

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

ÉCONOMIE DES DIFFÉRENTES OPTIONS DU NUCLÉAIRE DE LONG TERME

Thierry Duquesnoy,

DEN / DANS / I-tésé

Institut de Technico-Économie des Systèmes Énergétiques

Thierry.duquesnoy@cea.fr

CNRS, 2^{ième} rencontre du cycle : « La transition énergétique en France, une cartographie des enjeux et des controverses »

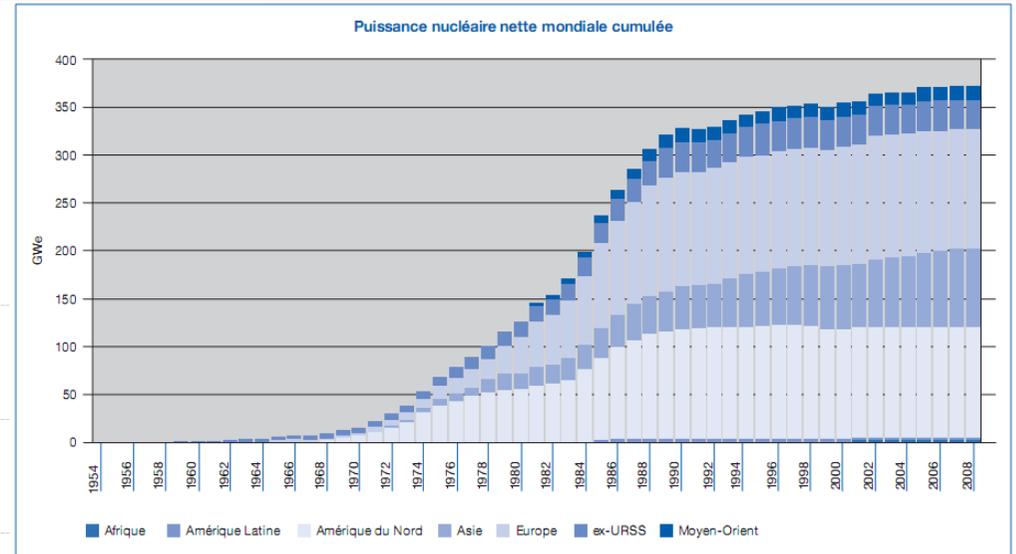
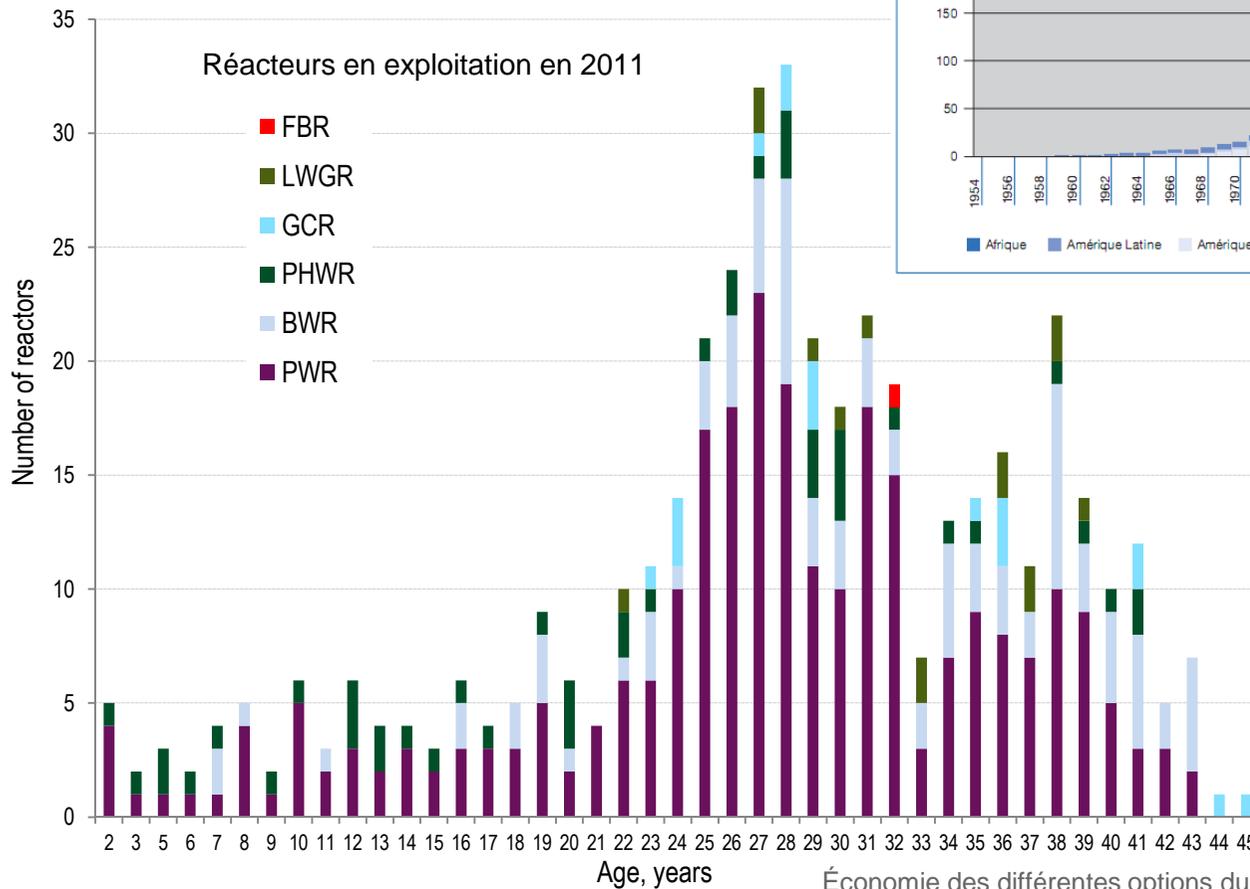
le 22 octobre 2013

LE PRÉSENT

GÉNÉRATION II

■ Parc mondial :

- 433 réacteurs,
- Fort développement 1970-1990
- Croissance en Asie



■ Expérience :

- 14 000 ans.réacteurs
- Études et surveillance du vieillissement des composants

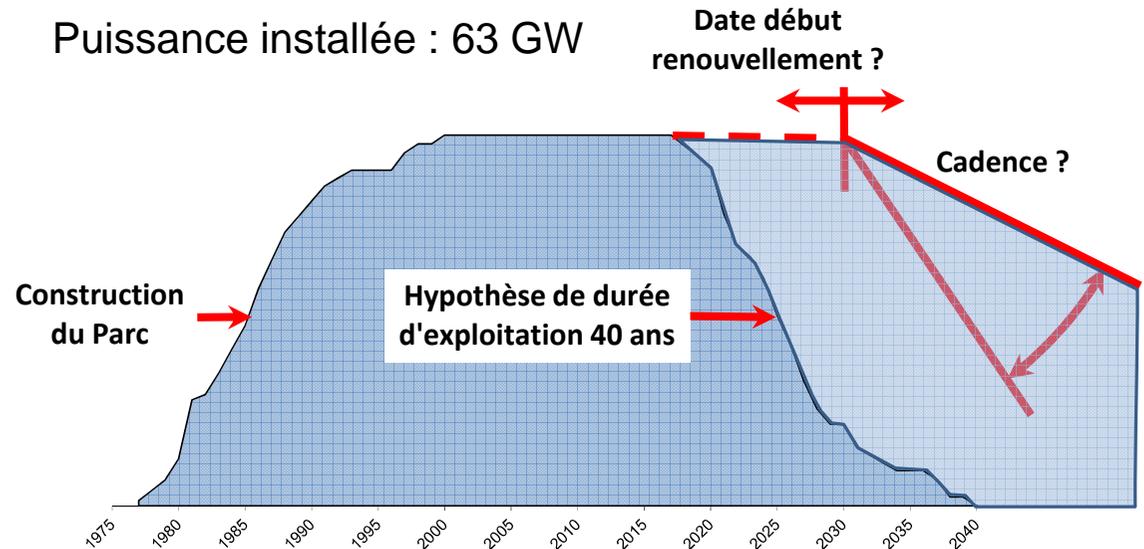
■ Parc français :

