

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



L'énergie nucléaire du futur

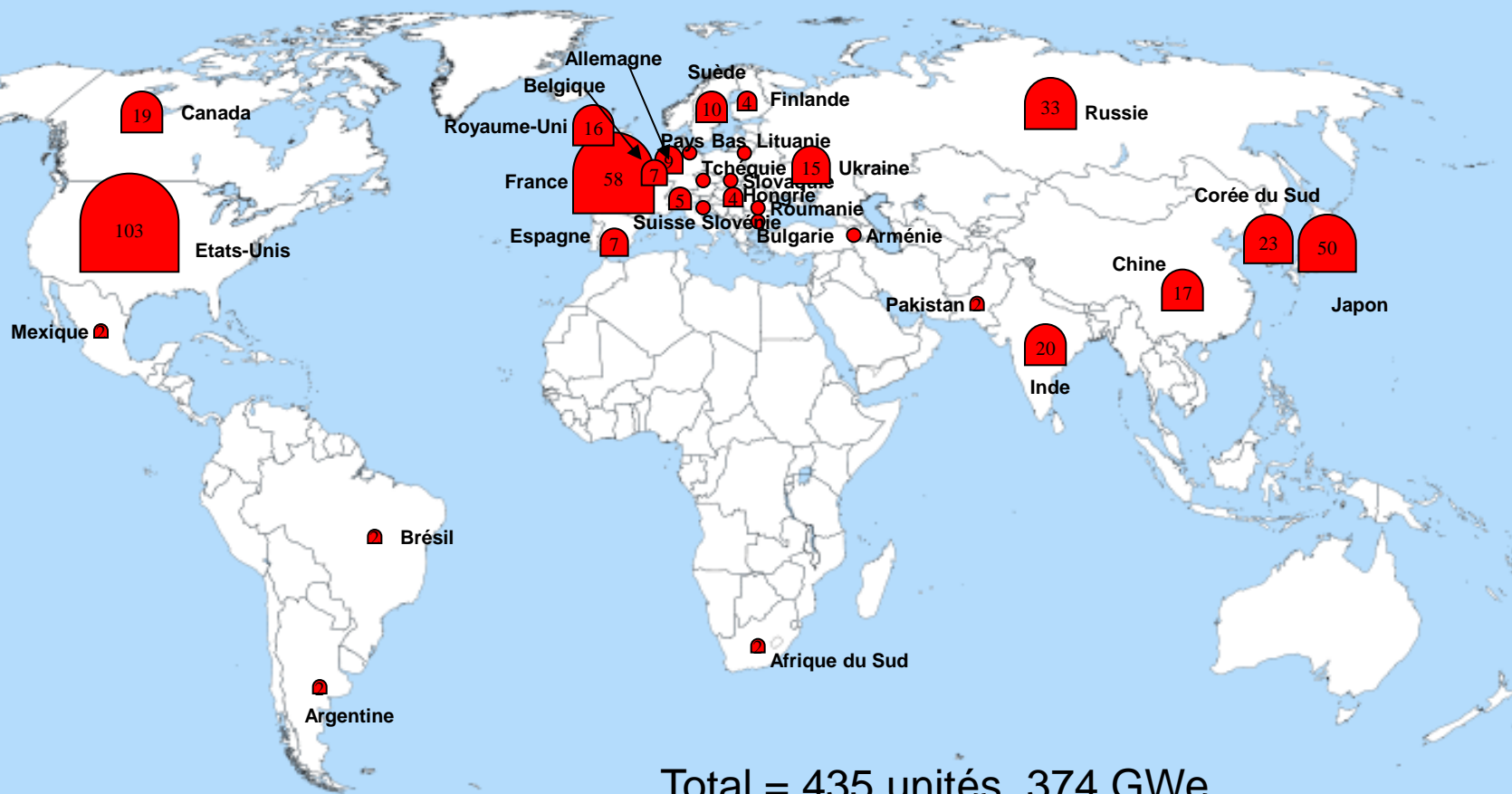
Henri Sifa

CEA/DEN/DS

1. Le nucléaire dans le monde
2. Les fondamentaux du nucléaire
3. La R&D au CEA
4. Les scénarios énergétiques de l'ANCRE
5. La cogénération nucléaire

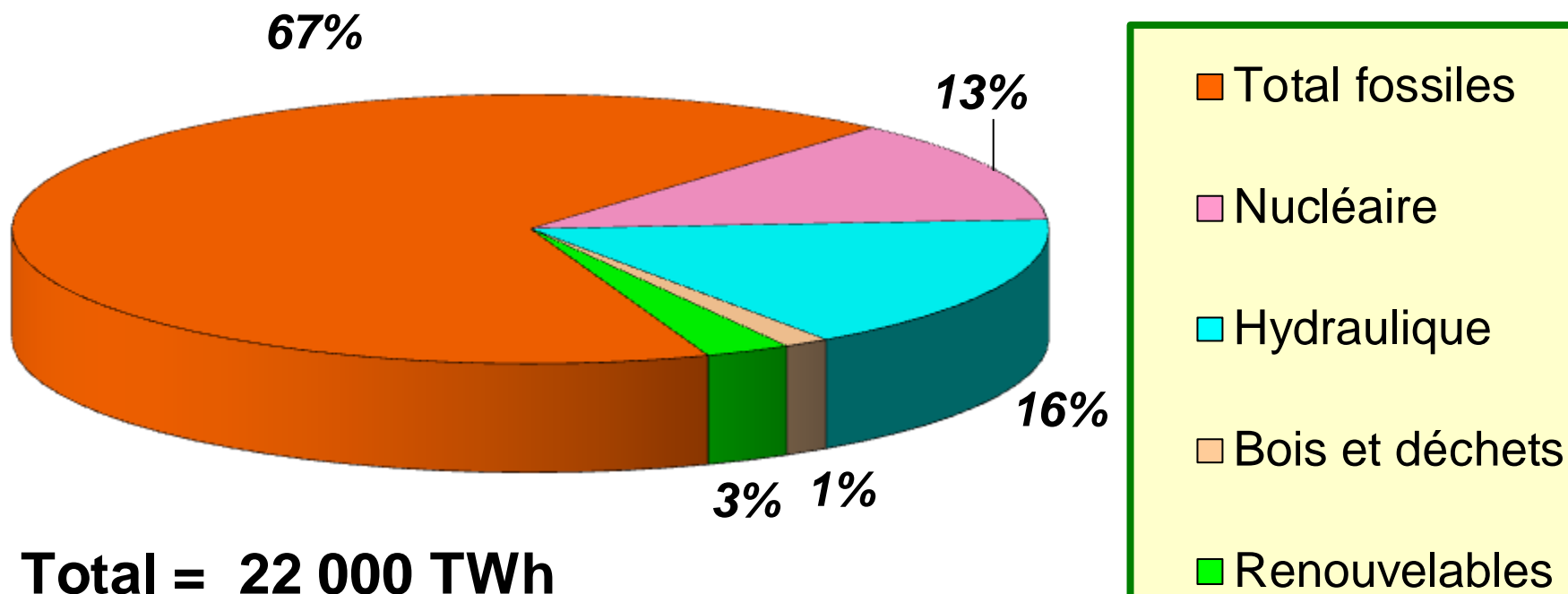
LE NUCLÉAIRE AUJOURD'HUI

Carte des réacteurs nucléaires dans le monde en 2013



Total = 435 unités, 374 GWe

Production d'énergie électrique dans le monde (2011)



Production annuelle d'électricité nucléaire = 2650 TWh

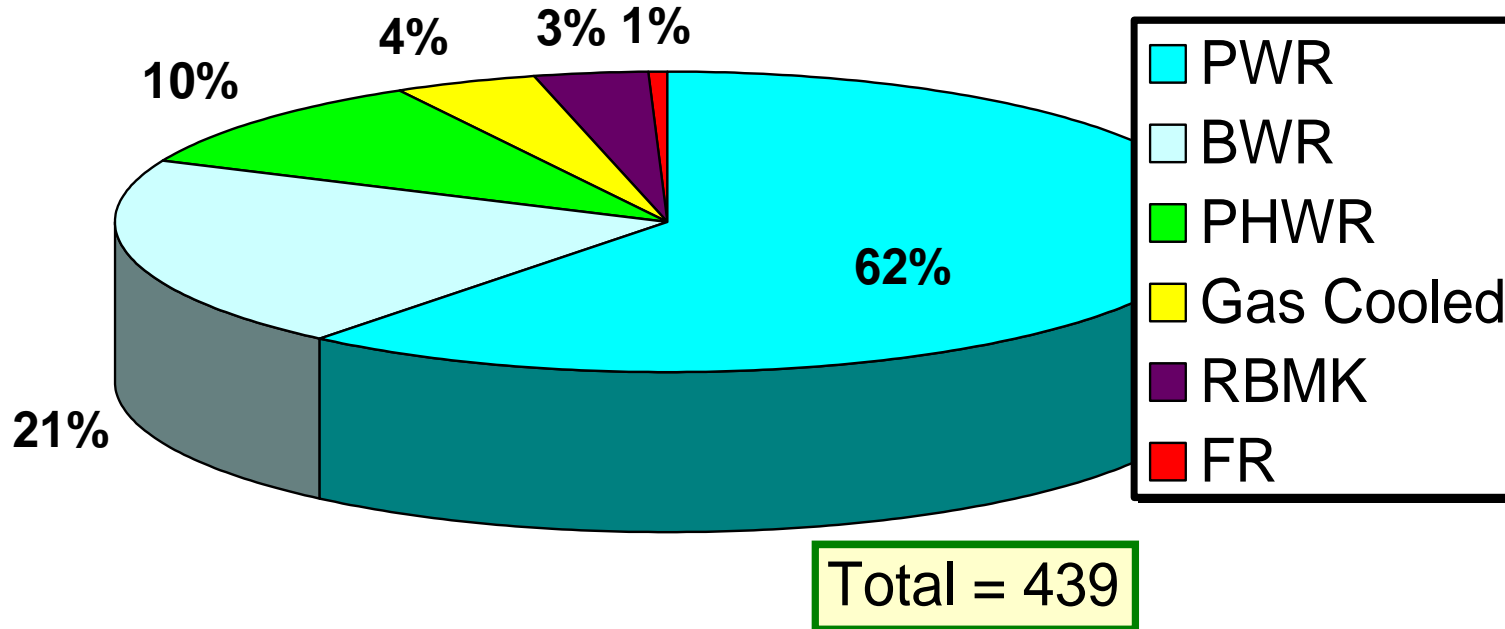
LE NUCLÉAIRE AUJOURD'HUI

Tiré de WNA, Juin 2010

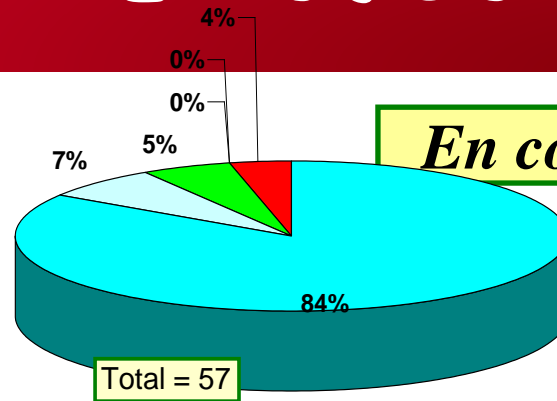
Reactor Type		Principaux pays concernés	Nombre d'unités	GWe	Combustible	Caloporteur	Modérateur
Réacteur à eau pressurisée	PWR	USA, France, Japon, Russie	266	243	UO ₂ enrichi	eau	eau
Réacteur à eau bouillante	BWR	USA, Japon, Allemagne, Suède	92	83	UO ₂ enrichi	eau	eau
Réacteur à eau lourde	PHWR	Canada, Inde, Corée, Argentine	45	23	UO ₂ naturel	eau lourde	eau lourde
Réacteur à graphite gaz	Gas Cooled	Royaume Uni	18	10	U naturel, UO ₂ enrichi	gaz carbonique	graphite
Réacteur graphite-eau	RBMK	Russie	15	10	UO ₂ enrichi	eau	graphite
Réacteurs rapides	FR	Japon, Russie	2	1	PuO ₂ et UO ₂ enrichis	sodium	-
Total			438	369.3			

