le scénario SUNBURN par rapport à SUNSET ne deviennent significatives qu'à partir de 2018 (0,5 milliard de tonnes) et atteignent 4,4 milliards de tonnes en 2030.

Sur la période 2006-2030, le scénario SUNBURN permet une économie cumulée de CO<sup>2</sup> de 23 Gtonnes par rapport au scénario WEO BAU de l'AIE, soit 2,9 % des émissions cumulées de ce dernier (790 Gtonnes), ou encore 7 mois des émissions prévues en 2030.

### Besoins en Uranium

Pour estimer les besoins en uranium, on a pris en compte les progrès techniques mentionnés précédemment ainsi qu'une baisse de la teneur de l'uranium appauvri lors des opérations d'enrichissement pour atteindre 0,2 %.

Enfin, au-delà de 2030 et jusqu'en 2080, on n'a pris en compte que les besoins des réacteurs existants, à l'exclusion de tout nouveau réacteur. Les tableaux suivants montrent les problèmes de ressources que soulève le scénario SUNBURN en comparant les besoins et les réserves connues à ce jour.

## Besoins en uranium des scénarios SUNBURN et SUNSET

	Sunset		
	2006-2030	2030-2080	2006-2080
Besoins en uranium naturel	1 184	279	1 464 ktonnes
Besoins en enrichissement	941	250	1 191 MUTS

	Sunburn		
	2006-2030	2030-2080	2006-2080
Besoins en uranium naturel	1 948	5 594	7 542 ktonnes
Besoins en enrichissement	1 646	5 109	6 755 MUTS

### Répartition des ressources en uranium suivant le coût de production et la fiabilité des réserves

En kt d'U	Ressources Raisonnablement Assurées (RRA)	Ressources Additionnelles I	Ressources Additionnelles II	Ressources spéculatives
< 40 \$/kg d'U	1 730	793	–	–
40-80 \$/kg d'U	575	275	1 475	–
80-130 \$/kg d'U	662	321	780	4 437
> 130 \$/kg d'U	–	–	–	3 102
Total	2 967	1 389	2 255	7 539

Source AEN/AIEA 1/1/2003

Pour le scénario SUNSET, les réserves RRA suffisent à condition que soient ouvertes de nouvelles mines afin de produire annuellement environ 50 ktonnes (contre 40 ktonnes en 2005). Pour le scénario SUNBURN, les besoins correspondent à l'ensemble des réserves estimées y compris les spéculatives. Un tel scénario implique donc à la fois :

- d'ouvrir à un rythme soutenu de nouvelles mines, des installations de conversion et d'enrichissement ;
- d'économiser l'uranium naturel en baissant la teneur en uranium appauvri vers 0.15 % ;
- de recycler l'uranium appauvri entreposé ayant des teneurs supérieures à 0.3 %.

Mais surtout, le scénario SUNBURN suppose de développer le recyclage du plutonium et de l'uranium issu du retraitement du combustible irradié et d'utiliser au plus tôt (2020-2030) des réacteurs permettant de valoriser l'uranium 238 ou le thorium 232 pour éviter la pénurie d'uranium au-delà de 2030.

*C'est donc un scénario qui implique pratiquement une obligation de réussite de la mise au point des réacteurs de la génération IV dans les 20 ans qui viennent et son corollaire, la généralisation au niveau mondial de filières nucléaires impliquant l'usage du plutonium.*

### III - Les implications économiques et les risques spécifiques du scénario SUNBURN.

#### *L'aspect financier.*

On peut estimer les conséquences économiques du choix du scénario SUNBURN en comparant les coûts d'investissement des scénarios SUNBURN et SUNSET. On sait en effet que les coûts d'investissement unitaires des différentes filières de production d'électricité en concurrence sont très différents. On a retenu les hypothèses suivantes de coûts d'investissement :



## Coûts d'investissement unitaires

Réacteurs Nucléaires *	1 500 euros/kW
Centrales à charbon	900 euros/kW
Turbines à gaz**	500 euros/kW
Centrales à fuel	500 euros/kW