- 58 réacteurs, âge de 14 à 36 ans
- Intégration du retour d'expérience français et international
- Programmes jeunesse et post-Fukushima en cours

■ Temps caractéristiques :

- Quelques mois à années pour la prise en compte du retour d'expérience
- 40 à 60 ans d'exploitation pour les réacteurs de puissance (inspection et réexamen de sûreté tous les 10 ans)
- 5 à 10 ans pour la construction d'un réacteur
- 10 ans pour le retour d'expérience d'un prototype ou d'une tête de série
- Quelques dizaines d'années pour le développement d'une filière

⇒ **Les évolutions d'un parc s'étudient à l'échelle du siècle**

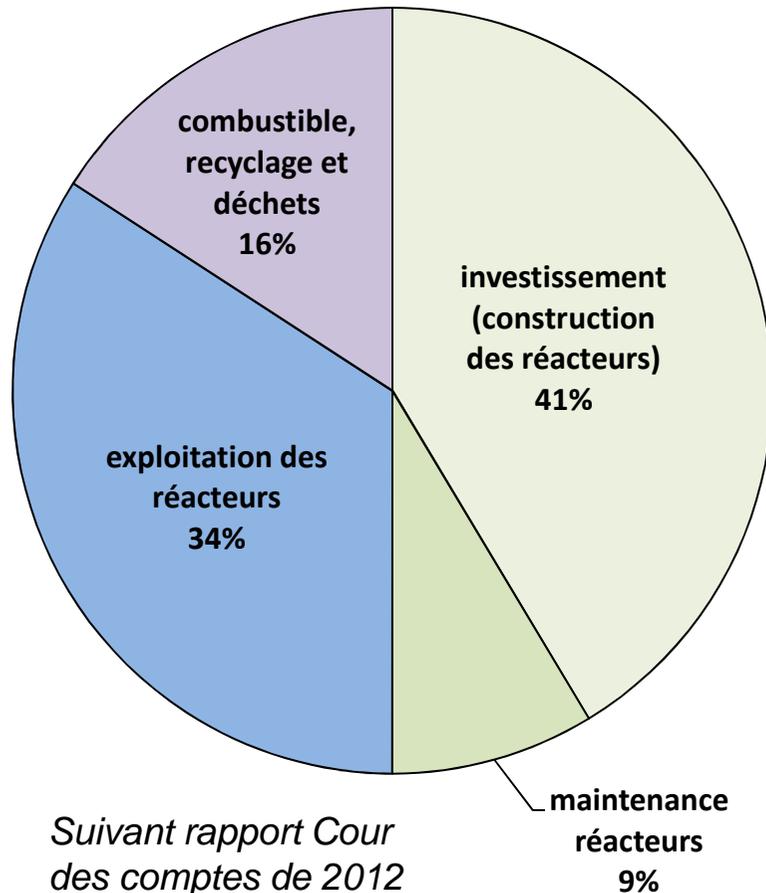


COÛT DE PRODUCTION DE LA GÉNÉRATION II

- Le coût de production pour le parc actuel (génération II) :
 - Est de **50 €/MWh** aux conditions économiques de 2010,
 - Passera à environ **55 €/MWh** par effet du programme de jeunesse et des dispositions post-Fukushima.

 - Il résulte d'un développement basé sur :
 - **Stratégie industrielle** d'ensemble,
 - **Répartition claire des rôles** entre les différents acteurs,
 - **Opérateur unique** (rationalisation de l'organisation et standardisation),
 - **Déploiement par paliers** générant économies d'échelle et progrès :
 - Amortissement des effets de têtes de série des paliers CP0, CPY, P4 et N4,
 - Gains par effet de taille 900, 1300, 1450 MWe,
 - Effet de série dans la réalisation de chaque palier,
 - **Duplication d'unités sur un même site.**
- ⇒ Le nucléaire de génération II, en France, illustre la mise en place efficace d'une filière**

COÛTS DE PRODUCTION DE LA GÉNÉRATION II



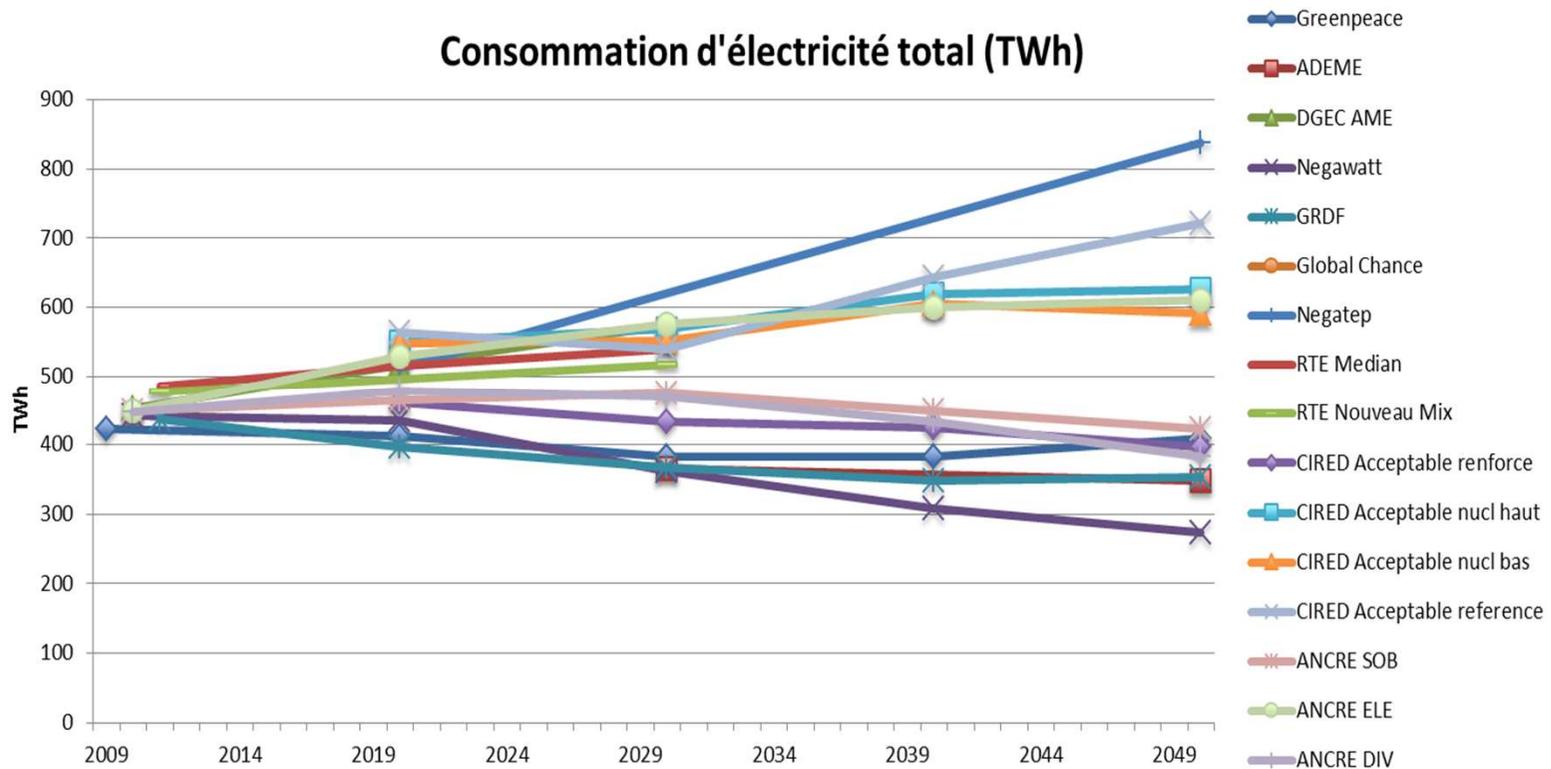
- Les coûts du nucléaire actuel sont maîtrisés.
- L'étude OCDE/AEN de 2012 (post-Fukushima) :
 - Confirme l'intérêt de prolonger l'exploitation des réacteurs existants,
 - y compris en France où les coûts de jouvence et dispositions post-Fukushima sont les plus élevés dans le monde avec 1 Md€ par GW électrique installé.