LE NUCLÉAIRE AUJOURD'HUI

En fonctionnement



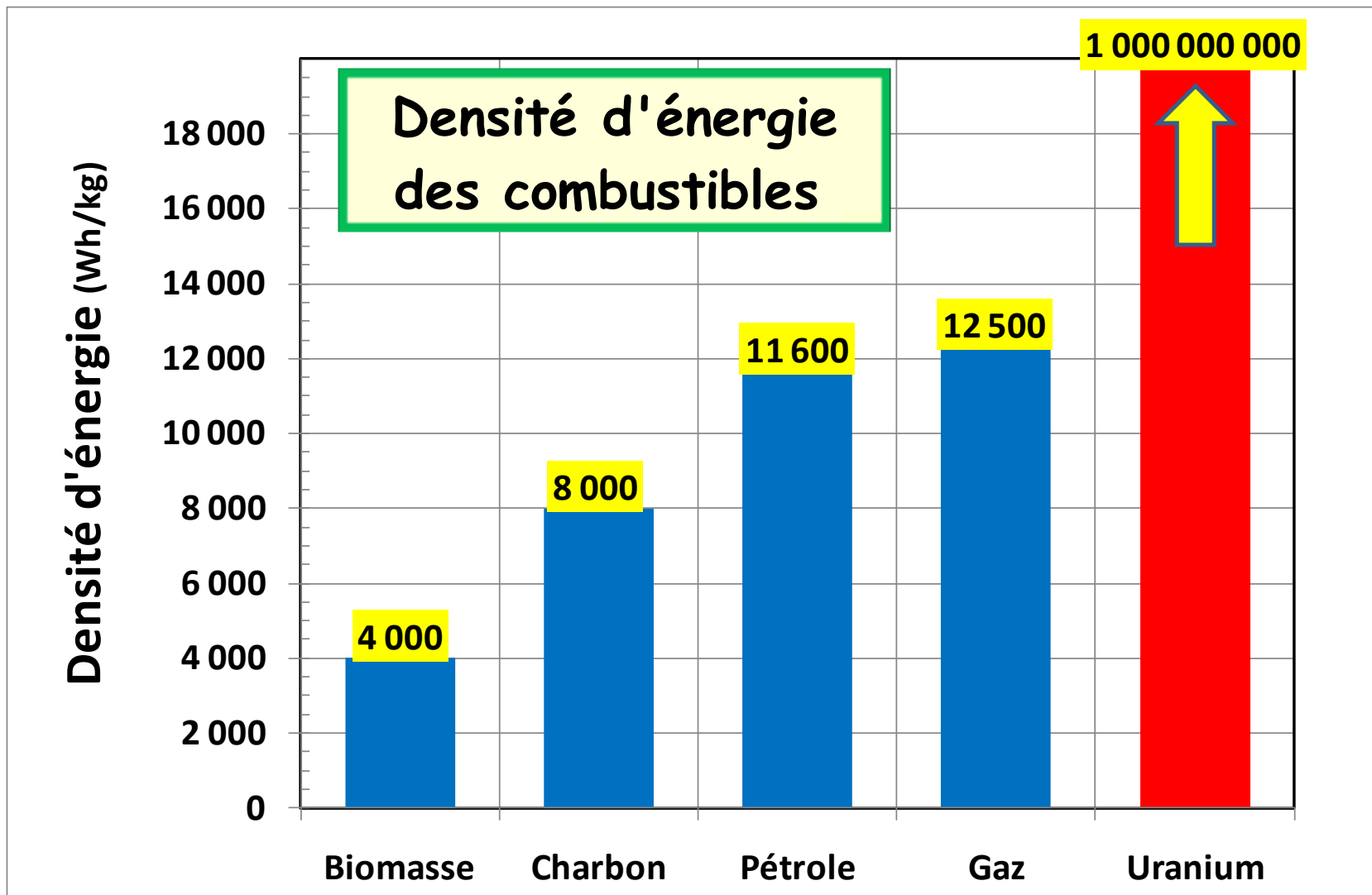
En construction



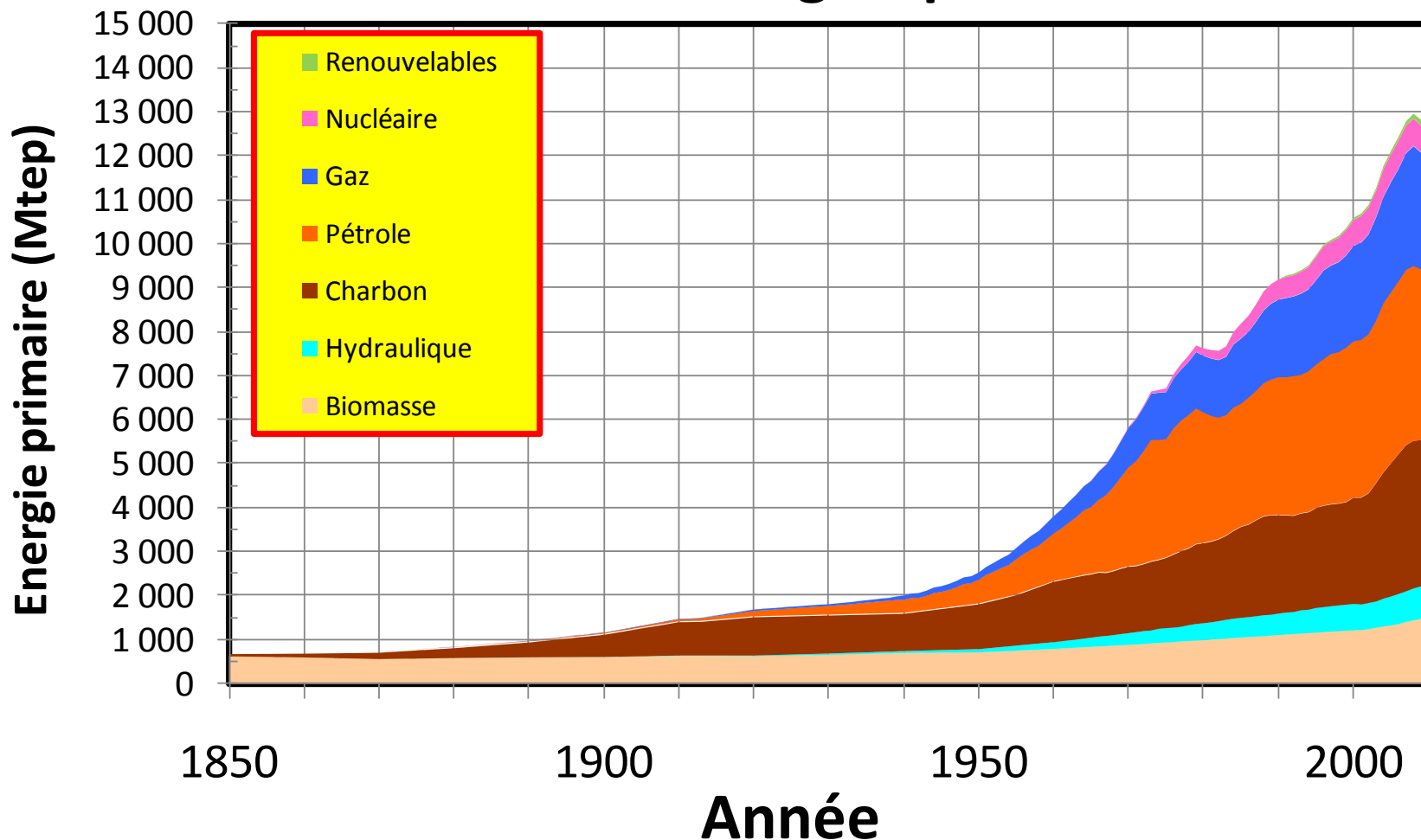
⇒ *Dominance des Réacteurs à Eau Pressurisée*

1. Le nucléaire dans le monde
2. Les fondamentaux du nucléaire
3. La R&D au CEA
4. Les scénarios énergétiques de l'ANCRE
5. La cogénération nucléaire

CONTENU ÉNERGÉTIQUE

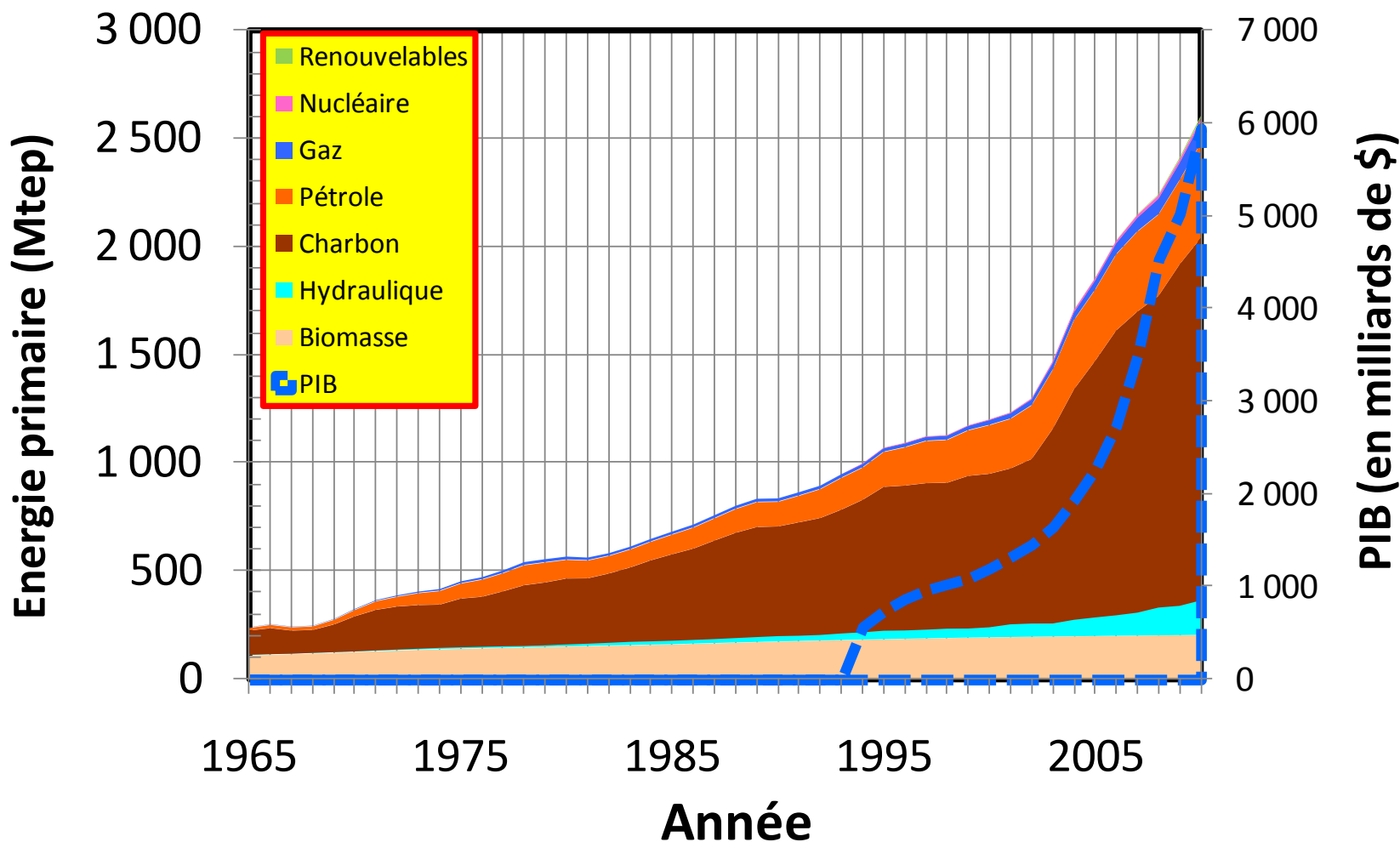


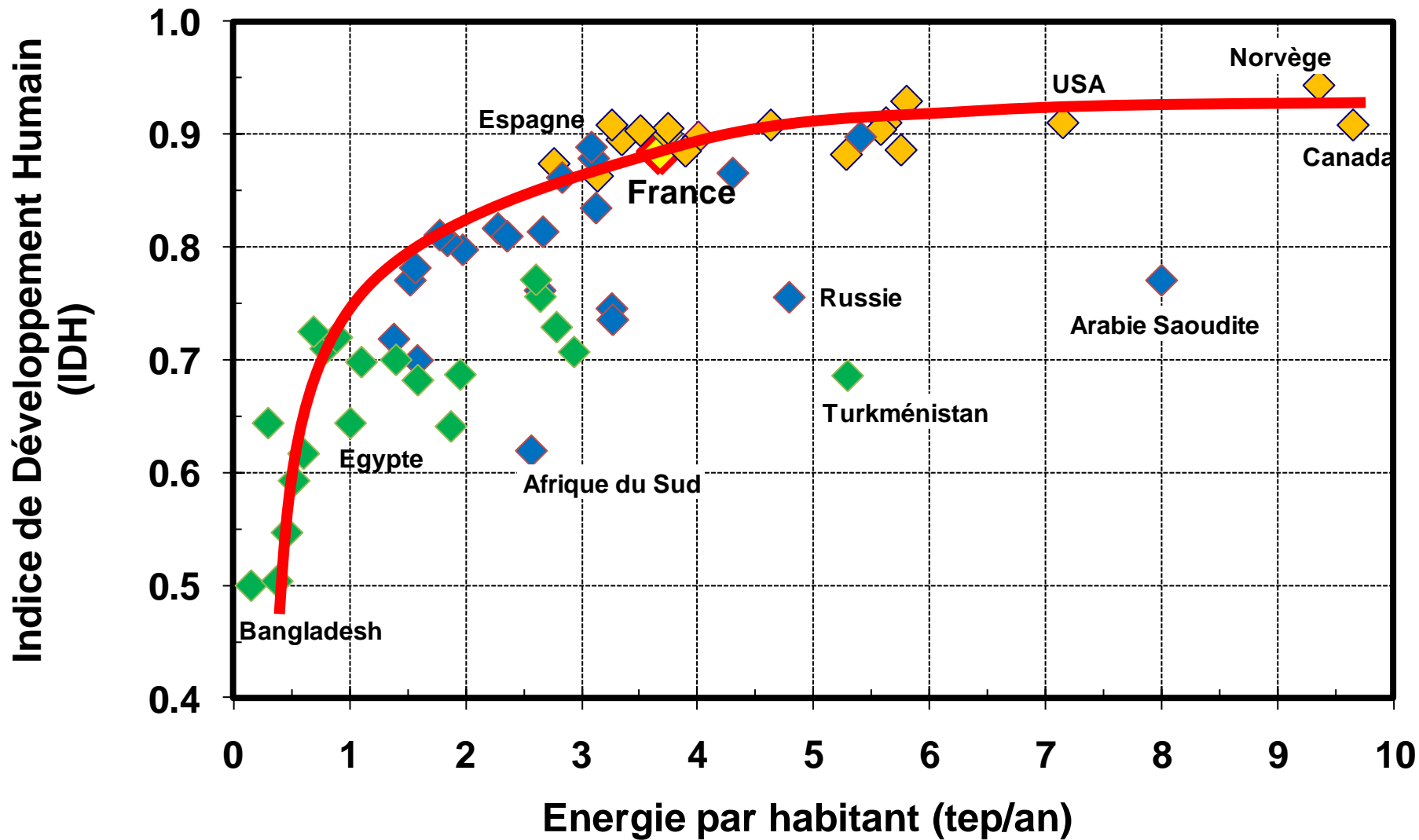
Consommation énergétique dans le monde



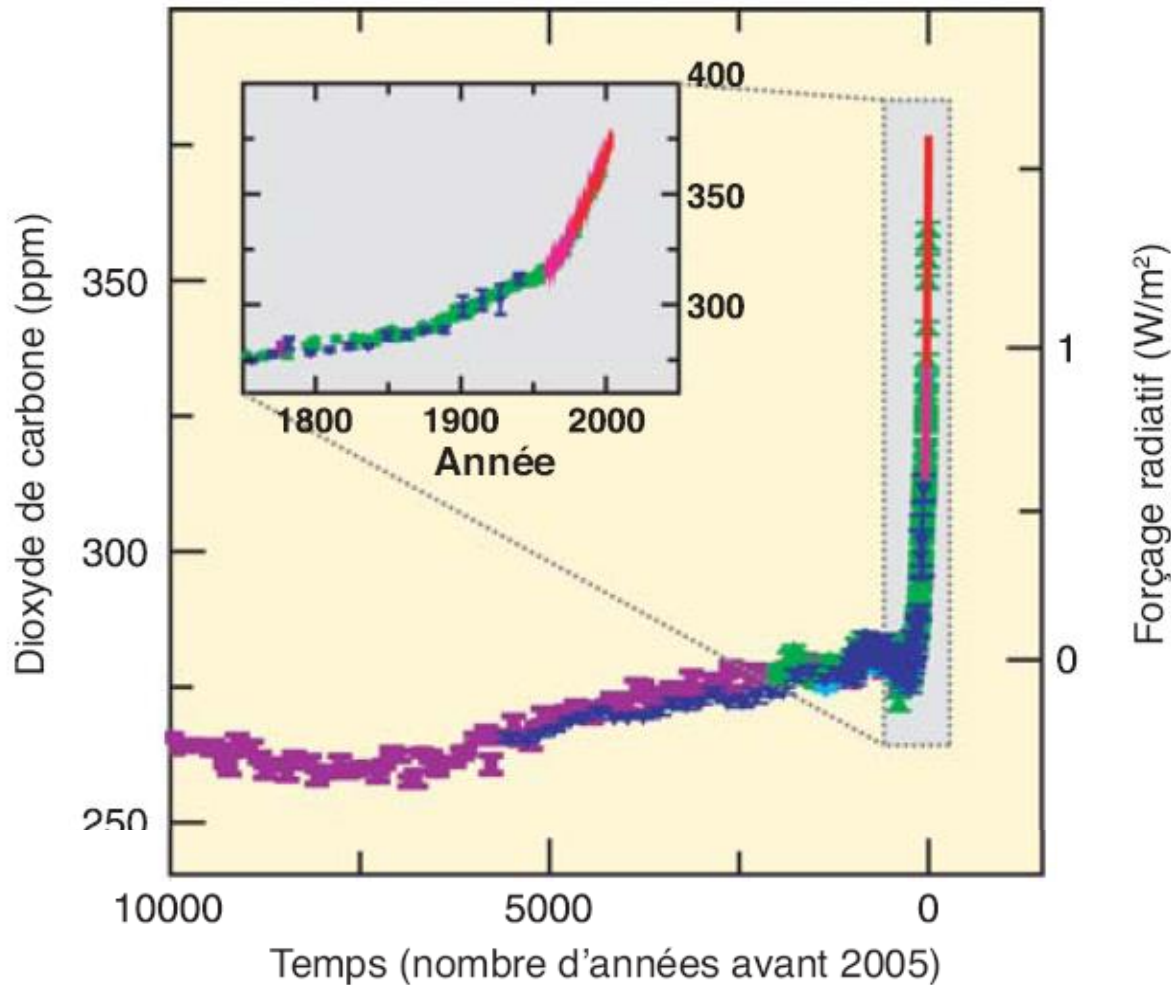
EXEMPLE DE LA CHINE

Consommation d'énergie en Chine



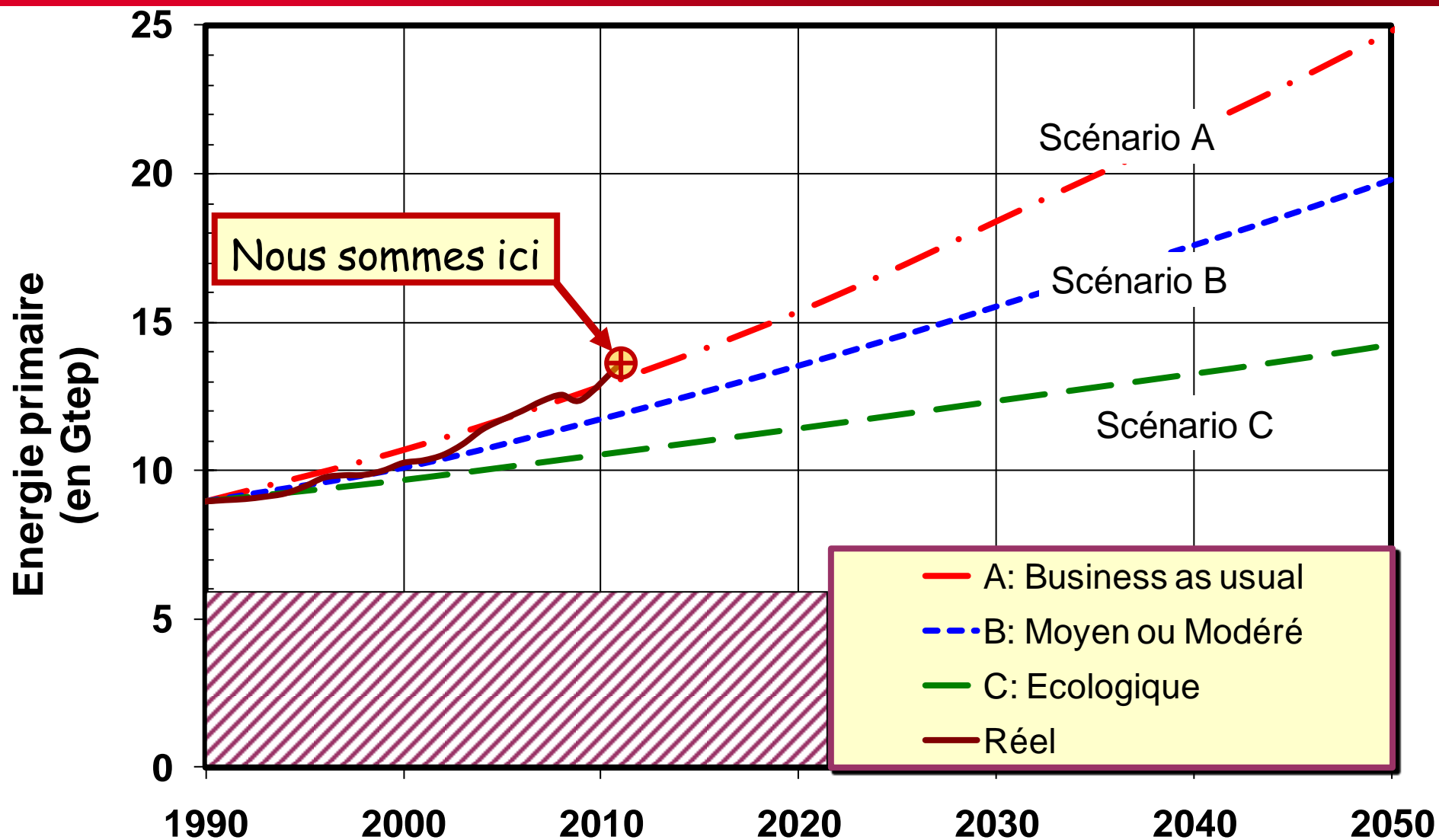


Évolution des gaz à effet de serre à partir des données des carottes de glace et de mesures récentes