\*hors coûts d'investissement de l'amont du cycle et hors intérêts intercalaires

\*\*Cycle combiné

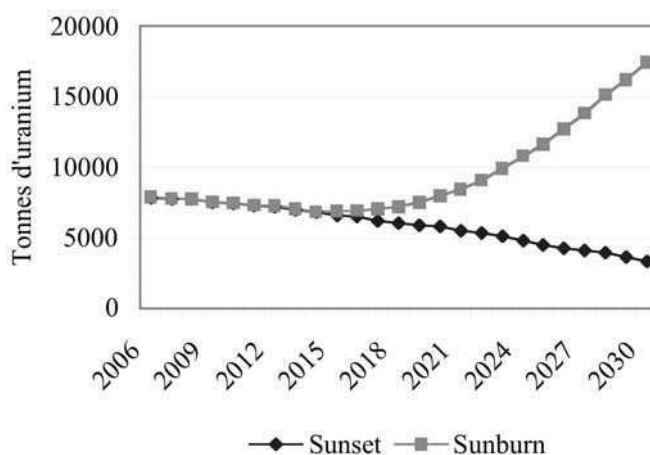
Le scénario SUNBURN implique la mise en place de 2006 à 2030 d'une capacité nucléaire cumulée supplémentaire de 1 000 GW par rapport au scénario SUNSET. Ces 1 000 GW impliquent donc un surcoût d'investissement cumulé sur la période de 780 milliards d'euros, dont l'essentiel sur la période 2015-2030.

Si l'on peut imaginer que les pays les plus riches pourront assumer sans trop de problèmes ce surcoût initial (compensé éventuellement par les économies de combustible à long terme), il est très peu probable que les pays en développement, et en particulier ceux qui disposent d'un charbon abondant et bon marché (comme l'Inde ou la Chine par exemple) acceptent de s'équiper massivement de nucléaire sans une aide importante des pays riches qui pourrait atteindre une vingtaine de milliards d'euros par an dans les années 2020-2030 (près de 30 % de l'aide publique au développement actuelle pour le seul nucléaire). Surtout si les grands pays émergents affichent leur volonté, comme c'est prévisible, de s'approprier rapidement les technologies requises et refusent l'achat de séries importantes de centrales « clés en main », même fortement subventionné, auprès de constructeurs des pays riches.

### L'aspect industriel

La très rapide croissance du marché des centrales et sa dissémination dans une soixantaine de pays pose une série de problèmes de capacité industrielle et d'organisation. Il s'agit en effet, dans un espace de temps limité, de l'ordre d'une dizaine d'années, de mettre en place des outils industriels et des autorités de sûreté capables d'assurer une multiplication par 10 des mises en service des centrales (et par près de 50 en 2030) sans risques majeurs, ni sur le plan de la protection des populations, ni sur le plan technique et économique. En amont, il est indispensable d'investir massivement et très rapidement dans l'ouverture de nouvelles mines d'uranium, d'autant que le délai entre la décision d'investissement et la mise en exploitation de telles installations se situe entre 10 et 15 ans, voire 25 ans pour des mines présentant des difficultés particulières d'exploitation, et dans des unités d'enrichissement et de fabrication capables de fournir les quantités de combustibles indiquées dans le graphique ci dessous.

**Besoins de combustibles  
des scénarios SUNSET et SUNBURN**



La capacité de construction et de mise en place de centrales doit rejoindre dès 2018 la capacité mondiale maximale observée en 1984, avant l'accident de Tchernobyl, et continuer à augmenter à un taux extrêmement rapide (10 % an) jusqu'en 2030.

Enfin, compte tenu de la nécessité de se prémunir contre une pénurie d'uranium, il faut aussi développer très rapidement une dizaine d'unités de retraitement du combustible (d'une capacité moyenne de 800 tonnes par an) pour en extraire le plutonium indispensable d'abord au MOX puis aux réacteurs de quatrième génération. Dans un deuxième temps, il faudra des usines de retraitement dédiées au combustible Thorium 232/Uranium 233.

Pour retraiter 50 % du combustible irradié en 2030, il faudrait une capacité de retraitement de l'ordre de 11 000 tonnes par an à comparer avec la capacité actuelle de 4 100 tonnes par an (combustibles pour les réacteurs à eau).

### ***Les besoins en compétences***

Les deux scénarios posent des problèmes différents en termes de ressources humaines et de compétences. Pour le scénario Sunset, la difficulté majeure sera d'inciter suffisamment de jeunes à suivre les formations nécessaires pour répondre aux besoins en techniciens et ingénieurs dans un contexte de décroissance de l'activité.

Le scénario Sunburn pose le problème inverse : comment former suffisamment de personnes pour répondre à une demande fortement croissante à partir de 2015 ? Un ordre de grandeur : en supposant un besoin de 500 personnes par GW uniquement pour l'exploitation des réacteurs nucléaires, il faut former plus de 500 000 personnes d'ici 2030 y compris dans des pays dénués pour l'instant de toute infrastructure. En retenant un délai de 3 ans pour un technicien et 6 ans pour un ingénieur, il faudrait que les structures soient opérationnelles d'ici 2010. Corollaire : Est-ce qu'il existe suffisamment de formateurs ou faut-il prévoir de former d'abord les formateurs ?