⇒ **Autour de 55 €/MWh, contre environ 70 €/MWh pour le gaz, le parc actuel est très compétitif**

LE FUTUR PROCHE

GÉNÉRATION III

PROSPECTIVE DES BESOINS EN ÉLECTRICITÉ DANS LES DIVERS SCÉNARIOS DU DNTÉ



■ À l'horizon 2050 en France : une perspective entre -30% et +80% des besoins en électricité,

⇒ **Tendance générale à l'augmentation de la production pour participer à l'augmentation de l'efficacité globale**

DÉTERMINANTS DE LA PLACE DU NUCLÉAIRE DANS LE MIX ÉLECTRIQUE DU FUTUR

■ Les orientations politiques définies par rapport :

- Aux engagements internationaux génériques :
 - Réduction des émissions de CO2 (facteur 4, 450 ppm, ...),
 - Règle des 3x20 en 2020 (et au-delà) du plan énergie-climat européen.
- Aux objectifs nationaux :
 - Grenelle et engagements post-Grenelle (mesures techniques supplémentaires pour atteindre les objectifs de 2020),
 - Les engagements du gouvernement actuel :
 - part du nucléaire,
 - rénovation et construction des logements neufs, ...

⇒ Dispositions réglementaires, fiscales, économiques en place

■ La performance économique :

- Coûts de production de l'électricité par les différentes énergies,
- Coûts induits sur le réseau (back-up, renforcement) et entre les énergies.

⇒ Maintien de la compétitivité de l'électricité française

QUELS CRITÈRES POUR ÉVALUER LES CHOIX ? (EX DES SCÉNARIOS DE L'ANCRE)

Évaluation
Micro &
Macro
économique

■ Indicateurs/critères économiques :

- Coûts de référence des filières et coût moyen du parc
- Emploi (direct, indirect et induit)
- Balance commerciale (matières premières, équipements et services)
- Prix de l'énergie au consommateur (industrie et ménages)
- Trajectoire d'investissement et modalités de financement
- Endettement public (tenant compte des recettes fiscales et du financement)

Environnement
Climat

■ Indicateurs/critères environnementaux :

- Environnement local (pollution atmosphérique, eau, sol)
- Risques industriels et accidentels (y.c. terrorisme)
- Environnement global (CO₂, CH₄)
- Emprise sur les sols et biodiversité
- Ressources naturelles et matériaux stratégiques
- Vulnérabilité aux crises géopolitiques

Évaluation
Économique
de la R&D
Prospective

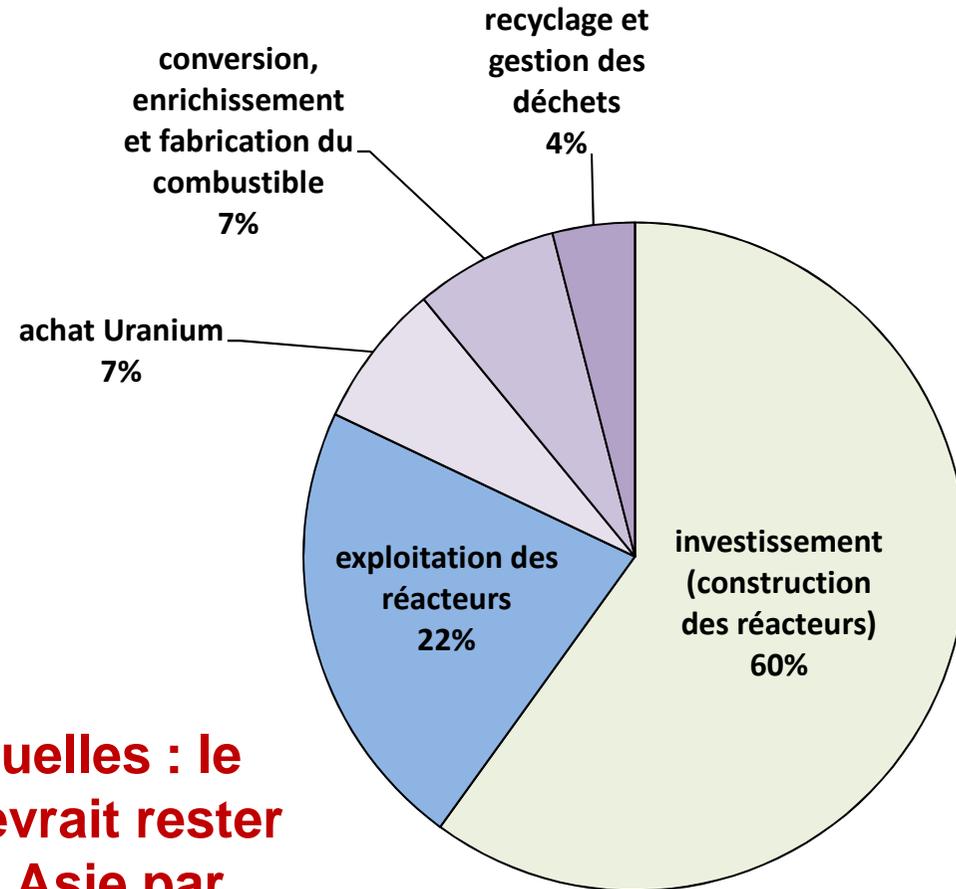
■ Indicateurs/critères science et technologie :

- Maturité des technologies (disponibilité, coût, capacités industrielles)
- Besoins en R&D (roadmaps, structurations des programmes, financement)
- Projets pilotes et de démonstration
- Instruments à long terme d'incitation (tarif de rachat, appels d'offres, ...)
- Stratégie de diffusion des innovations auprès des consommateurs
- Articulation développement technologique – développement industriel

- **L'EPR est le modèle de génération III le plus avancé :**
 - Europe, OL3 et FLA3 ont des coûts de construction élevés, environ 8 Md€, **liés aux effets de têtes de série industrielle,**
 - Chine, les 2 EPR de Taishan bénéficient du retour d'expérience, la réduction des durées de construction reflète la réduction des coûts.
 - Caractéristiques principales :
 - Capacité de 1630 MWe,
 - Disponibilité de 92%,
 - Dimensionnement pour 60 ans d'exploitation.
 - D'autres types de réacteurs, de taille intermédiaire (ATMEA, AP1000, ...), voire de faible taille avec les SMR, complètent l'offre par rapport aux réseaux et critères de choix locaux.
- ⇒ Les têtes de série EPR montrent l'importance de la disponibilité de l'infrastructure industrielle sur les coûts de construction.**

COÛT DE PRODUCTION DE LA GÉNÉRATION III

- CEA/I-tésé évalue le coût de production de l'EPR, déployé en série industrielle, **entre 60 et 75 €/MWh**
- Structure de coût du nucléaire de génération III →



⇒ **Suivant les estimations actuelles : le nucléaire de génération III devrait rester compétitif en Europe et en Asie par rapport au gaz et au charbon... qui devront supporter les pénalités carbone**

Source CEA/I-tésé

LE LONG TERME

GÉNÉRATION IV

BESOINS MONDIAUX EN URANIUM

■ Besoins à court terme (générations II et III) :

- 65 000 t/an actuellement,
- valeur appelée à croître (notamment par le développement en Asie).