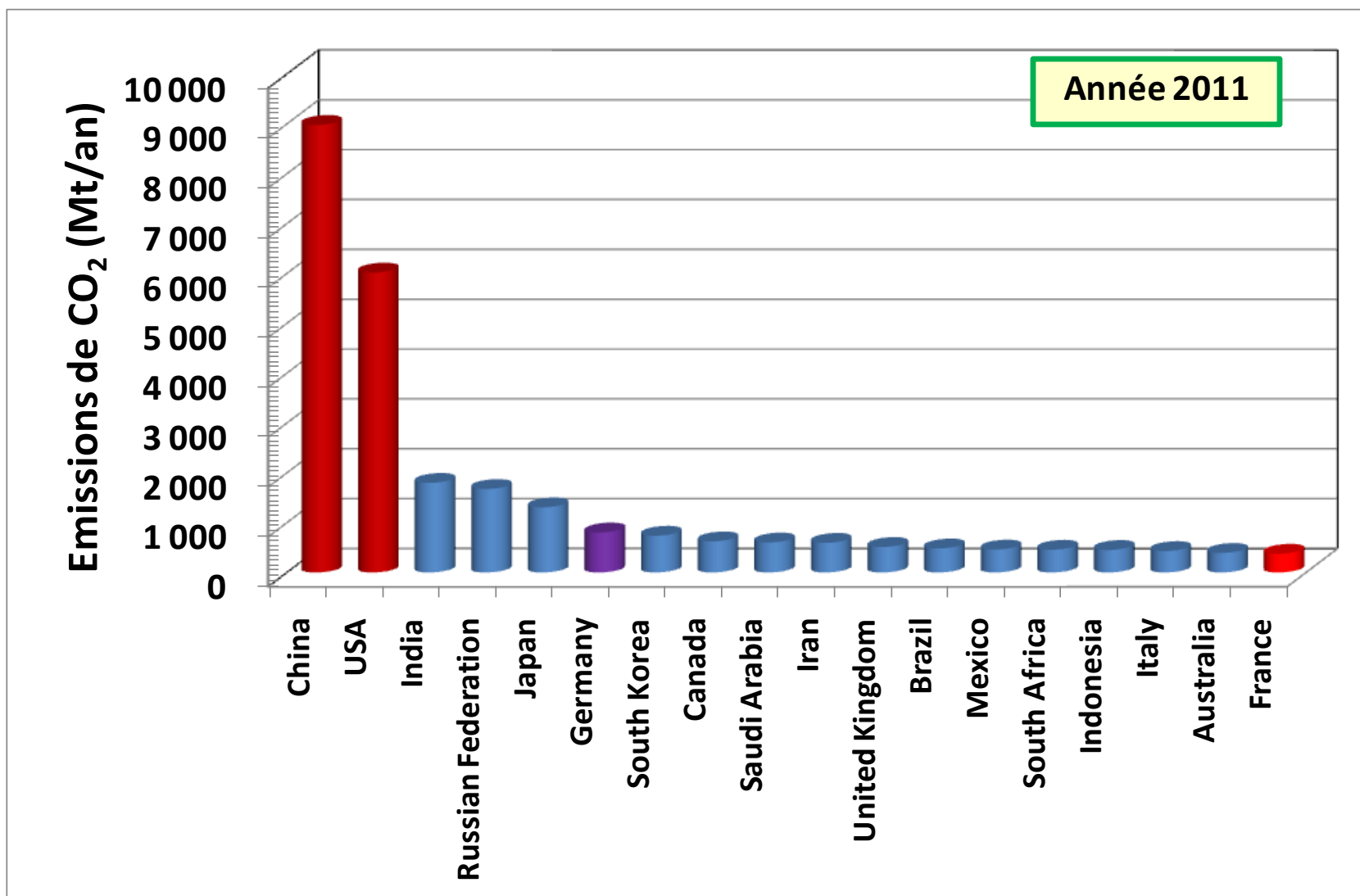


Source: 4ème rapport du
Groupe intergouvernemental
sur l'évolution du climat,
GIEC 2007 : « Bilan 2007 des
changements climatiques »,
2010 Edition

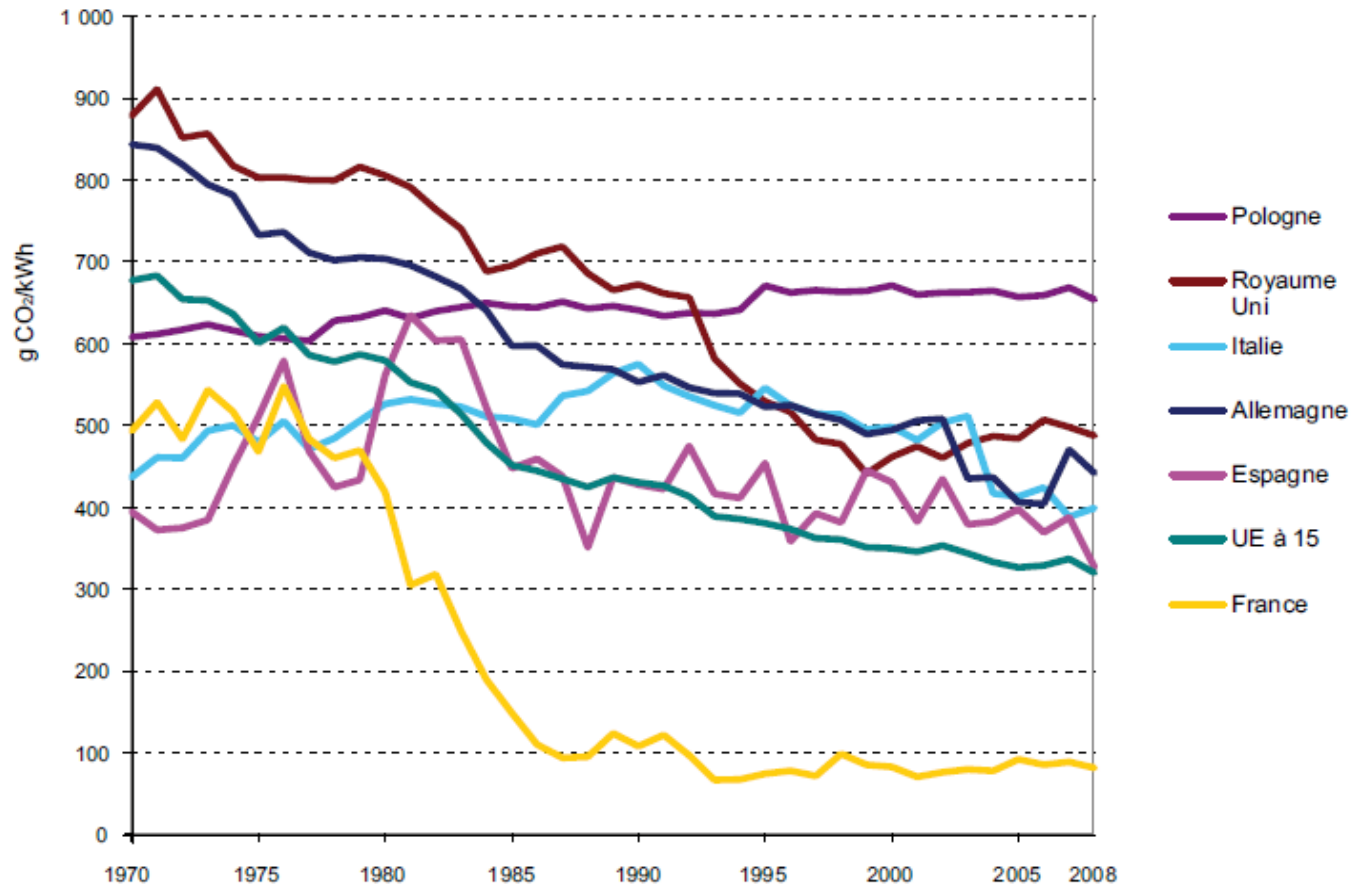
ENERGIE ET CLIMAT



EMISSIONS DE CO₂ DUES A L'ÉNERGIE



EMISSIONS DE CO₂ DUES A LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

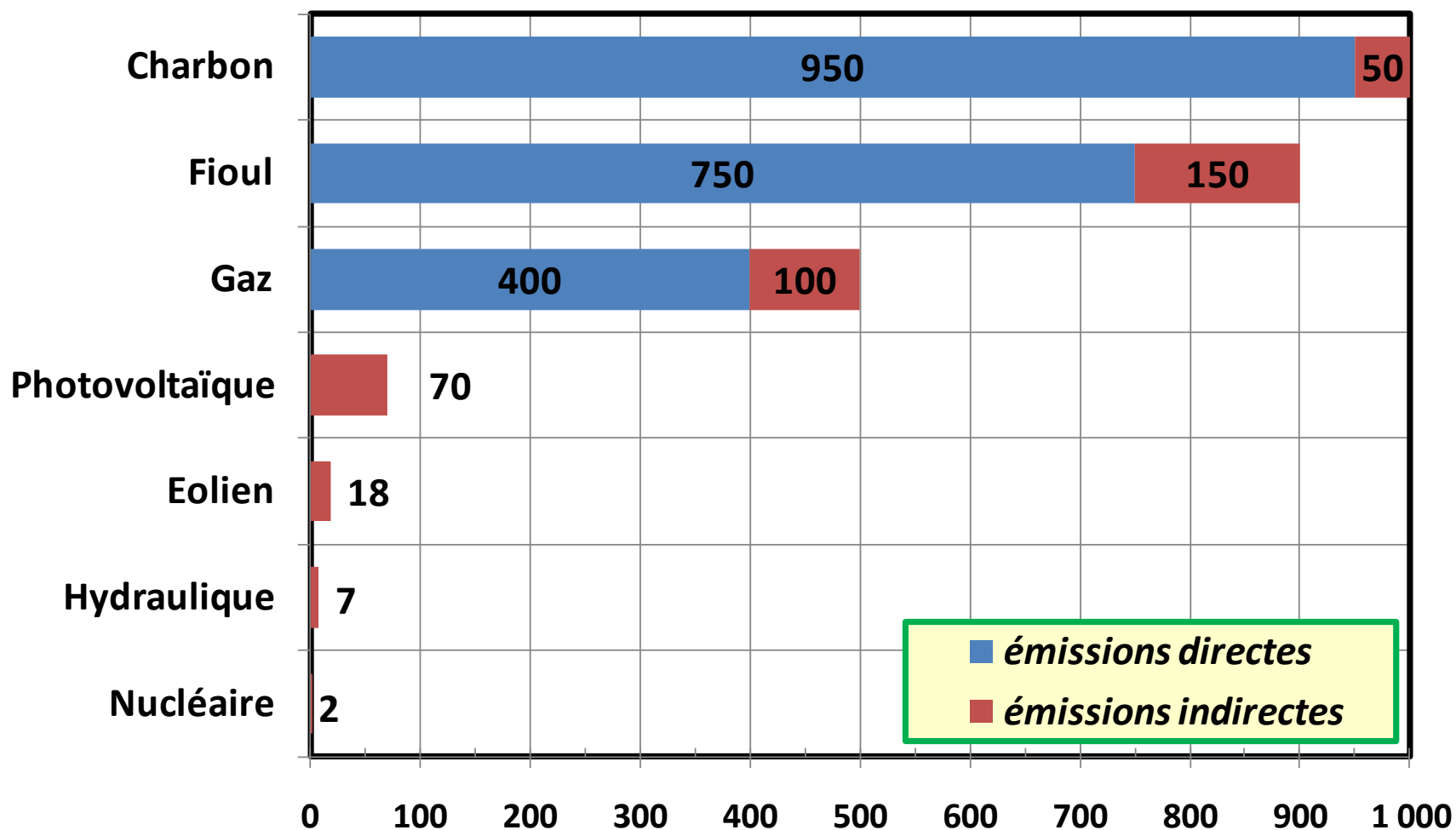


Source : Agence internationale de l'énergie, octobre 2010.

➡ La France rejette **4 fois moins** de CO₂ que la moyenne de l'UE

EMISSIONS DE CO₂ PAR SOURCE

Production d'électricité: émissions de CO₂ (en g/kWhe)



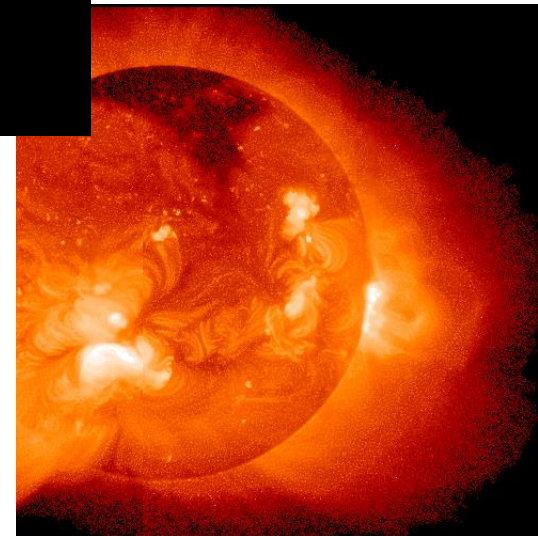
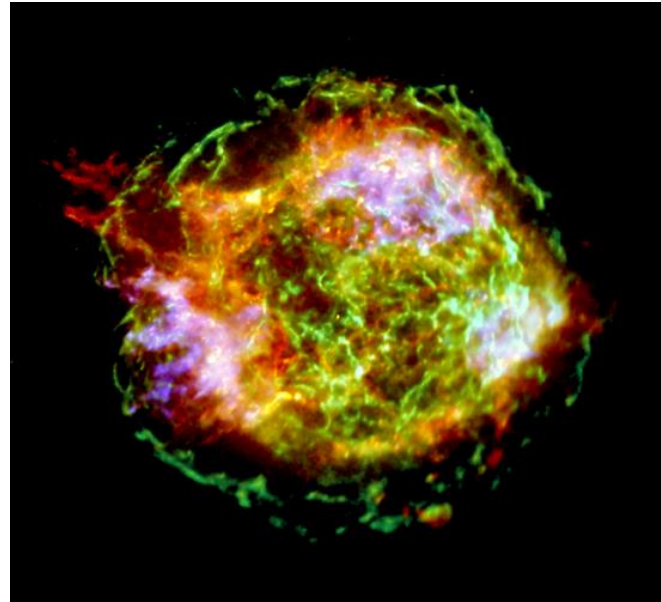
Les fossiles