### ***La gouvernance***

La protection contre les risques spécifiques de la filière nucléaire implique une organisation rigoureuse au niveau des États qui développent un programme nucléaire civil, pour assurer la sûreté et la sécurité des installations (réacteurs, installations de l'amont et de l'aval du cycle, transports et stockage de matières radioactives, gestion des déchets radioactifs, etc.). Cette mise en place suppose non seulement un investissement humain et organisationnel majeur de la part des pays qui souhaitent se doter d'un programme dans les 10 à 15 ans qui viennent mais aussi la fixation de règles internationales qui s'imposent à tous les pays concernés (circulation des matières et déchets, mesures contre les risques de prolifération, sûreté et sécurité des installations, etc.).

### ***Les risques spécifiques***

Les risques spécifiques du scénario SUNBURN (par comparaison au scénario SUNSET) sont liés à la multiplication des installations, à leur rapide dissémination géographique et à l'irréversibilité des solutions technologiques qu'il induit. En voici quelques exemples :

#### *Les risques d'accident.*

À technologie donnée les risques intrinsèques d'accident sont a priori proportionnels au nombre d'installations et à la durée de vie de ces installations. Mais le risque réel d'accident est pour une large part dépendant des conditions de gouvernance et d'exploitation comme l'ont bien montré les accidents de Three Miles Island et surtout de Tchernobyl. Les risques d'accident qu'implique un tel programme par rapport à SUNSET jusqu'à la fin du siècle, même s'ils sont difficilement appréciables, sont donc au minimum proportionnels au cumul comparé des productions électriques (5,4) mais très probablement supérieurs du fait de l'inhomogénéité des précautions qu'on risquerait de rencontrer dans les 60 pays concernés.

#### *Les risques de prolifération*

La croissance du volume de matières nucléaires en circulation, l'évolution de leur nature et la dissémination géographique des implantations sont des facteurs qui jouent fortement sur les risques de prolifération.

- Volume et nature des matières : l'ampleur du programme qui implique à moyen terme le retraitement et la séparation du plutonium d'une part très importante du combustible UOx irradié conduit à la gestion de quantités de plutonium sans commune mesure avec celles que nous connaissons aujourd'hui (en 2005, le retraitement concerne 25 % environ du combustible usé). On doit s'attendre à devoir gérer à partir de la fin des années 2020 des quantités de plutonium séparées de l'ordre de 800 tonnes de plutonium (production, stockage, transports, recyclage) 20 à 40 fois supérieures à celles d'aujourd'hui.
- Dissémination géographique : la dissémination dans 60 pays multiplie les installations et les transports entre sites des matières les plus dangereuses et en particulier du plutonium s'il est sous forme séparée.
- Dissémination technologique ; l'augmentation des besoins en capacité d'enrichissement et de retraitement augmentera le risque de dissémination de technologies duales.

La combinaison de ces deux phénomènes multiplie donc les risques potentiels de détournement de matières fissiles dans des proportions considérables.

#### *Les risques liés aux déchets*

Le volume des déchets à longue durée de vie augmente au rythme du cumul de la production d'électricité. Le scénario SUNBURN implique donc la gestion, l'entreposage et éventuellement le stockage de quantités de déchets nouveaux 5,4 fois plus élevées que dans le scénario SUNSET d'ici 2080. De plus la dissémination géographique de la production de ces déchets conduit, soit au « mitage » d'une bonne part de la planète par des installations d'entreposage ou de stockage considérées comme problématiques, soit à des transports à risque vers un nombre

plus limité de sites, dans la mesure (aujourd'hui considérée comme improbable et contestable) où certains pays accepteraient de stocker chez eux ces déchets dangereux.

## Conclusions

À l'issue de cette présentation les auteurs s'entendent sur un certain nombre de conclusions mais divergent dans leurs appréciations sur l'avenir qu'ils considèrent comme souhaitable.

Nous présentons tout d'abord ci-dessous les conclusions que nous partageons.