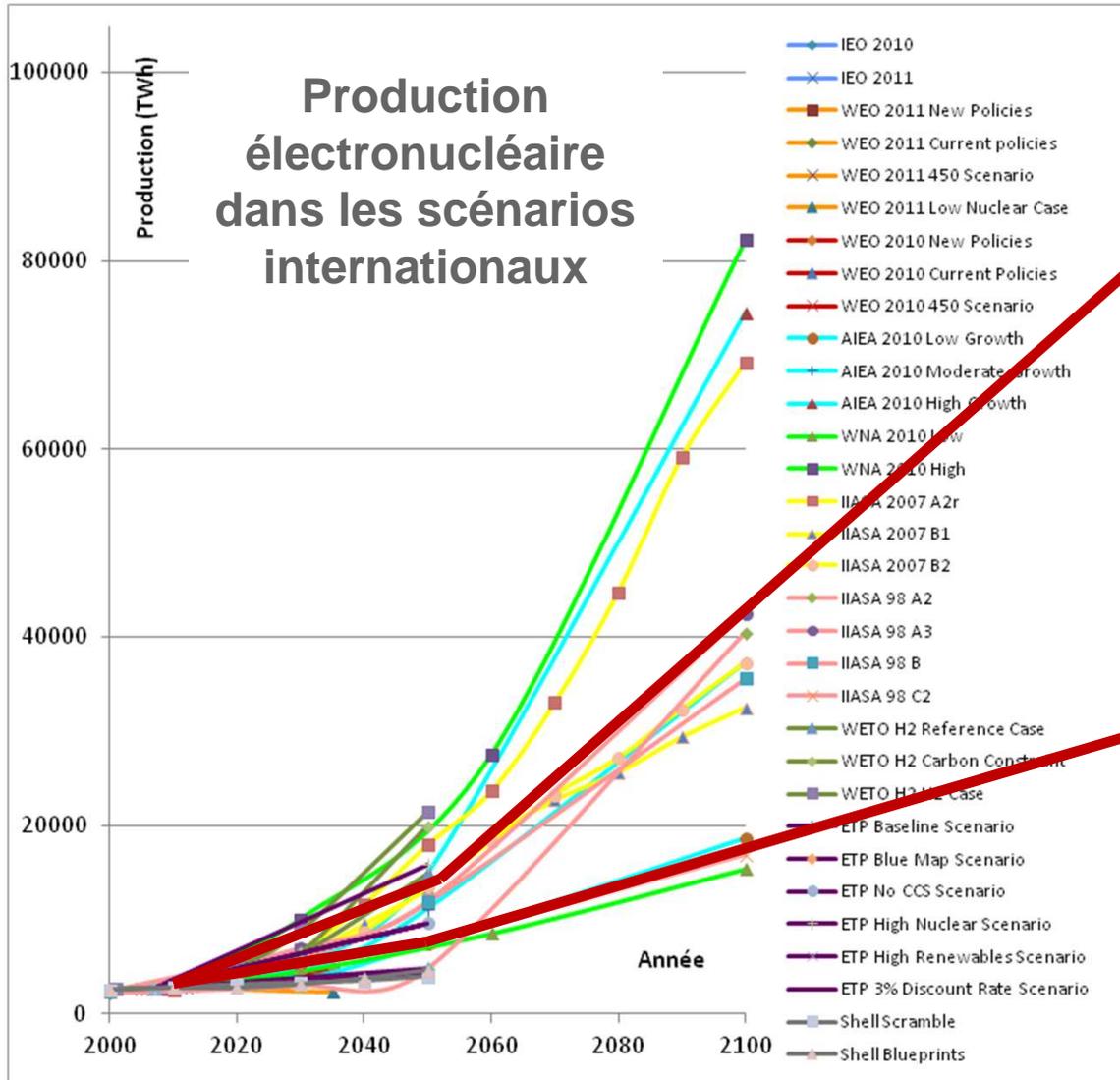
⇒ 7 Mt d'uranium (à prix modéré) sont suffisantes pour un siècle si la croissance du parc nucléaire est modérée

■ Besoins à long terme, la plupart des études prospectives internationales limitant les émissions de GES prévoient :

- Une croissance significative de la consommation électrique mondiale,
- Un développement du nucléaire en lien avec :
 - Sa compétitivité économique,
 - Ses faibles émissions de CO₂,
 - Un effet à terme limité de Fukushima.

⇒ Un simple doublement du parc mondial consommerait les 7 Mt d'uranium à prix modéré en 50 ans

PROSPECTIVE DE L'ÉLECTRONUCLÉAIRE

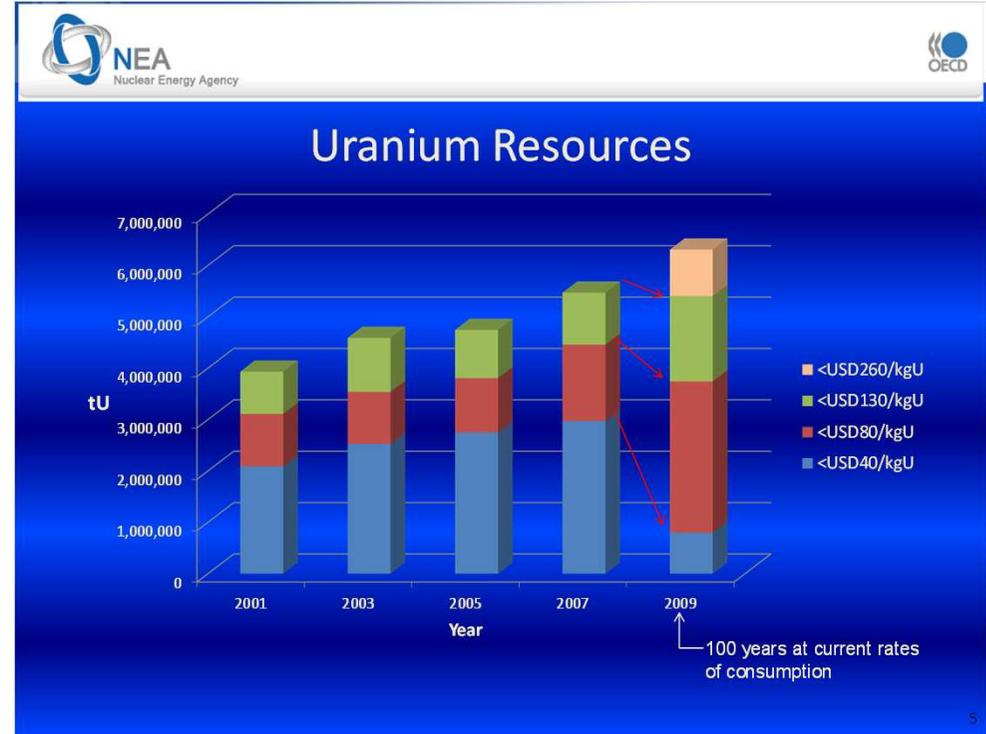
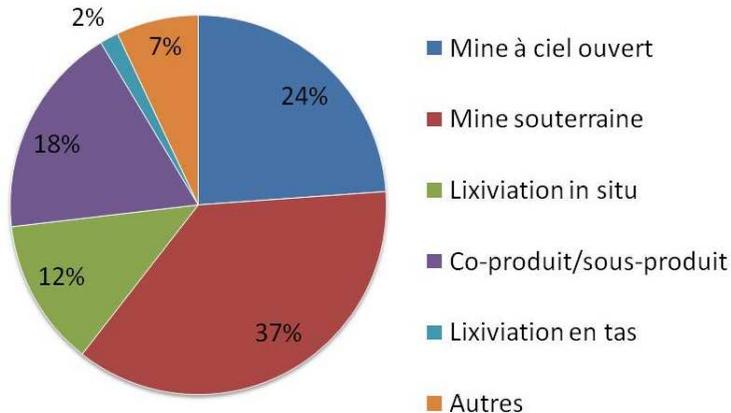