- Le pétrole
- Le gaz
- Le charbon

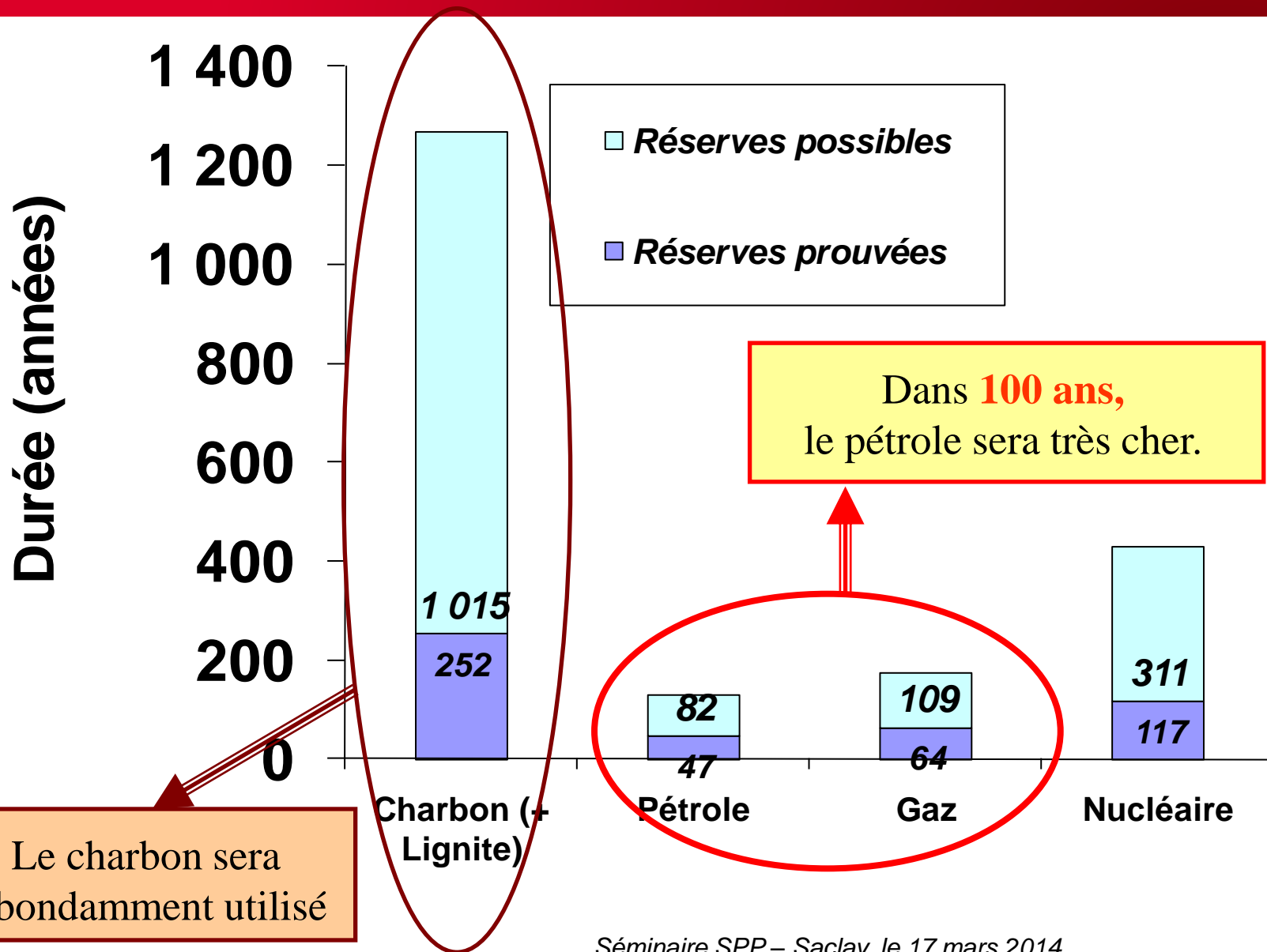
➤ Le nucléaire

Les renouvelables

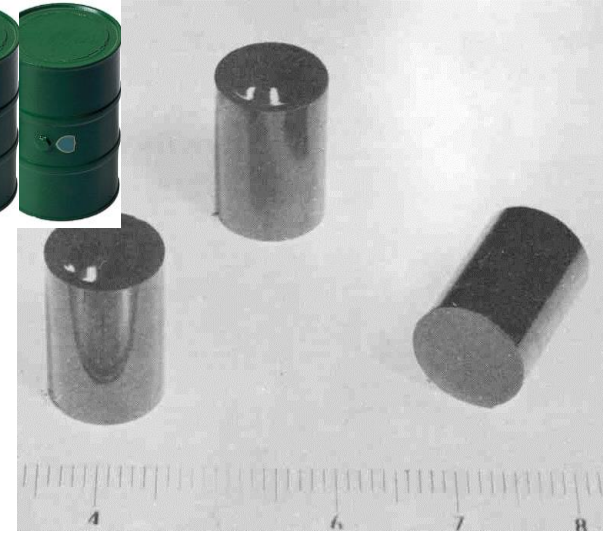
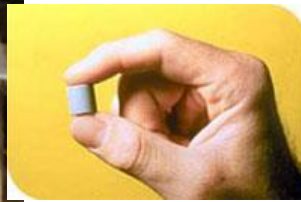
- L'hydraulique
- L'éolien
- Le solaire (thermique et photovoltaïque)
- La biomasse
- La géothermie



RESSOURCES MONDIALES



LA RESSOURCE URANIUM



Le facteur **100000** entraîne:

- De faibles besoins en ressources (matières premières)
- Une indépendance énergétique
- Un coût réduit
- De faibles quantités de déchets produits
- Un impact environnemental faible

1. Le nucléaire dans le monde
2. Les fondamentaux du nucléaire
3. La R&D au CEA
4. Les scénarios énergétiques de l'ANCRE
5. La cogénération nucléaire

LES PROGRAMMES DE R&D

- Soutien au **nucléaire industriel** :
sûreté, compétitivité, évolution...

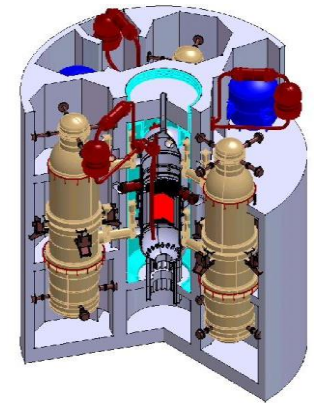
- **Gestion des déchets (loi de 2006)**

- Préparer le **nucléaire du futur**: Gen IV, ASTRID, ...



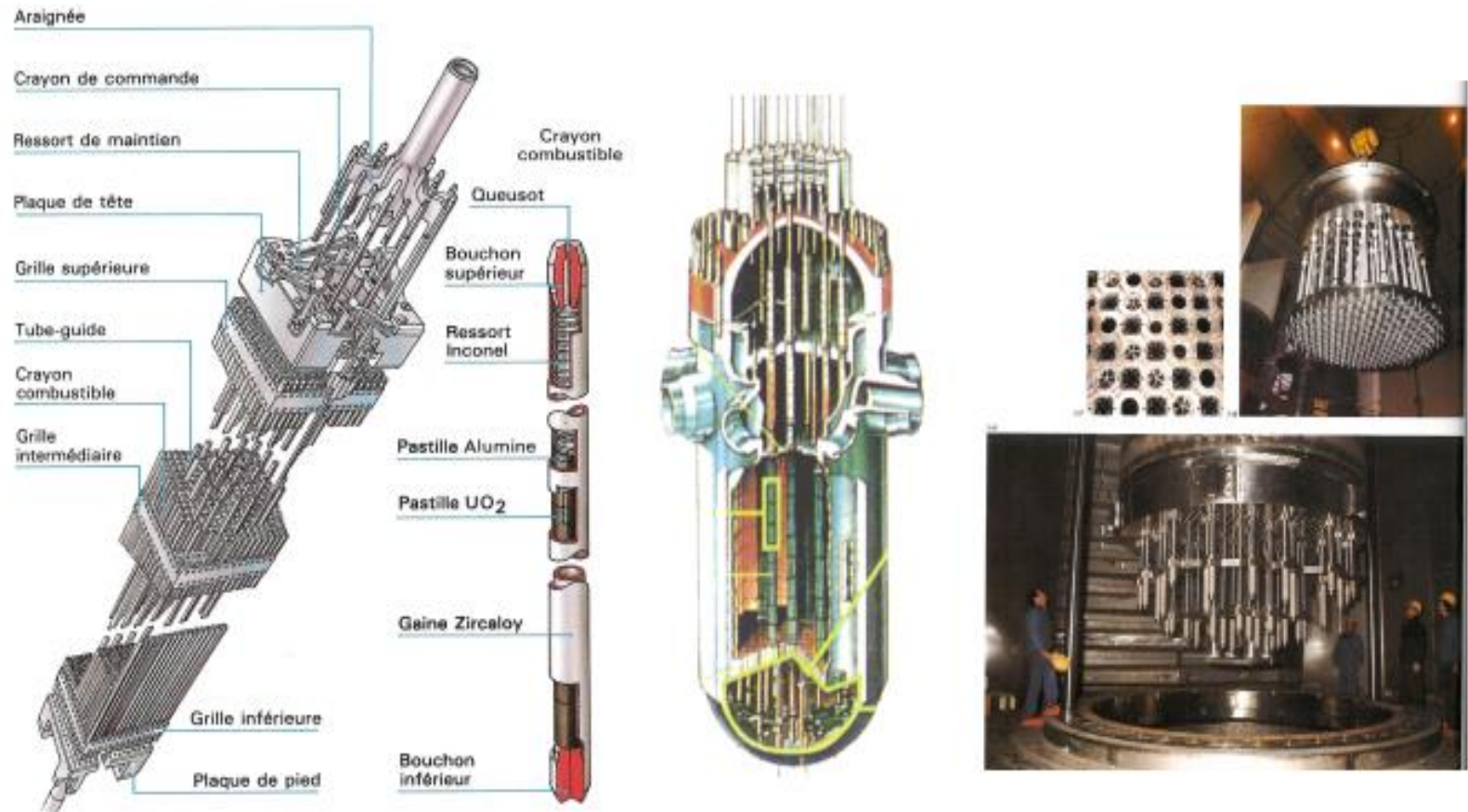
En support à ces objectifs:

- Concevoir, construire et maintenir les grands **outils expérimentaux** et les outils de **simulation**
- Gérer les services nucléaires indispensables: opération, démantèlement, gestion des déchets, ...



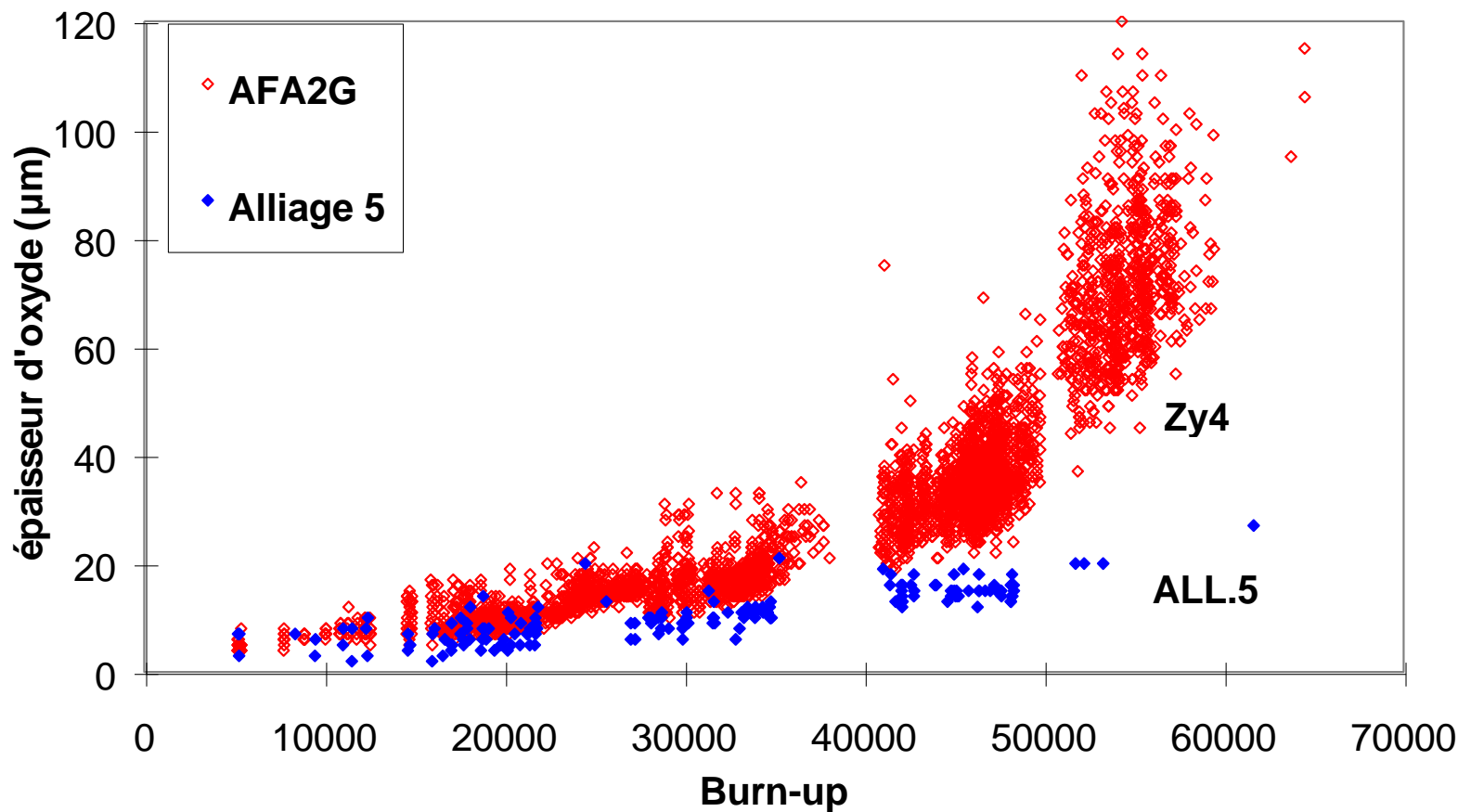
- Allongement de la durée de vie

- Amélioration des performances des combustibles



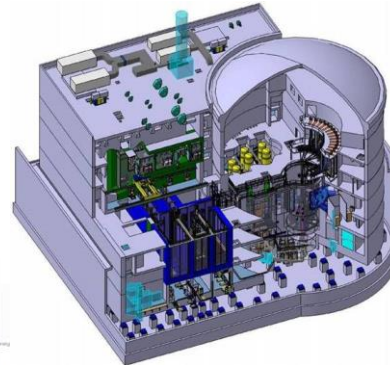
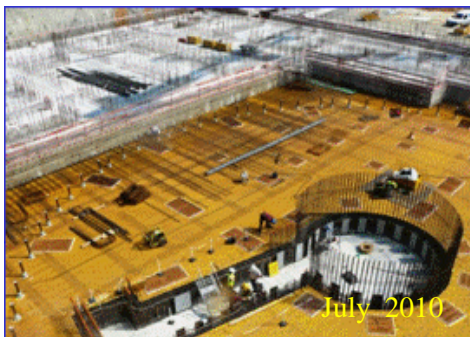
AMÉLIORER LES PERFORMANCES DU COMBUSTIBLE DES RÉACTEURS

REX FRAMATOME

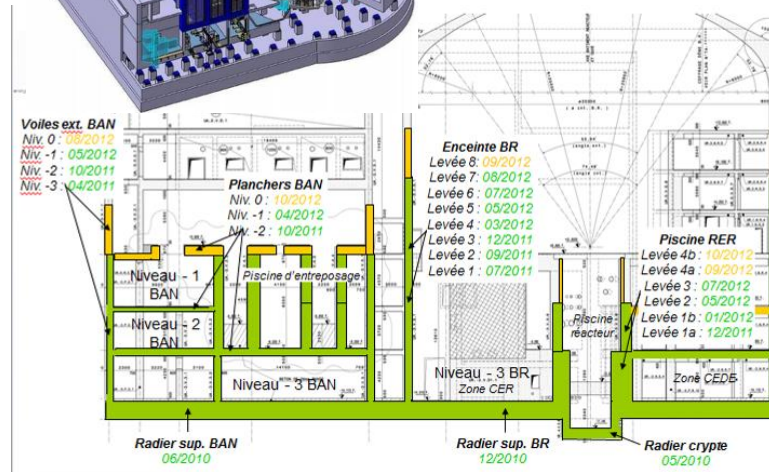


LE REACTEUR JULES HOROWITZ

Un réacteur expérimental en construction à Cadarache



JHR 100 MWth



Consortium Partnership and Associated Partners

EDF	20%
AREVA	10%
NRI (Czech Rep)	2 %
CIEMAT (Spain)	2 %
SCK (Belgium)	2 %
VTT (Finland)	2 %
JAEA (Japan)	3 %
DAE (India)	3 %
Vattenfall (Sweden)	2 %
IAEC (Israël)	2%
Euratom	6 %

