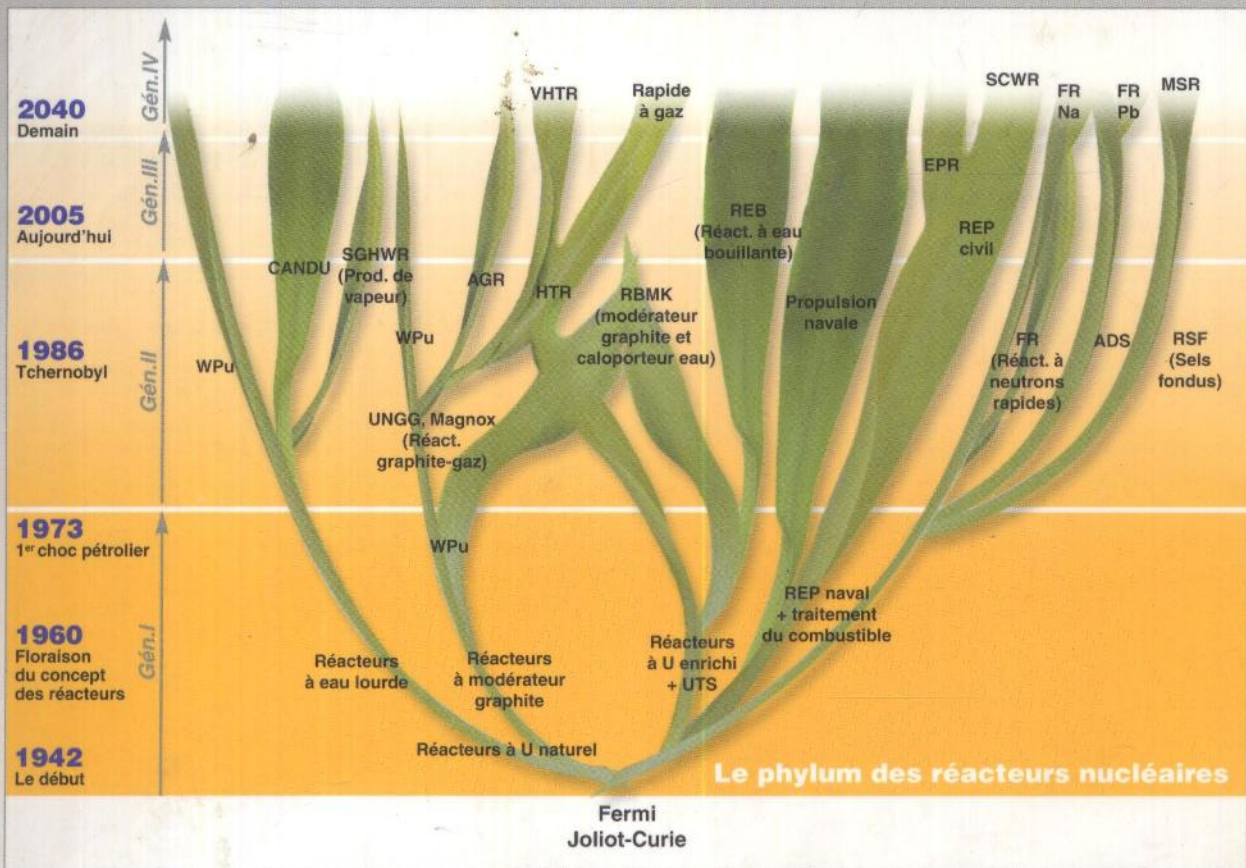


# e-den

Une monographie de la Direction  
de l'énergie nucléaire

## L'énergie nucléaire du futur : quelles recherches pour quels objectifs ?



G 192

Commissariat à l'énergie atomique

e-den

Une monographie de la Direction  
de l'énergie nucléaire



31051 (A)

# L'énergie nucléaire du futur : quelles recherches pour quels objectifs ?



# Table des matières



Préface	5
Avant-propos	7
Aux origines du nucléaire civil actuel	11
Les réacteurs à eau ordinaire, espèce dominante	11
Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée	12
Le combustible et son cycle	15
Le cycle du combustible	17
Pourquoi recycler le plutonium ? Le combustible MOX...	18
Les déchets radioactifs et leur gestion actuelle	19
Origine des déchets radioactifs	19
Les différentes catégories de déchets radioactifs	19
Le devenir ultime des déchets à longue durée de vie (« B » et « C »)	20
Le déclasserment et le démantèlement des installations nucléaires	23
Les enjeux	23
Le déclasserment-démantèlement : un des grands chantiers du CEA...	23
...et un important marché qui émerge	24
Les technologies d'aujourd'hui et celles de demain	24
Les déchets de démantèlement	25
Le retour d'expérience en matière de déclasserment-démantèlement	25
Sûreté du nucléaire : les enjeux	27
Le citoyen attache une grande importance aux risques du nucléaire	27
Nucléaire et environnement	27
Nucléaire et santé	28
Sûreté et... démonstration de sûreté	29
Les risques liés à la prolifération nucléaire	30
Les risques liés aux attentats terroristes	31
Les risques liés aux transports de matières nucléaires	31
Les risques liés au stockage des déchets nucléaires	31
La confiance, une prudente construction...	32
L'énergie dans le monde	33
L'utilisation de l'énergie	33
Une forme d'énergie particulière : l'électricité...	33
La consommation mondiale d'énergie primaire	33
Les énergies fossiles	35
Énergies fossiles, CO <sub>2</sub> et changement climatique	36
La contribution relative des différentes sources d'électricité à la production de gaz à effet de serre (GES)	36
Les énergies renouvelables	36
Le défi de l'énergie	37
L'économie du nucléaire	39
Le nucléaire dans le monde	41
Le futur proche : les recherches pour soutenir le nucléaire existant	47
Utiliser plus efficacement le combustible nucléaire	47
Allonger la durée de vie des réacteurs existants	51
Le vieillissement des composants de la centrale	51
Le vieillissement des composants remplaçables	52