Scénarios IIASA (intermédiaires)				
	A2	A3	B	C2
2010	2500 TWh nucléaires			
2030	X 1.2	X 2.8	X 2.4	X 2.0
2050	X 1.9	X 4.7	X 4.7	X 3.0
2150	X 30	X 29	X 23	X 10

⇒ Pour le long terme, un choix de filière en fonction des ressources en uranium

- Ressources estimées en 2011 :
 - **7 Mt raisonnablement assurées ou présumées,**
 - **10 Mt pronostiquées ou spéculatives,**
 - **4 Mt non conventionnelles (phosphates).**

Ressources raisonnablement assurées (RRA)
(<130 USD/kgU)
par méthode de production

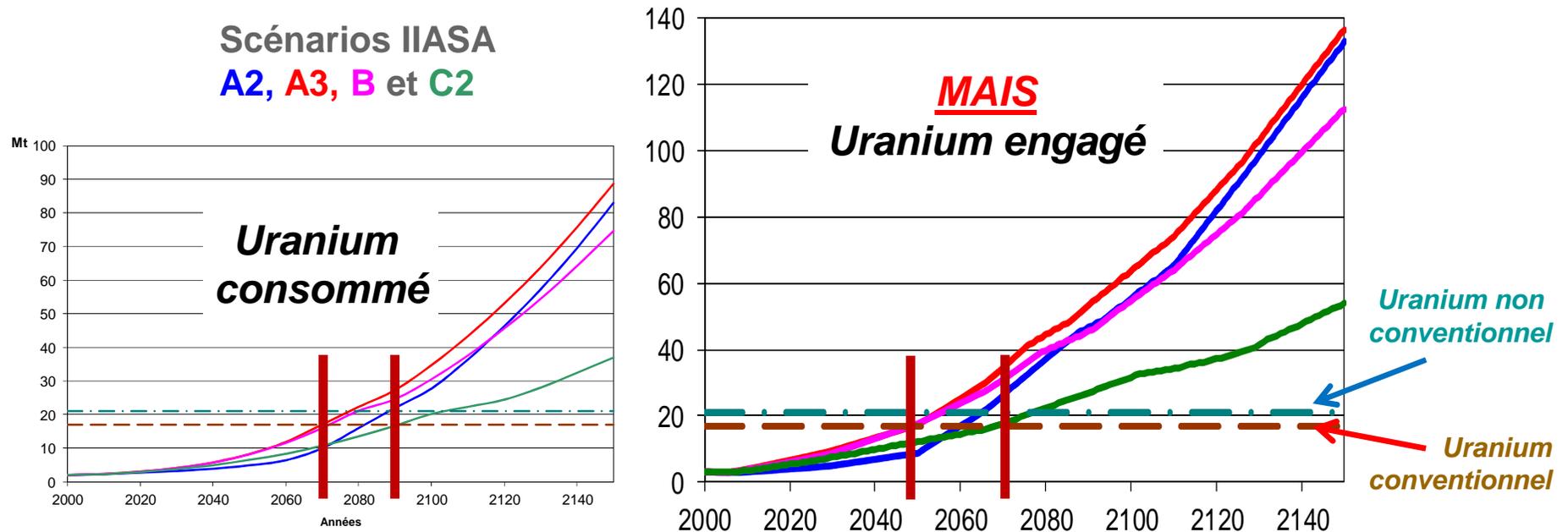


Nota :

- Des ressources très importantes dans l'eau de mer mais la faisabilité de l'extraction n'est pas acquise et son coût ne pourra qu'être très élevé,
- Le déstockage des matières militaires a perturbé le marché de l'uranium, il se termine.

CONTRAINTES SUR LES RESSOURCES EN URANIUM

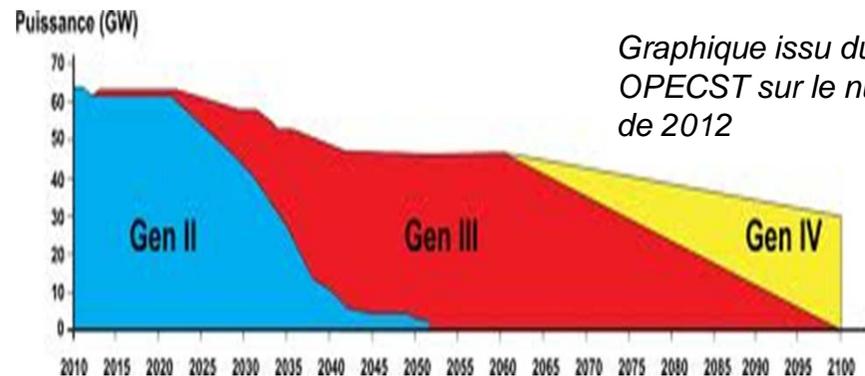
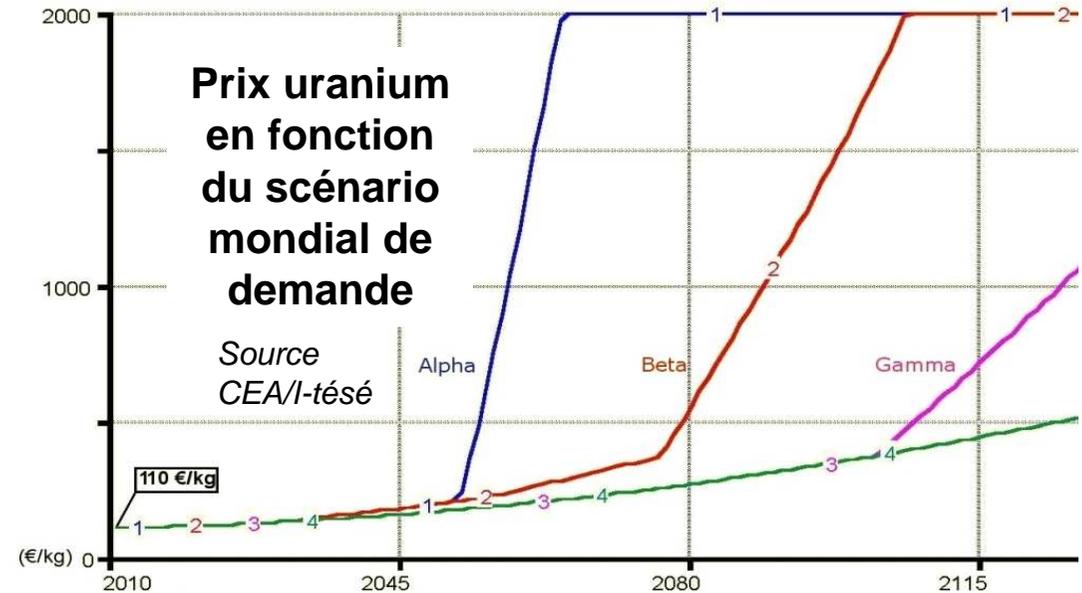
- Suivant les scénarios :
 - l'uranium conventionnel sera consommé à l'horizon 2070-2090,
 - mais il sera déjà engagé par les réacteurs en place d'ici 2050-2070.