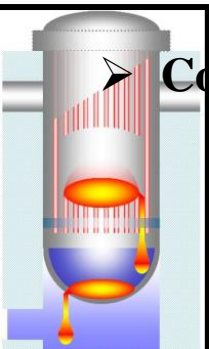
POST-FUKUSHIMA AU CEA

1 – Les ECS (évaluations complémentaires de sûreté)

- L'ASN demande d'évaluer toutes les INB
 - Réévaluation des risques d'inondation et sismiques
 - Identification des effets falaise et évaluation des marges
 - Mitigation en cas de perte simultanée de la source froide et de l'électricité
- Premier rapport (Osiris, Phénix, RJH, Masurca & ATPu) remis en sept. 2011
- Deuxième rapport (10 INB) remis en sept. 2012

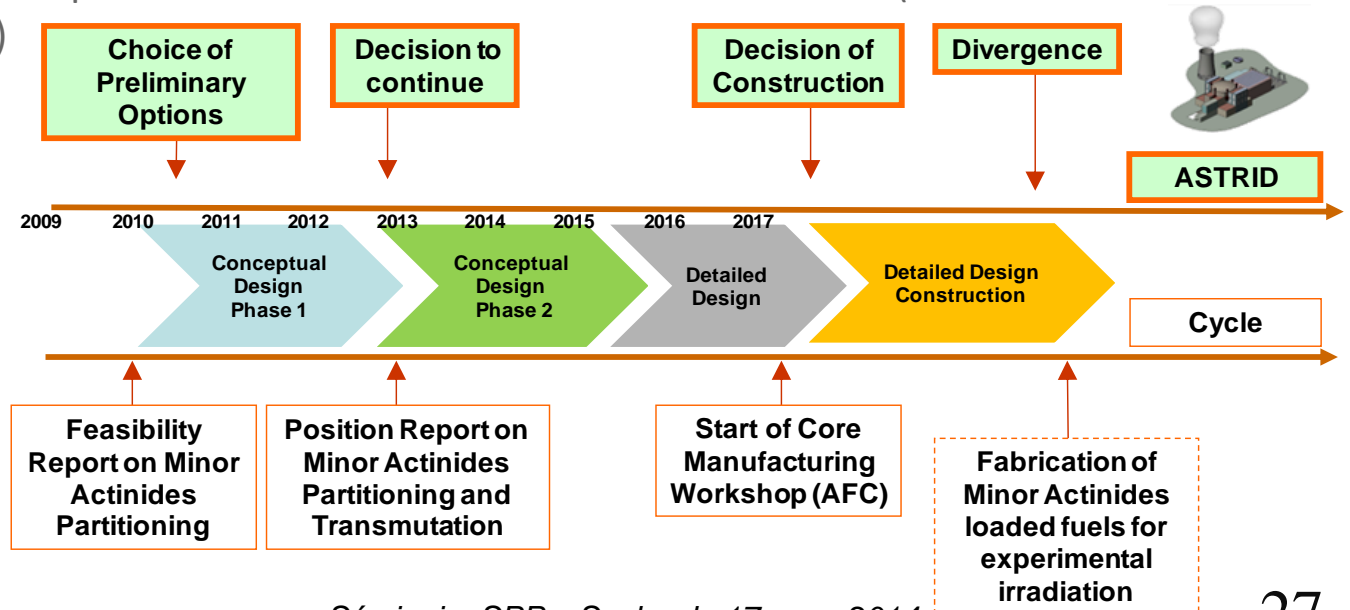
2 – R&D accrue sur des sujets (déjà connus)

- **Sismique** Evaluation des marges (projet EXTAM)
- **Hydrogène**
 - Quantité générée lors d'un accident grave
 - Mélanges (air/H₂/H₂O) et diffusion
 - Efficacité des recombineurs catalytiques
- **Relâchements et dispersion des PF**
 - Effet de la température
 - Terme source: validation et incertitudes
 - International Source Term Program
- **Comportement du corium**
 - Dégradation en cuve
 - Interaction corium-béton
 - Interaction corium-eau



Le projet ASTRID

- Une puissance électrique de 600 MWe
 - Démonstration à l'échelle industrielle y compris pilotage, performances et sûreté
 - Un outil flexible pour des tests en vraie grandeur (irradiations expérimentales, composants, ...)
- Démonstration de la transmutation des actinides mineurs
- Un planning serré pour
 - Restaurer un outil expérimental en neutrons rapides
 - Réinstaller des compétences et des technologies en réacteurs rapides
 - Reconstruire un tissu industriel sous-jacent
 - Se préparer à un déploiement industriel à l'horizon 2040 en France (2030 dans certains autres pays du monde)



LE DÉVELOPPEMENT DES RNR-NA DANS LE MONDE

18 RNR Na expérimental ou prototype réalisés
~ 400 Réacteur.ans cumulés de REX opérationnel en 2010

USA

- EBR-I 1951 → 1963
- EBR-II (20 MWe) 1963 → 1994
- Fermi (100 MWe) 1963 → 1972
- FFTF (400 MWth) 1980 → 1993
- Clinch River Project abandon en 1983

Europe

 - Rapsodie (20 MWth) 1967 → 1983

- DFR (60 MWth) 1959 → 1977

- KNK-II (17 MWe) 1978 → 1991

 - Phénix (250 MWe) 1973 → 2009

- PFR (250 MWe) 1975 → 1994

- SNR300 (300 MWe) pas démarré

 - Superphenix (1200 MWe) 1986 → 1998

- EFR Project abandon en 1998

 - ASTRID (600 Mwe)

Japon - Joyo (140 MWth) 1977 →

- Monju (280 MWe) 1992 →

- JSFR (1500 Mwe)

Russie & Kazakhstan

- BR10 (10MWth) 1959 → 2002

- BN-350 (150 MWe) 1973 → 1999

- BOR-60 (60 MWth) 1968 →

- BN-600 (600 MWe) 1980 →

- BN-800 (800 MWe) 2012

- BN-1200 (1200 Mwe)

Inde - FBTR (40 MWth) 1985 →

- PFBR (500 MWe) 2012

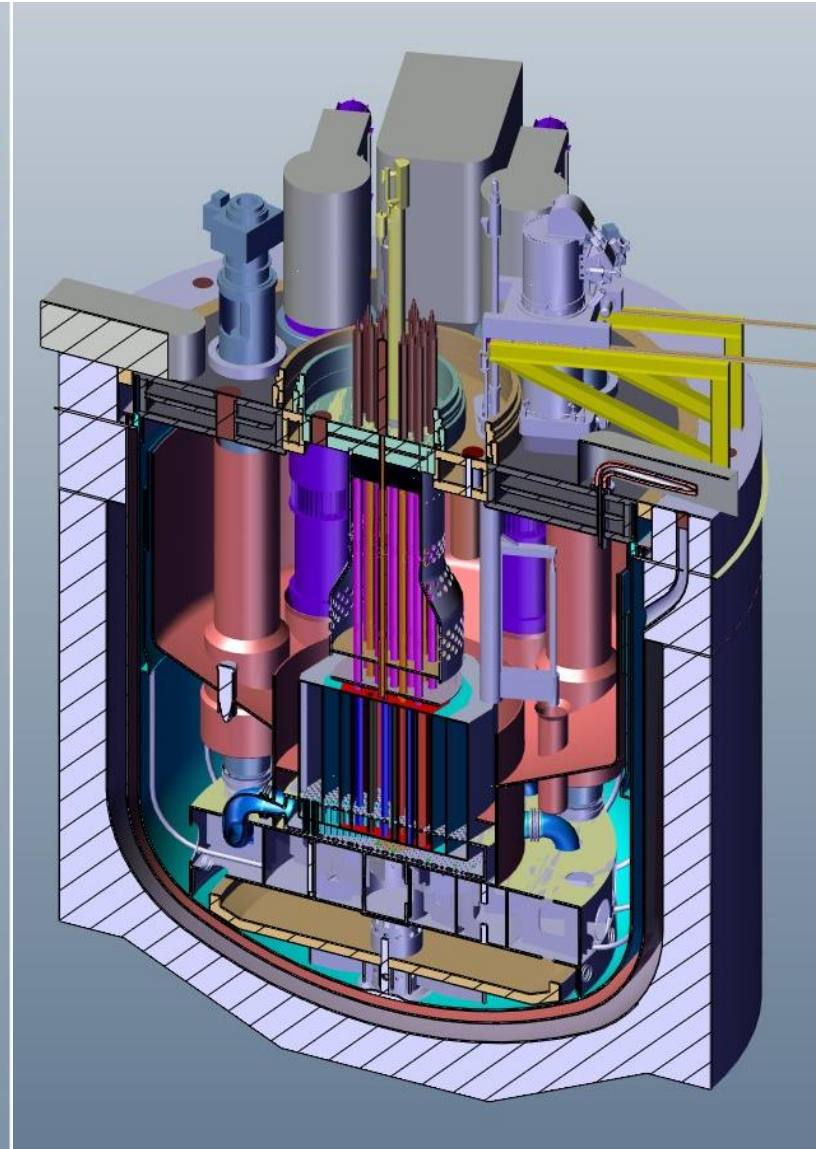
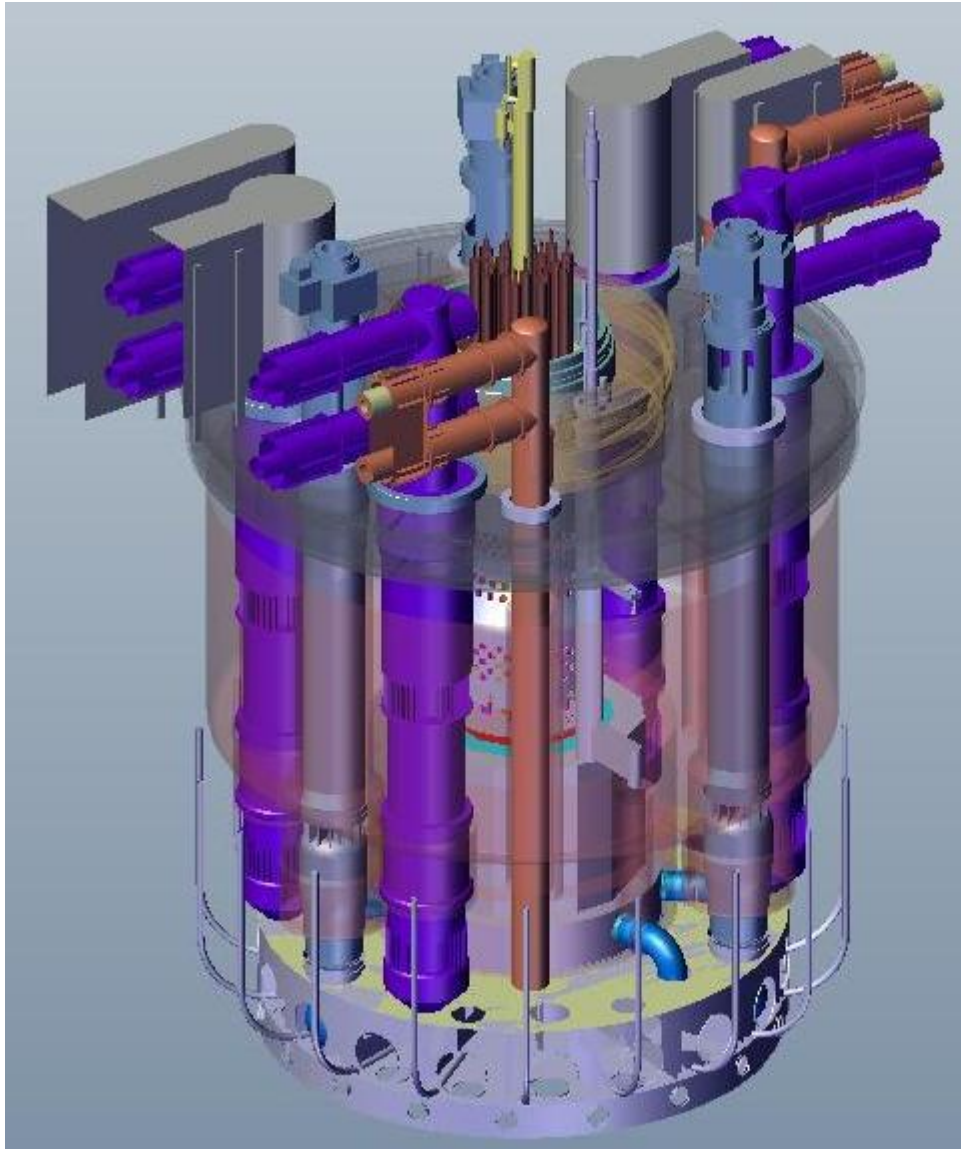
- 4 CFBR (500 Mwe)

Chine - CEFR (25 Mwe) 2010 →

- BN-800 (800 MWe) 2015

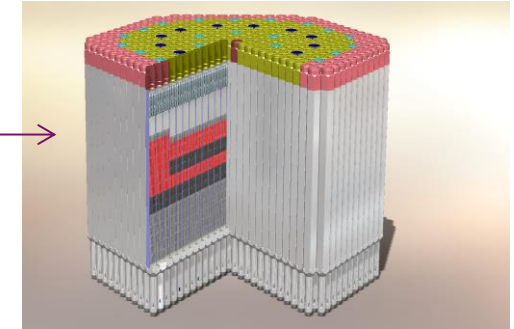
Corée - KALIMER (150 Mwe)

IMAGE DU RÉACTEUR ASTRID

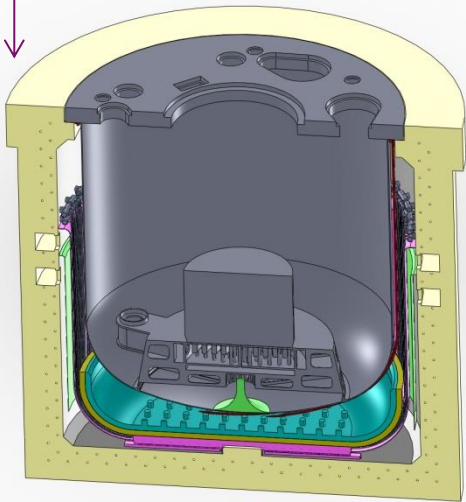


Sûreté

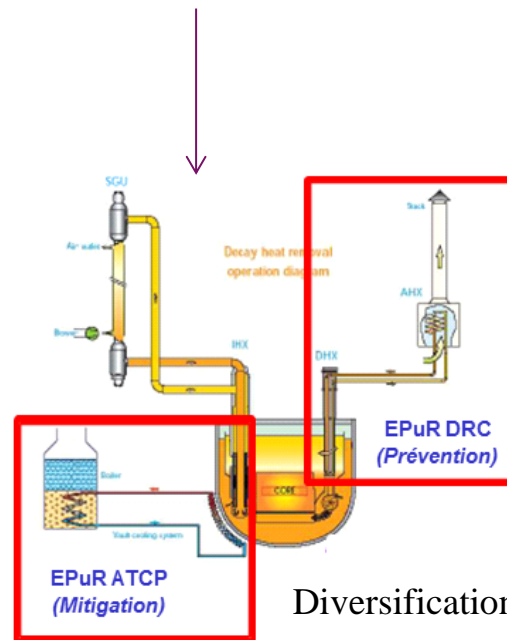
- Un coefficient de vidange négatif
- Un système de sûreté passif: SEPIA
- Un récupérateur de corium
- Des évacuations de la puissance résiduelle