<b>Préparer le remplacement des réacteurs actuels par des réacteurs de 3<sup>e</sup> génération plus efficaces et plus sûrs</b>	<b>53</b>
La première génération de réacteurs	53
La deuxième génération de réacteurs	53
La troisième génération	54
Les enjeux industriels	55
Principales caractéristiques de l'EPR	55
Objectifs et défis de la R&D	55
<b>Les recherches sur la gestion des déchets</b>	<b>59</b>
Quelles perspectives ouvrent-elles ?	59
Plusieurs enseignements se confirment aujourd'hui	59
La séparation poussée : quelles conséquences sur la gestion à long terme des déchets ?	60
La transmutation des éléments séparés : les cycles futurs	62
Le conditionnement des déchets et le comportement à long terme des colis	63
L'entreposage : une solution d'attente...	65
<b>Le cycle du combustible des systèmes nucléaires du futur : quelques éléments d'orientation</b>	<b>67</b>
Quelle stratégie de gestion des matières adopter ?	67
Quels procédés de recyclage choisir ?	68
Quelles lignes d'action privilégier pour la recherche ?	69
En résumé...	71
<b>Les ressources en uranium</b>	<b>73</b>
L'élément uranium	73
Les gisements d'uranium	73
<b>De l'origine des espèces (de réacteurs) : filières et générations</b>	<b>75</b>
Matières fissiles et fertiles	75
Caloporteur	75
Modérateur	75
Les « filières » d'aujourd'hui	76
Dans un futur plus lointain...	77
<b>Les systèmes nucléaires du futur : un cadre international pour le développement d'une nouvelle génération de systèmes nucléaires</b>	<b>81</b>
Le forum international « Generation IV »	81
Carte d'identité des systèmes sélectionnés	82
Quelles recherches pour les systèmes nucléaires du futur ?	86
Les réacteurs à caloporteurs sodium : une expertise qui conserve toute son actualité...	87
Les réacteurs à caloporteurs gaz (RCG) : un axe de développement privilégié...	88
<b>Les réacteurs à caloporteur gaz</b>	<b>89</b>
Les réacteurs à caloporteur gaz à spectre thermique	89
Le réacteur à très haute température (RTHT)	90
Faire de l'hydrogène nucléaire ?	91
Vers le RTHT : quel type de recherche ?	92
Le réacteur rapide à caloporteur gaz	93
Vers un démonstrateur européen de réacteur à caloporteur gaz de 4 <sup>e</sup> génération...	93
<b>Autres voies pour le futur lointain : cycle du thorium, systèmes hybrides, fusion...</b>	<b>95</b>
Le cycle thorium	95
Des systèmes pilotés par accélérateur pour la transmutation des déchets	96
La fusion thermonucléaire	98
Le projet « ITER » et les perspectives de la fusion nucléaire	100
<b>Conclusion</b>	<b>101</b>
<b>Glossaire – index</b>	<b>103</b>

Alors que le nucléaire civil connaît un véritable regain d'intérêt, il faut savoir aussi exactement que possible de quoi on parle, qu'il s'agisse du nucléaire proprement dit ou des sciences et techniques qui lui sont associées. Pourtant, les documents de synthèse de bon niveau scientifique sur ce type d'énergie sont rares... Pour combler cette quasi-lacune et donner à ses travaux l'éclairage qu'ils méritent, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) dresse, sous forme de courtes monographies, un tableau complet des recherches en cours dans le domaine de l'énergie nucléaire civile.

Celles-ci étant pluridisciplinaires et de nature diverse, la série de monographies du CEA explore et synthétise des thèmes aussi différents, mais complémentaires, que les réacteurs du futur, le combustible nucléaire, les matériaux sous irradiation ou les déchets nucléaires...

S'adressant à la fois à des scientifiques dont ce n'est pas le domaine de compétence, mais qui sont en quête d'information, et à un plus grand public curieux de son environnement technologique présent et futur, les monographies du CEA présentent les résultats récents de la recherche dans leur contexte et avec leurs enjeux.

## L'énergie nucléaire du futur : quelles recherches pour quels objectifs ?

**L**e présent volume, hors-série, est destiné à introduire cette collection de monographies.

Comme toutes les autres sources d'énergie primaire, le nucléaire civil doit contribuer à satisfaire la soif d'énergie d'un monde à la population croissante et en développement rapide. Encore jeune (il n'a que 50 ans...), on peut en espérer de grands progrès qui le rendront moins cher, plus propre, plus sûr et plus économe des ressources naturelles. On peut également en attendre une utilisation diversifiée, par exemple pour produire de l'hydrogène ou fournir de l'eau potable par dessalement de l'eau de mer. Ces perspectives justifient et sous-tendent un effort de recherche dont le cadre et les enjeux dépassent largement les frontières nationales.