⇒ **Les RNR paraissent nécessaires dans la seconde moitié du siècle**

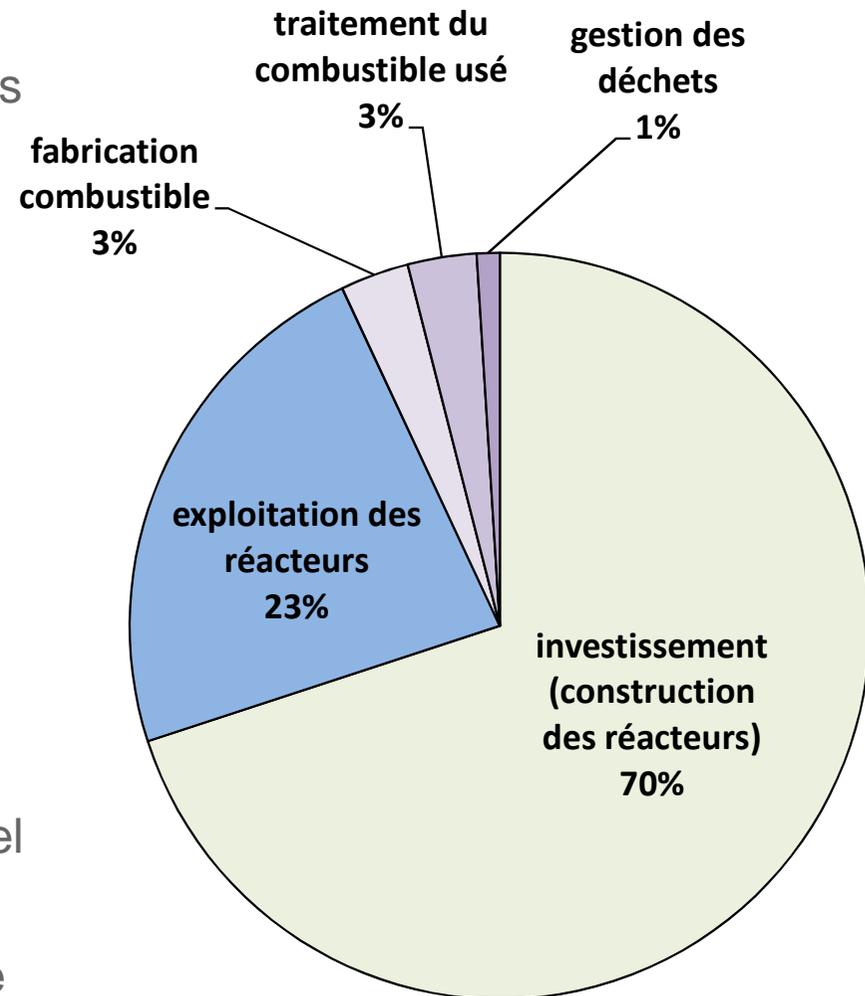
■ Transition vers un combustible Uranium appauvri – Plutonium dans un parc mixte entre REP et RNR :

- Optimiser l'utilisation de l'uranium naturel,
- Mettre en place la filière RNR,
- Amorcer le cycle Pu (réserve Uapp existe mais inventaire Pu à gérer).



COÛT DE PRODUCTION DE LA GÉNÉRATION IV

- Coût de construction des réacteurs :
 - Plus élevé (~30%) que les REL dans l'hypothèse du déploiement d'une filière industrielle,
 - Tissu industriel à constituer avec le démonstrateur technologique Astrid puis les prototypes et tête de série.
- Coût d'exploitation relativement stable
- Part cycle du combustible et gestion des déchets plus faible que les REL
- Compétitivité économique : date en fonction du prix de l'uranium
- Prédicibilité des coûts si tissu industriel national
- Potentielle position de leader française si marché international

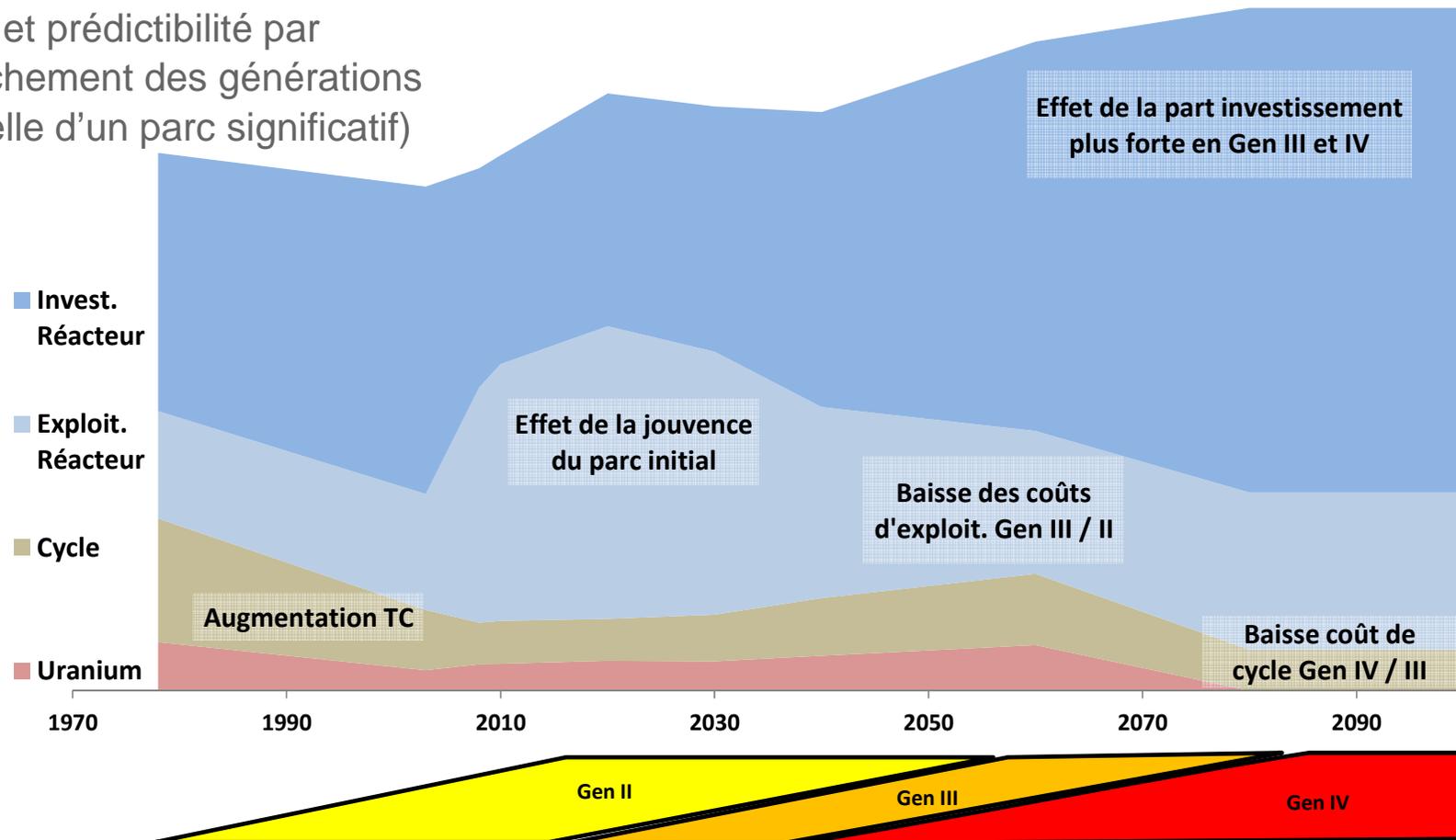


CONCLUSION

UN SCÉNARIO D'ÉVOLUTION DU COÛT DE PRODUCTION NUCLÉAIRE AU XXIÈME SIÈCLE

Evolution des structures du coût de production

Lissage et prédictibilité par chevauchement des générations (à l'échelle d'un parc significatif)