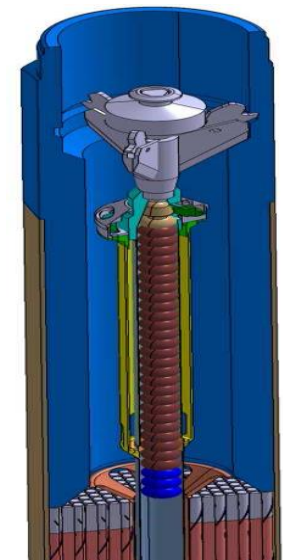
Nouveau concept de coeur hétérogène



Une option possible de récupérateur de corium



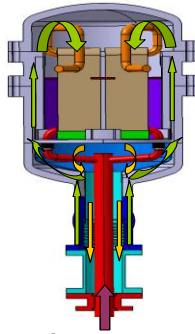
Diversification des EPR



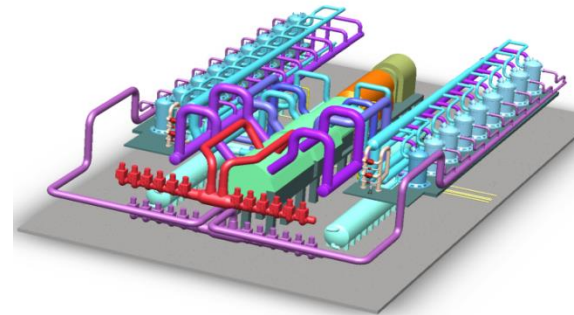
Le système SEPIA

Elimination de la réaction sodium-eau dans les GV

- Nouveaux échangeurs de chaleur, nouveau système de conversion d'énergie



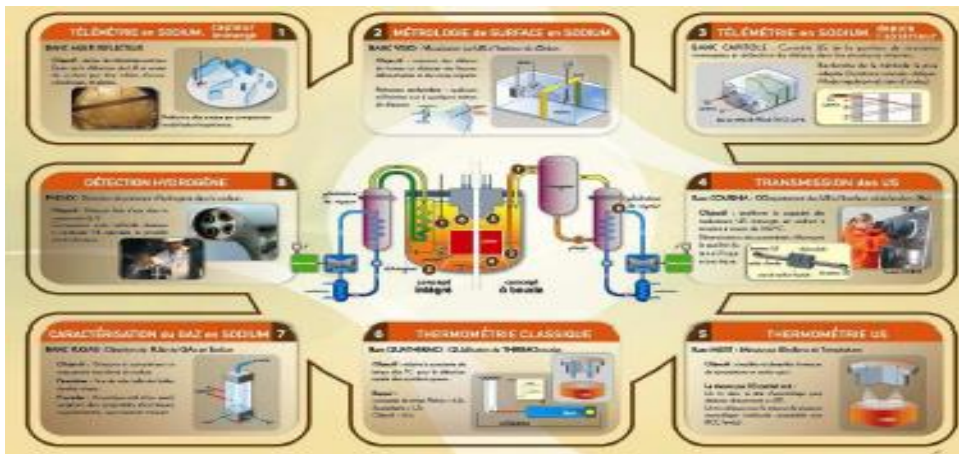
Echangeur sodium-gaz



Système de conversion à gaz

Instrumentation and in-Service Inspection & Repair (ISIR)

- Nouvelles technologies



Techniques de mesures :

- Lasers
- Ultrasons
- Fibres optiques

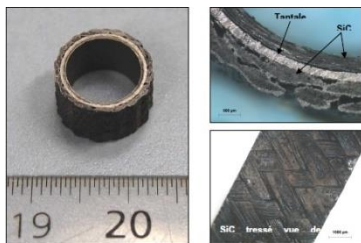
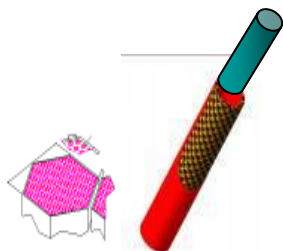
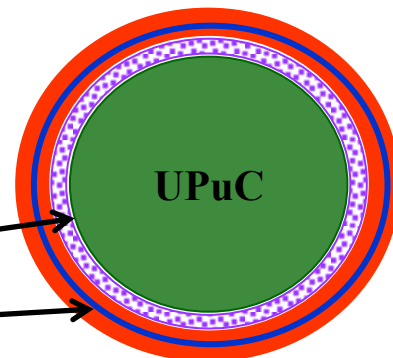
L'option Gaz : GFR - ALLEGRO

Le GFR requiert de la R&D sur deux points clés spécifiques :

- 1. Le combustible:** Conception d'un matériau entièrement réfractaire et capable de se maintenir même en cas d'accident grave

Exemple: Un combustible carbure (UPuC) avec un gainage en SiC/SiC

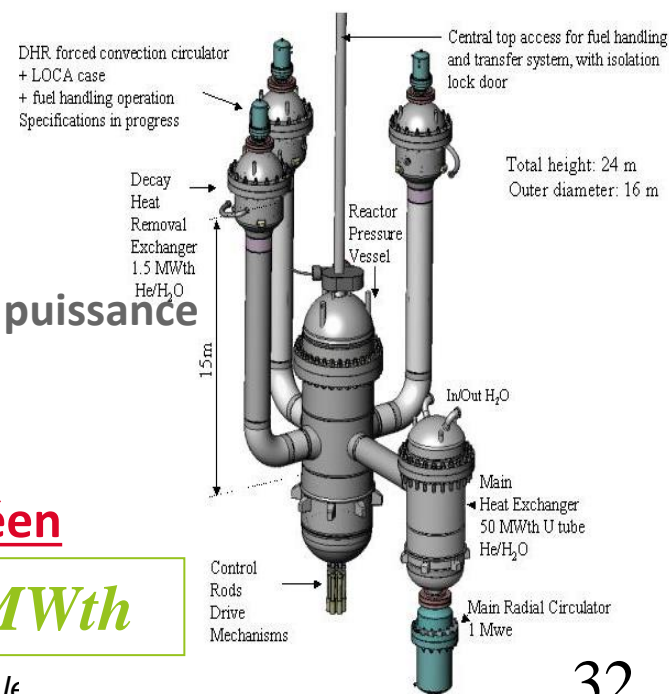
- Un buffer graphite pour la conductivité thermique
- Un sandwich SiC-M-SiC pour l'étanchéité



- 2. La sûreté:** En cas d'un APRP avec dépressurisation, la puissance résiduelle doit être évacuée en toutes circonstances.

ALLEGRO : Un réacteur expérimental européen

Un réacteur de 50 -100 MWth

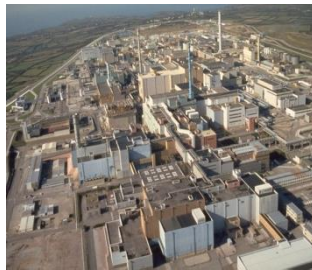


DÉCHETS NUCLÉAIRES : QUELLES OPTIONS POUR LE FUTUR ?

Combustible
usé



1



Séparation



Séparation
poussée



Transmutation

Ressources
Radiotoxicité
Thermique

3

Réduction des volumes
Tenue des colis

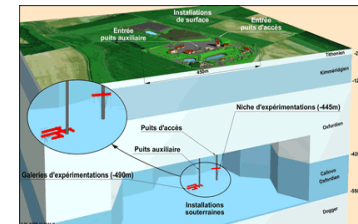


Conditionnement



Entreposage

2

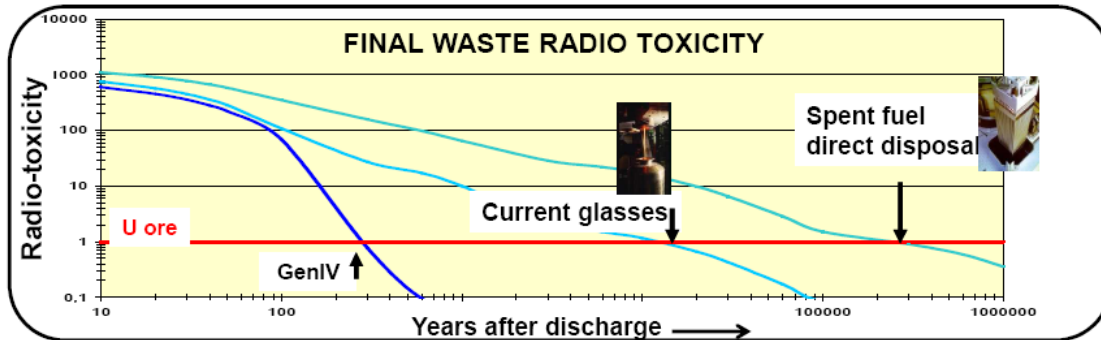


Stockage

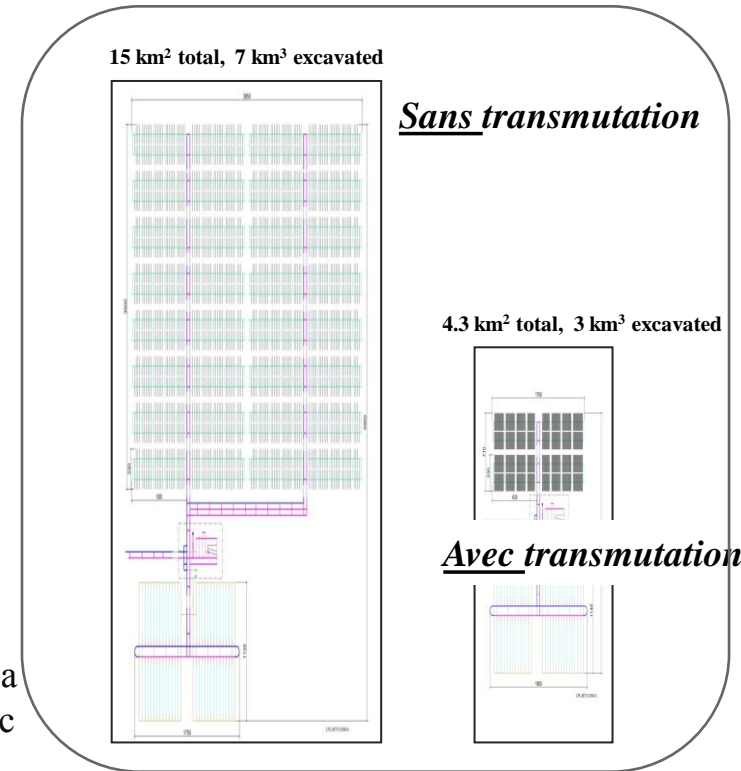
R&D SUR LA SÉPARATION DES ACTINIDES MINEURS

Pourquoi faire de la transmutation ?

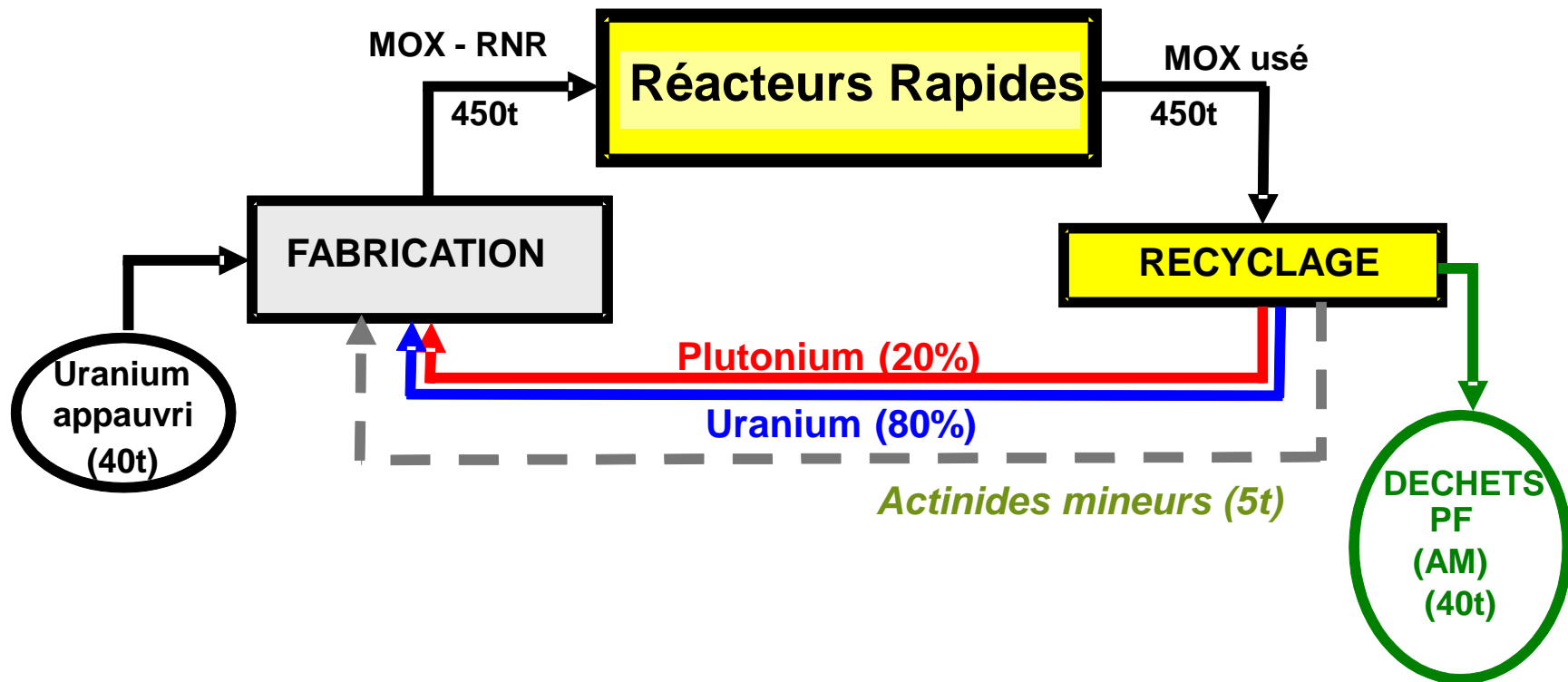
- Réduction de la durée de vie des déchets en stockage géologique
- Réduction de la radiotoxicité des déchets ultimes
- Réduction de l'emprise du stockage



Un pas important a été démontré dans l'installation ATALANTE à Marcoule: la séparation sélective de l'américium avec une grande efficacité (99.85%) avec la mise au point du procédé EXAm.



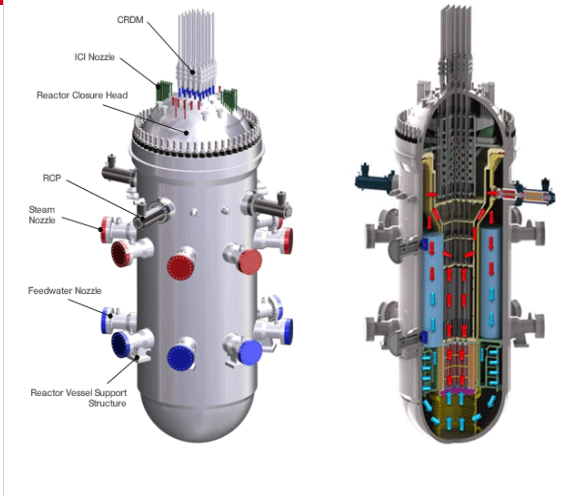
LA FERMETURE DU CYCLE DU COMBUSTIBLE



Flux de matières pour un parc de 60 GWe de réacteurs rapides

LES "PETITS" RÉACTEURS

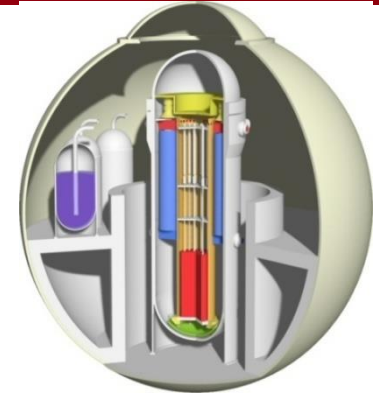
SMART - KAERI, Corée



mPower - B&W, USA

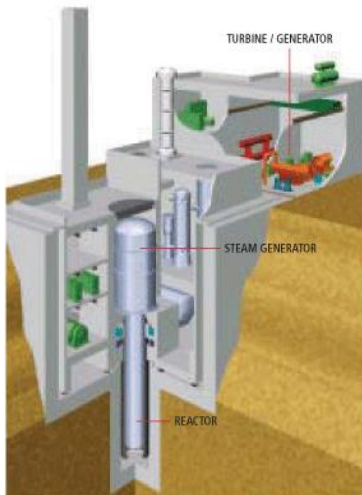


© 2010 Babcock & Wilcox Nuclear Energy, Inc. All rights reserved.