L'exercice auquel nous nous sommes livrés de construction d'un scénario de relance massive du nucléaire mondial, SUNBURN, essentiellement fondé sur une analyse de l'évolution des besoins d'électricité de l'ensemble des pays du monde d'ici 2030, sans autre contrainte que celles d'ordre technique ou de dynamique industrielle, conduirait à une croissance massive des marchés nucléaires d'ici 2030 : de 3 GW par an ces dernières années, le marché annuel pourrait ainsi passer à 100 GW en 2030, si aucune contrainte, ni d'acceptation des populations, ni économiques et financières, ni techniques, ni politiques, ne venaient en perturber le développement. Avec une production totale de 8 900 TWh en 2030 (contre 2 577 TWh en 2005), il nous paraît représenter une borne supérieure « optimiste » de ce que pourrait représenter la contribution maximale d'un programme massif mondial de relance du nucléaire.

S'il était intégralement appliqué, il permettrait d'éviter, en 2030, 9 % de l'ensemble des émissions de CO<sup>2</sup> par rapport au scénario prévisionnel de l'AIE, mais seulement 2,9 % des émissions cumulées de 2006 à 2030 de ce même scénario, soit 7 mois d'émissions de l'année 2030.

Il permettrait d'autre part une économie cumulée d'ici 2030 de 8 GTEP de combustibles fossiles, essentiellement du charbon et du gaz naturel. Il s'avérerait par contre largement inopérant dans le domaine pétrolier car le peu d'électricité mondiale produite avec du pétrole l'est généralement pour des besoins de pointe (excepté dans des quelques pays pétroliers)

Au-delà de ces conclusions communes chacun des auteurs a souhaité apporter les commentaires suivants.

### *Le verre d'eau est à moitié plein (Philippe Girard)*

Dans l'état actuel de la technologie, seule l'énergie nucléaire est capable de répondre aux besoins électriques en base sans émission de CO<sup>2</sup>, sauf dans les quelques pays dont les caractéristiques géographiques et économiques permettent un recours massif aux énergies renouvelables. Par ailleurs, les spécificités du nucléaire font que les bénéfices se font surtout sentir après la phase de développement : les véritables gains en termes d'émission de CO<sup>2</sup> interviennent au-delà de 2030. Entre le scénario Sunset et le scénario Sunburn, qui constituent deux visions extrêmes, l'énergie nucléaire devrait avoir une plage de développement significatif dans les prochaines années. Par rapport aux hypothèses retenues pour Sunburn, ce développement concernera probablement un nombre plus restreint de pays apportant les garanties suffisantes dans la gestion des principaux risques (sûreté, prolifération, déchets). À plus long terme, le développement durable de l'énergie nucléaire nécessitera, d'une part, que soit mis en œuvre une solution acceptable et acceptée pour les déchets de haute activité, d'autre part, un recours aux filières surgénératrices (Pu 239/U 238; U233/Th 232). La situation actuelle (changement climatique, prix des combustibles fossiles) est effectivement particulièrement favorable à l'énergie nucléaire... mais il faut raison garder et envisager une relance raisonnable mais durable du nucléaire intégrant ses spécificités.

### *Le verre d'eau est bien plus qu'à moitié vide ! (Benjamin Dessus)*

Les conséquences positives de ce très ambitieux programme d'ici 2030 restent très marginales à la fois sur les émissions de gaz à effet de serre et sur les ressources fossiles, en particulier celles de pétrole. Et même à plus long terme, le programme engagé tarde à faire sentir ses effets : il faut attendre 15 ans de plus (2045) pour que l'économie de CO<sup>2</sup> atteigne deux ans d'émissions de 2030 ! En regard de ces gains manifestement marginaux, des risques importants : l'inflation rapide des risques d'accidents majeurs et d'accidents de transport des matières nucléaires et des risques de prolifération pour les 80 ans qui viennent, la dissémination des sites d'entreposage ou de stockage à très long terme à la surface de la planète, une vulnérabilité considérablement augmentée vis-à-vis des actions de nature terroriste.

Mais c'est peut-être surtout l'irréversibilité induite par l'ampleur d'un tel programme qui est la plus préoccupante. Ce programme, au-delà de l'échéance de 2030, engage en effet l'avenir de façon irréversible, au moins jusqu'à la fin du siècle, en imposant la réussite du pari d'une généralisation à l'échelle de la plupart des pays du monde de filières nucléaires reposant sur l'usage massif du plutonium, rendu indispensable au nom de la pérennité de la ressource. Pari d'autant plus risqué qu'il n'existe aujourd'hui aucune certitude sur la faisabilité technico-économique de ces nouvelles filières. C'est bien ces risques et cette irréversibilité qui doivent être mis en regard des gains potentiels sur les émissions de CO<sup>2</sup> et sur les ressources fossiles pour apprécier l'opportunité réelle pour l'humanité de se lancer dans une telle aventure. ■