⇒ Une augmentation faible des coûts avec insensibilité au prix du CO2

COMPÉTITIVITÉ DU NUCLÉAIRE DANS LES PROCHAINES DÉCENNIES

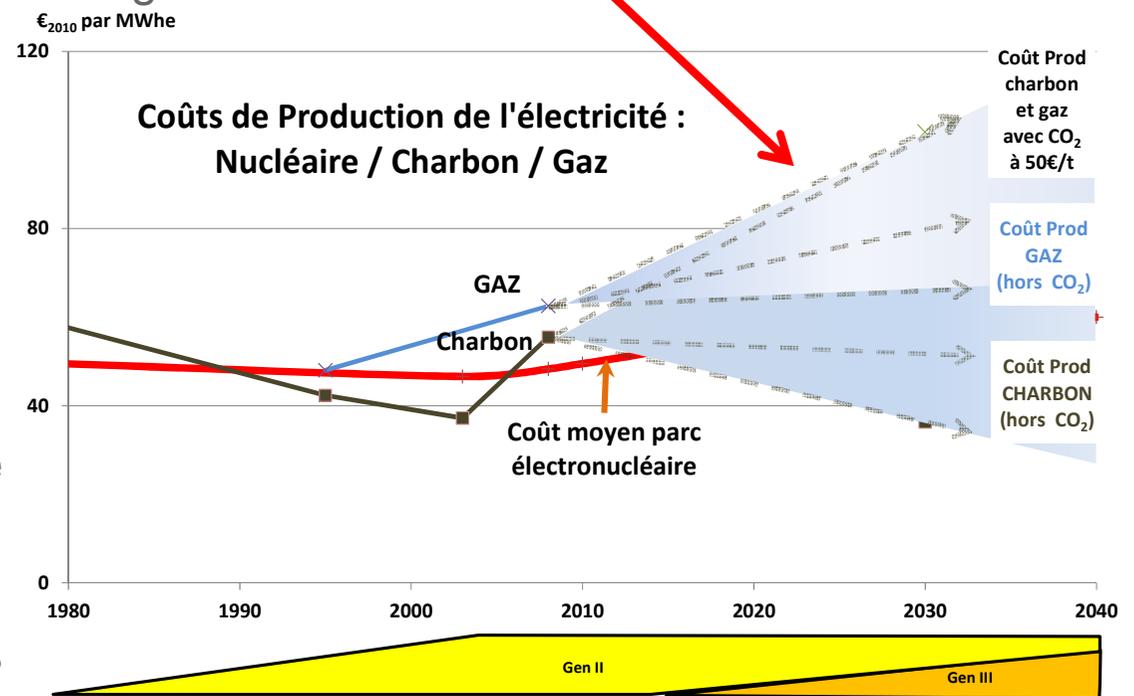
Le **nucléaire** REL (génération II&III) puis à terme RNR (génération IV) est :

■ **Dans la zone de compétitivité** avec moyens centralisés Gaz et Charbon, en Europe cela dépendra de :

- Durée de la bulle « gaz et huiles de roches mères »
- Politique menée par rapport aux émissions de CO₂,
- Choix qui seront faits vis-à-vis du gaz.

■ **Probablement compétitif et complémentaire par rapport aux ENR** dont il permettra l'essor :

- Base stable
- Gestion de l'intermittence
- Contribution au cycle de vie du solaire du futur
- Production d'hydrogène et nouveaux usages possibles



■ Le nucléaire historique :

- Est un moyen de production très compétitif,
- Tempère les effets des marchés sur la balance commerciale,
- Présente des synergies avec le développement des EnR,
- Prépare les prochaines générations dont le développement de la production électrique mondiale pourrait avoir besoin.
- En sortir de façon « précipitée » serait onéreux et émetteur de CO₂,

■ Les nucléaires du futur (génération III puis IV) :

- Se déclinent en un jeu ouvert de systèmes diversifiés
- Prennent en compte le retour d'expérience, sûreté accrue,
- Offrent des synergies vis-à-vis des autres énergies bas carbone,
- Offrent des marges de manœuvre au système énergétique,
- Présentent un coût de production prédictible.

⇒ Maintenir les options ouvertes face à un avenir incertain

⇒ R&D pour être prêt à déployer des filières industrielles

ANNEXES

RAPPORT DE LA COUR DES COMPTES SUR LES COÛTS DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

- Ce rapport de janvier 2012 donne :
 - Les dépenses passées d'investissement,
 - Les frais de fonctionnement et d'achat de combustible de façon détaillée,
 - Différentes évaluations menées en fonction de l'objectif :

Résultats des différentes évaluations du coût du MWh en 2010 en fonction de l'objectif poursuivi	En € ₂₀₁₀
- Le coût comptable, qui tient compte de l'amortissement du parc mais pas de la rémunération du capital	33,4 €/MWh
- Le coût de l'approche de la commission Champsaur, qui tient compte de l'amortissement du parc et de la rémunération du capital qui n'est pas amorti (objectif : calcul d'un tarif)	33,1 €/MWh
- Le coût courant économique (CCE), qui ne tient pas compte de l'amortissement du parc, qui rémunère le capital investi à l'origine en tenant compte de l'inflation (objectif d'un coût moyen de production sans référence historique).	49,5 €/MWh

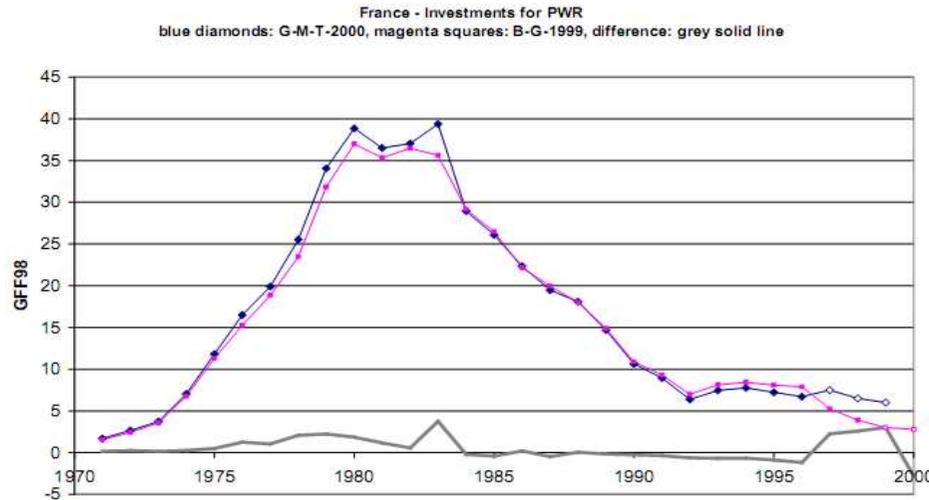
⇒ Les 2 premières méthodes (approches comptables) sont destinées à fixer un tarif de rachat dans le cadre de l'ouverture des marchés (ARENH).

⇒ La 3^{ème} correspond au calcul économique tel que présenté précédemment.

Source : Cour des comptes

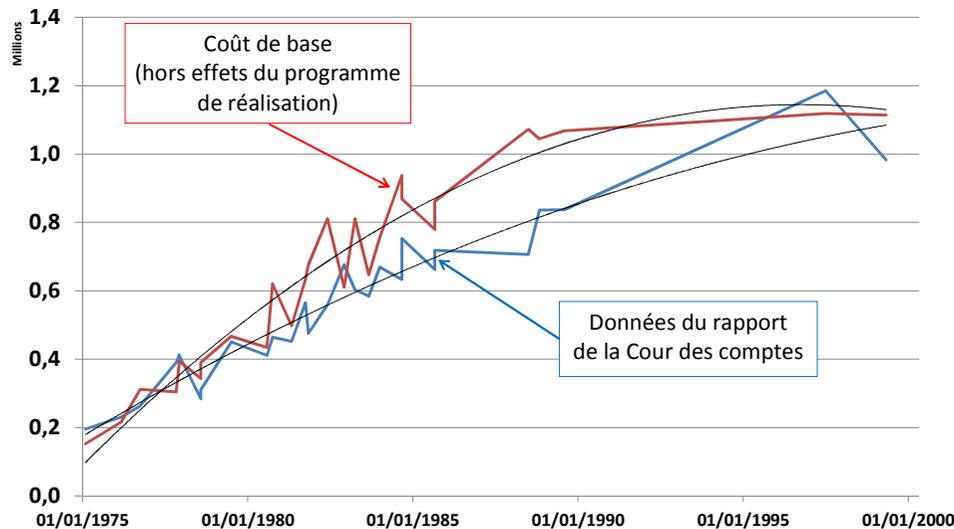
COÛT DE CONSTRUCTION DU PARC HISTORIQUE

Cumul des dépenses de construction ⇒



Total de
83 Md€₂₀₁₀
Hors intérêts
intercalaires

Coût direct de construction en Euros courants (M€/MW)