IRIS - Westinghouse, USA

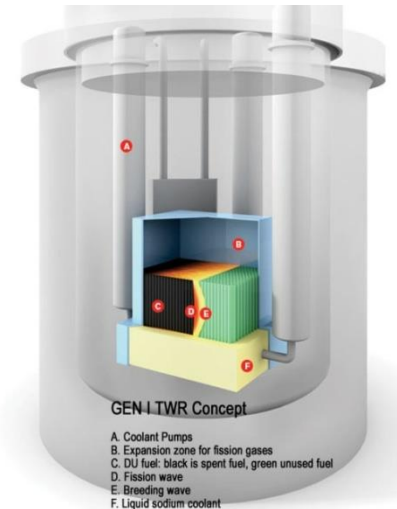
"Small is beautiful... but Big is efficient"



4S - Toshiba, Japon



KLTS 40 S - OKBM, Russie
Séminaire SPP - Saclay, le 17 mars 2014



TWR - Terrapower, USA

1. Le nucléaire dans le monde
2. Les fondamentaux du nucléaire
3. La R&D au CEA
4. Les scénarios énergétiques de l'ANCRE
5. La cogénération nucléaire

- L'ANCRE a été appelé à prendre part au débat sur la transition énergétique et a proposé à **la Ministre en charge de l'énergie de construire des scénarios énergétiques** à l'horizon 2050 en respectant un double objectif:
 - **Réduction des émissions de GES par un Facteur 4 en 2050**
 - **Réduction de la part de l'électricité nucléaire à 50% en 2025**
- L'ANCRE a alors défini les 3 scénarios suivants:
 - « **Sobriété renforcée** » (ou **SOB**)
 - « **Décarbonisation par l'électricité** » (ou **ELE**)
 - « **Vecteurs diversifiés** » (ou **DIV**)
- Un dernier scénario « Elec-V » a été produit. Cette variante du scénario ELE relâche la contrainte « d'une part maximum de 50 % de nucléaire en 2025-2030 »

Scénario retenu pour illustrer la trajectoire Diversité du DNTE

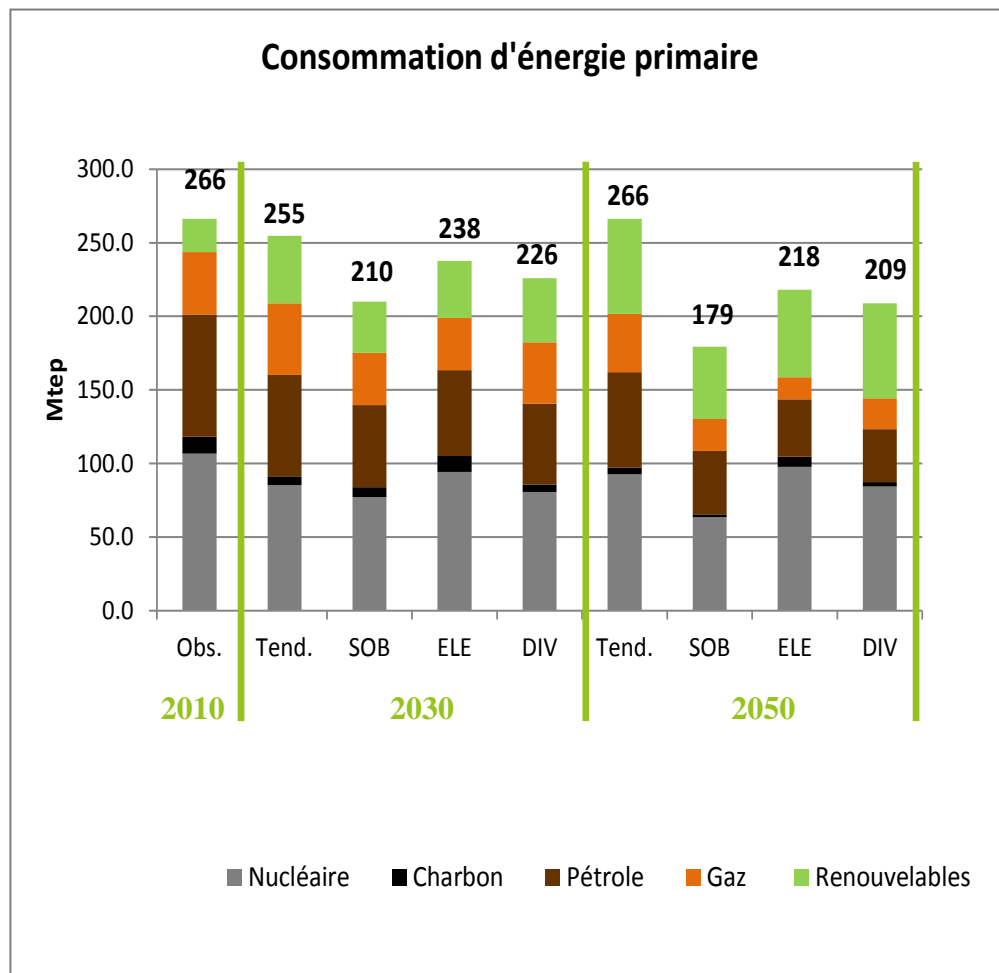
Des scénarios pour quoi faire?

1. **Les scénarios de l'ANCRE se positionnent dans la démarche en cours pour construire la loi sur la transition:** ils sont un des inputs pour éclairer représentation nationale et gouvernement
2. Les scénarios servent à construire les **recommandations de l'ANCRE dans le cadre de la stratégie nationale de recherche**
3. **Les scénarios ont permis d'identifier des sujets sur lesquels l'ANCRE définit son propre agenda de recherches:** Coûts de système des EnR (notamment), Analyse multicritère, Benchmark de modèles...

Les principaux résultats

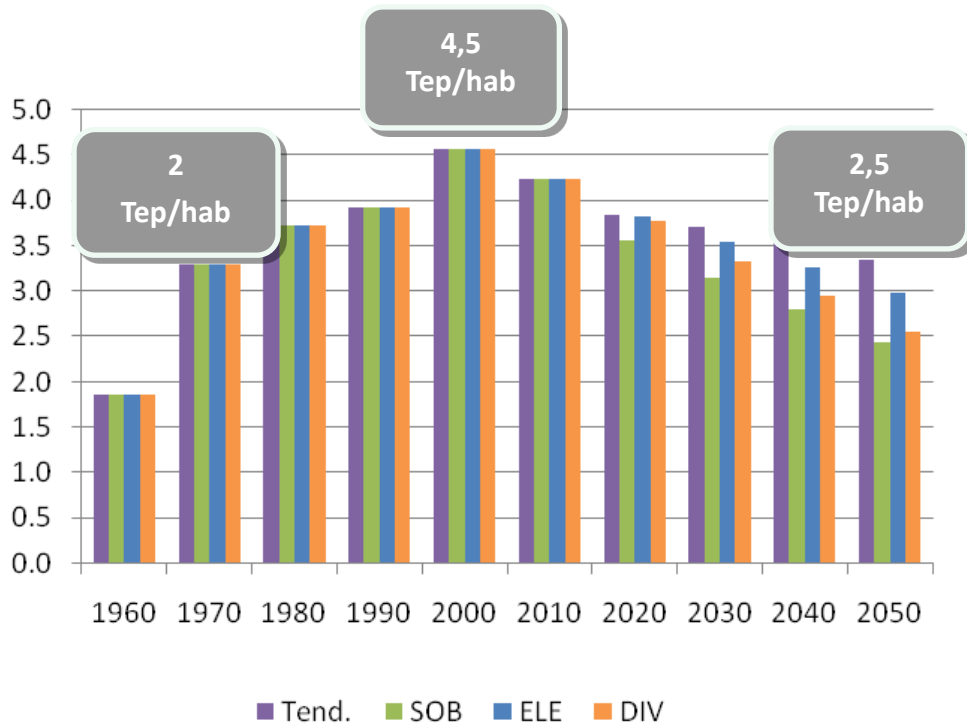
SOB, ELE et DIV :

- Une décroissance de l'énergie primaire malgré la croissance de la population, **en rupture avec la tendance historique**
- Et une forte réduction des énergies fossiles au profit de la croissance des énergies renouvelables, le nucléaire restant stable (sauf dans SOB)



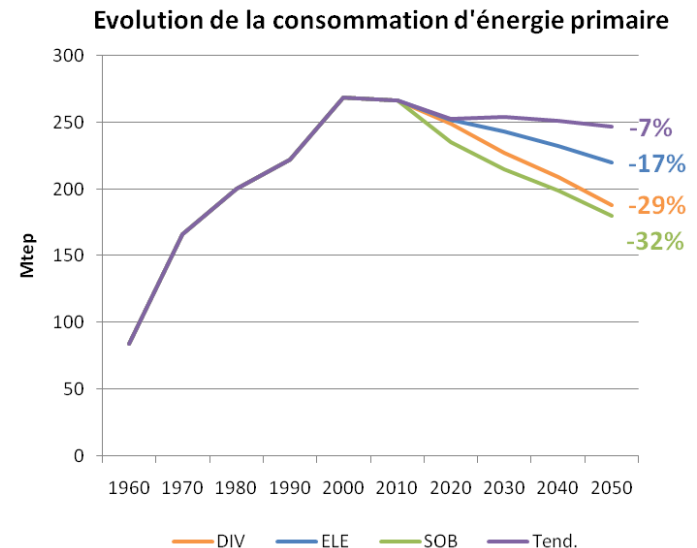
DIMINUTION DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR HABITANT

Energie primaire par habitant (Tep/hab)



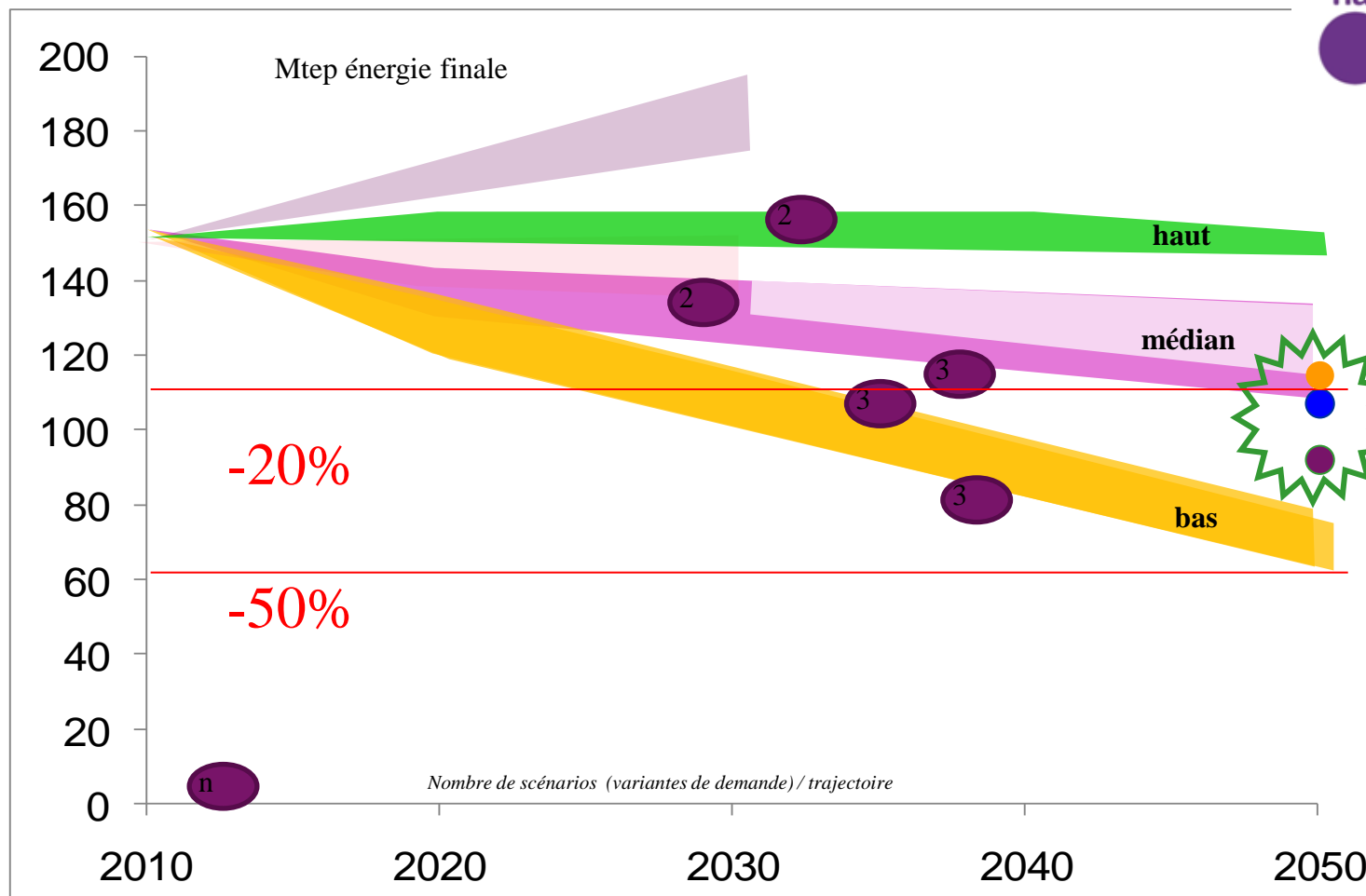
La tendance historique :
une augmentation continue
depuis plus de 50 ans

Le futur:
Une baisse de grande
ampleur sera-t-elle possible ?



ENERGIE FINALE: ANCRE ET SCÉNARIOS DU DNTÉ

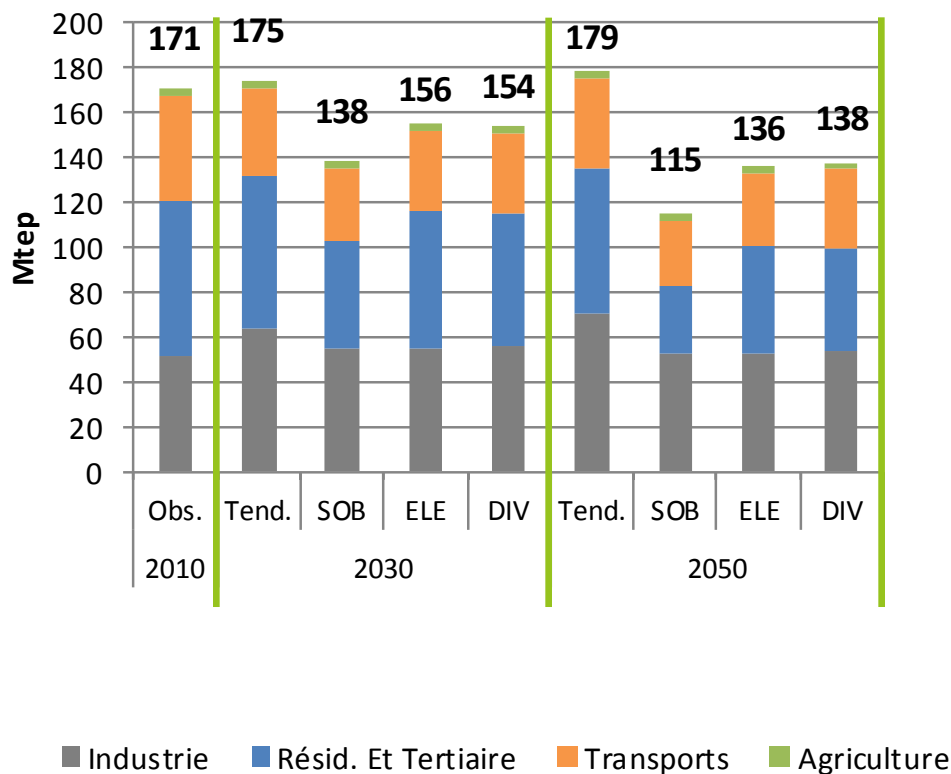
Consommation d'énergie finale



3 scénarios
ANCRE

Consommation d'énergie finale par secteur

Consommation d'énergie finale par secteur



Industrie : niveau ~constant

Les gains de performance compensent la hausse de la demande liée à l'augmentation d'activité