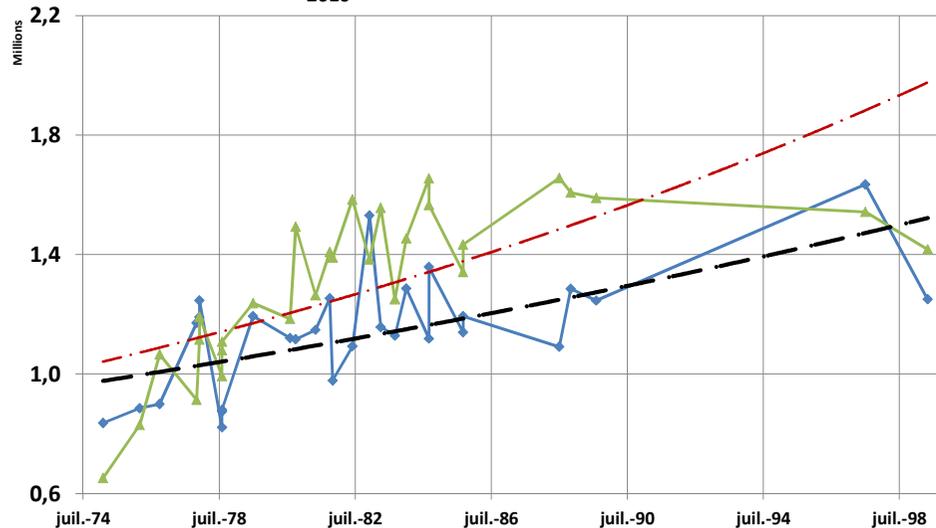
Coût de base
hors effets du
programme de
réalisation ⇒

- surcoût tête de série de 35%
- coûts dans le rapport des tailles à la puissance 0,6
- Gain de 2% par paire de réacteurs
- Duplication sur un même site, 13% pour la 1^{ière} paire et 30% pour la seconde.

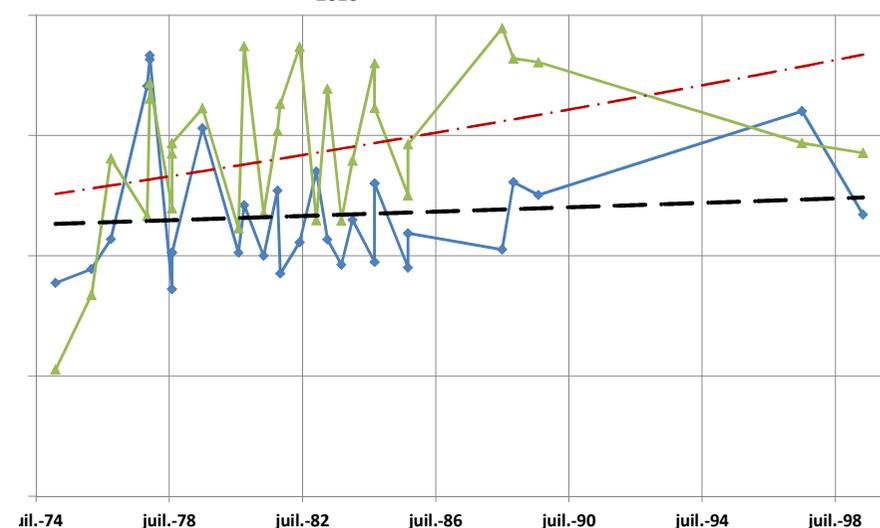
ÉVOLUTION DES COÛTS DE CONSTRUCTION

- Dans le contexte de l'organisation industrielle française,
 ⇒ L'évolution des coûts de construction a été maîtrisée.

Coût direct de construction en Euros constants
 (M€₂₀₁₀/MW) Indice des Prix du PIB

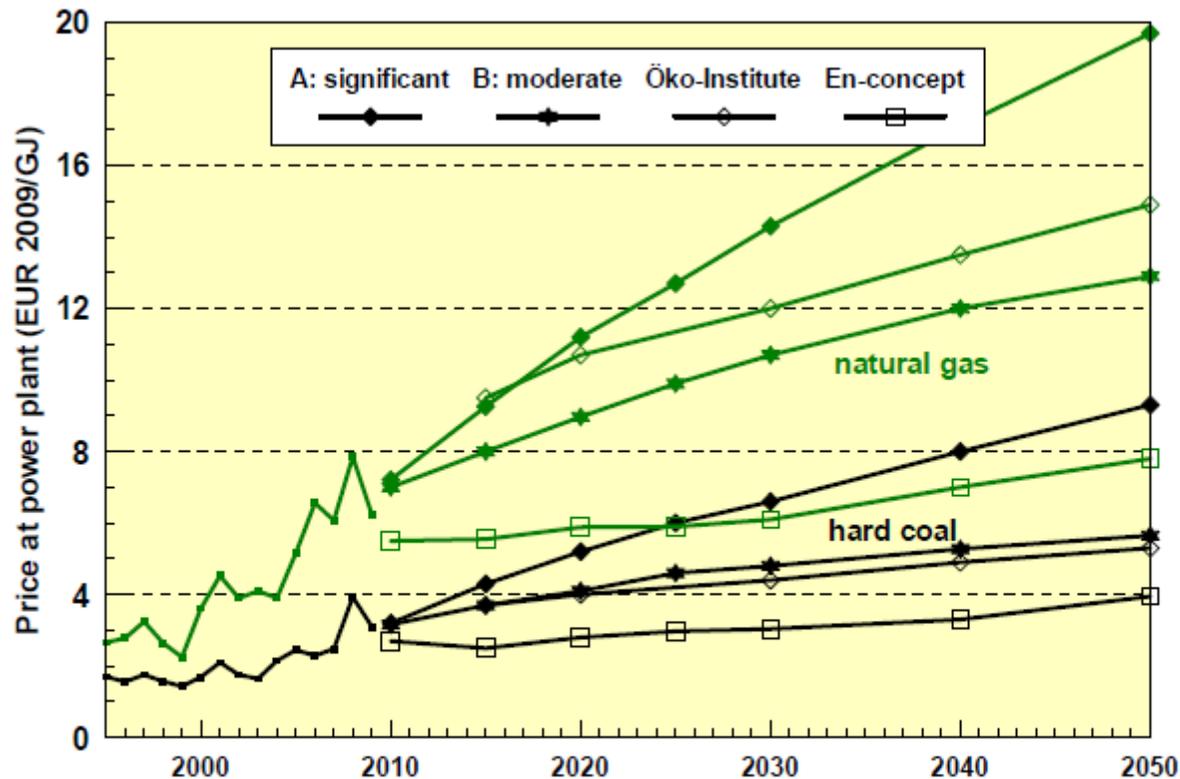


Coût direct de construction en Euros constants
 (M€₂₀₁₀/MW) Indice TP01



- ⇒ Il y a une dérive des coûts liée à l'accroissement de la complexité (réglementation, sûreté, qualité) mais elle est restée modérée, environ 2% par an.

LES PRIX DES COMBUSTIBLES FOSSILES VONT AUGMENTER FORTEMENT À LONG TERME



: Fuel prices free at power plant representing the price developments A and B of the Baseline Scenarios compared to assumptions of the Öko-Institut and the energy scenarios for the energy concept 2010 of the German government.

Prospective de prix réels par EWI & Prognos Hors prix CO2!