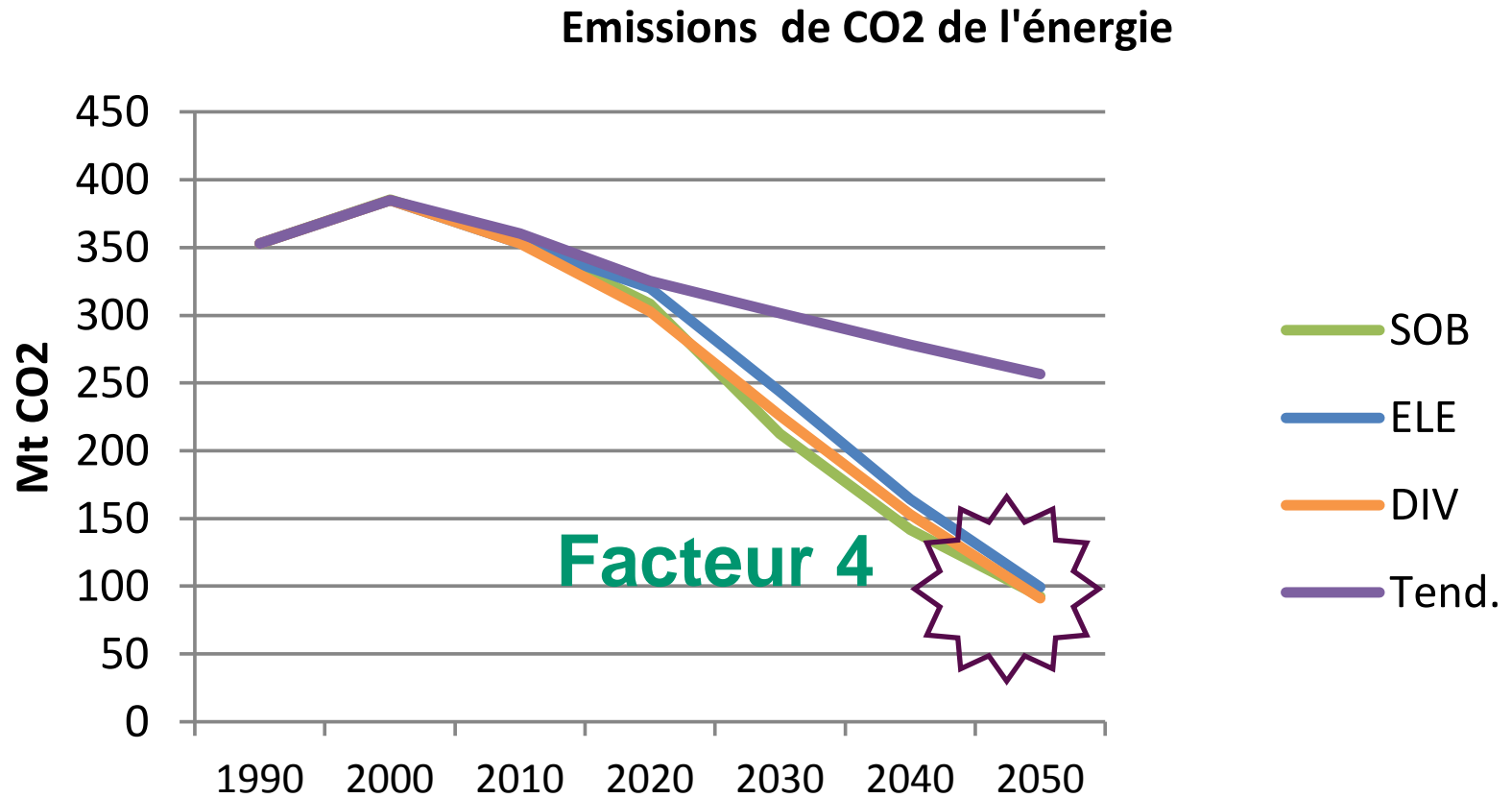
Résid. et Tertiaire : baisse (25 à 50%)

Les programmes de rénovation permettent d'accroître l'efficacité énergétique du secteur

Transport : baisse (23 à 35%)

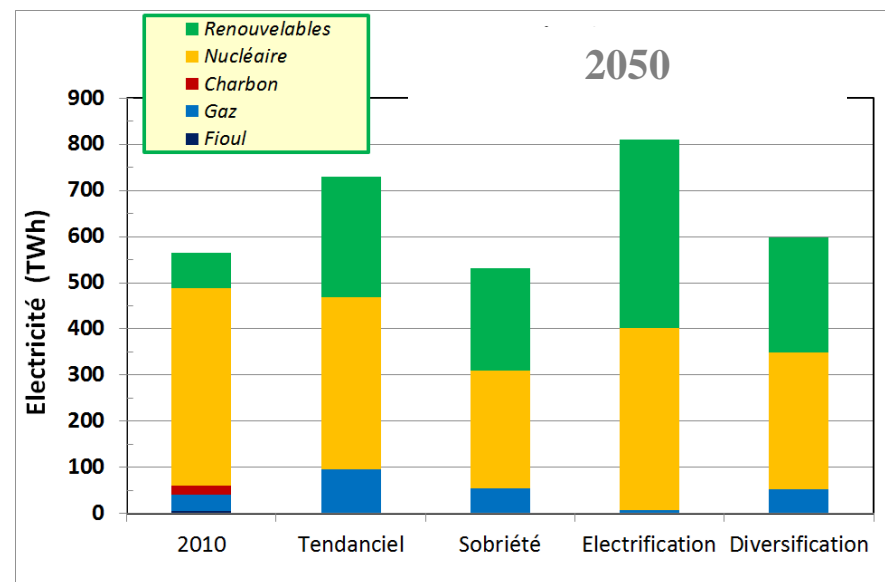
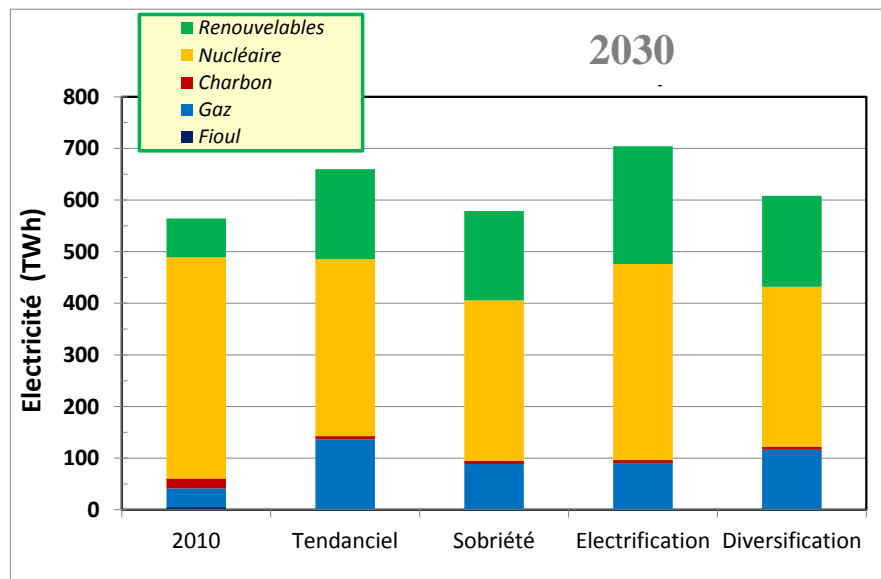
Efficacité énergétique et sobriété permettent d'atteindre ce résultat, avec un rôle significatif de la pénétration de l'électricité (selon scénarios)

EMISSIONS DE CO2



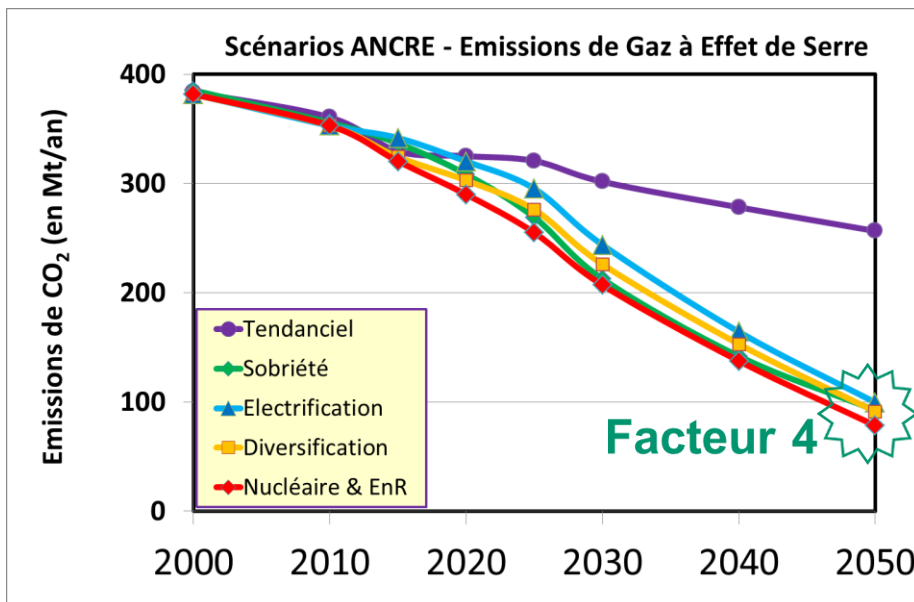
Malgré la diversification après 2025, le nucléaire reste une source majeure

- La gestion de l'intermittence est assurée par:
- des solutions d'effacement (SOB)
 - du stockage électrique (ELE)
 - de la cogénération (DIV)

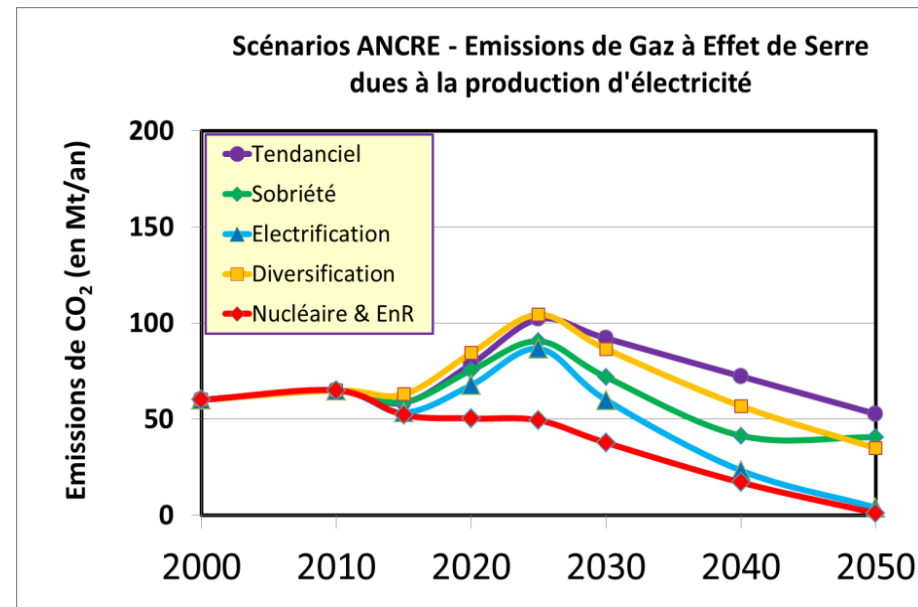


UNE PRIORITÉ: LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

Les quatre scénarios
permettent d'atteindre le
Facteur 4-énergie en 2050



Le scénario Nucléaire + EnR (ELEC-V)
permet d'éviter une remontée transitoire
des émissions dans le secteur électrique
en 2025



Transports

Transport

3 scénarios différenciés

Sobriété Renforcée	<ul style="list-style-type: none">• Modifications des comportements et des systèmes pour réduire ou transférer la demande (tarification, mode de possession...)• Amélioration de l'efficacité énergétique accrue et pénétration tendancielle des technologies
Décarbonisation par l'électricité	<ul style="list-style-type: none">• Amélioration de l'efficacité énergétique accrue• Diffusion accélérée des motorisations électriques (EV, PHEV) et hydrogène
Vecteurs diversifiés	<ul style="list-style-type: none">• Amélioration accrue et accélérée de l'efficacité énergétique des technologies• Développement de carburants à plus faible contenu carbone (GNV, LNG, bio-carburant)

Transport

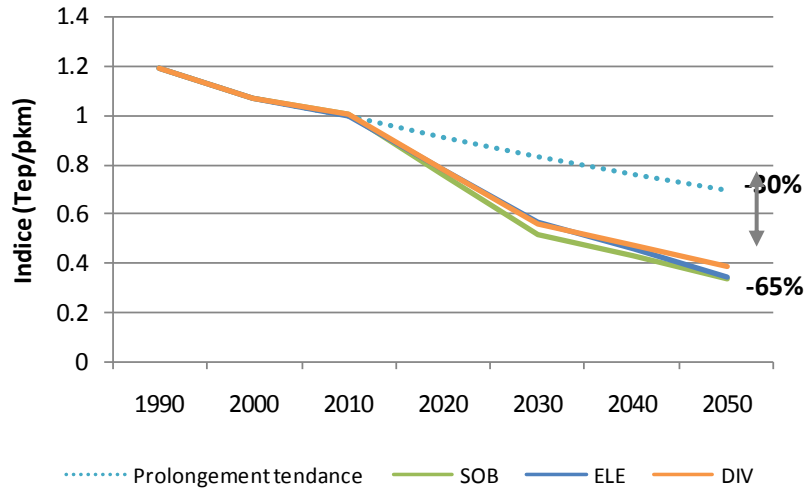
Hypothèses technologiques

Ruptures d'efficacité énergétique

VP 2L/100km : 2025 véhicules disponibles
2040 généralisation

Poids Lourds / Bus : 2030 -30% consommation (malgré norme de dépollution)

Efficacité énergétique des transports de passagers

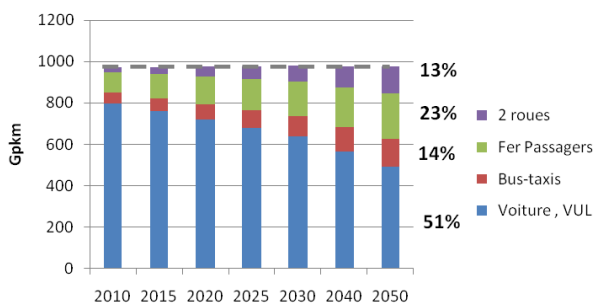


Développements technologiques transport

Sobriété Renforcée	Développement de véhicules serviciels adaptés aux parcours et à l'autopartage
Décarbonisation par l'électricité	<p>Forte pénétration des solutions électriques</p> <ul style="list-style-type: none"> -2030 véhicules électrifiés représentent 65% des ventes (1^{er} véhicule = PHEV, 2^{ème} véhicule = EV) -À partir de 2030 les livraisons intra-urbaine sont électriques (via politique publique) <p>Développement de l'Hydrogène</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couloir H2 pour les camions dès 2030 - Développement Bus H2, VP à partir de 2040
Vecteurs diversifiés	<p>Amélioration de l'efficacité énergétique accélérée</p> <ul style="list-style-type: none"> -véhicules 2l/100km se généralisent dès 2030 <p>Pénétration du gaz</p> <ul style="list-style-type: none"> -2030 : Couloir GNL pour les camions et flotte captive -2050 : 50% des Bus GNV, 25% des VP <p>Développement massif des bio-carburants (maintien 1G et développement 2G)</p> <ul style="list-style-type: none"> -2030 : Production x 2,5 (6Mtep) -2050 : Production x 6 (13Mtep)

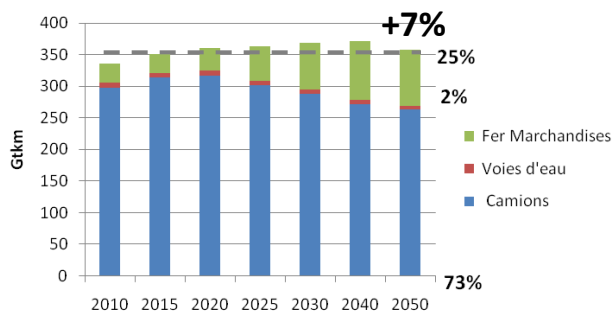
Sobriété Renforcée

Mobilité des personnes



2050
PARC VP
divisé par 2

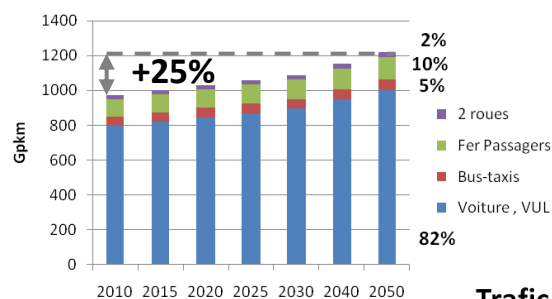
Trafic de marchandises



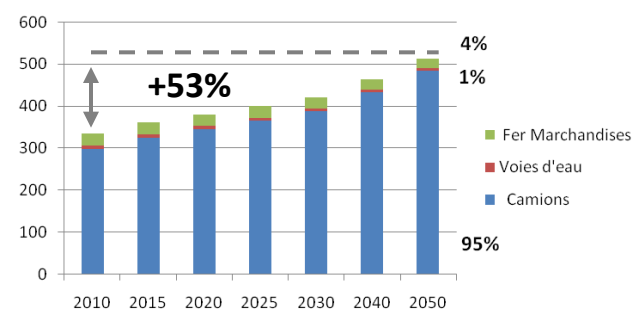
Décarbonisation par l'électricité

Vecteurs diversifiés

Mobilité des personnes



Trafic de marchandises



Conservation des tendances

- Passagers : +0.6% / an jusqu'à 2050 (+25% / 2010)
- Marchandises : +1.1% / an jusqu'à 2050 (+53% / 2010)

Conservation des répartitions actuelles entre modes

- Mobilité totale constante mais - 20% mobilité par personne
 - Développement des modes alternatifs à la voiture
- Pas d'augmentation du trafic de marchandises et développement du ferroutage (25% du trafic, soit 75Gtkm en 2050)

Résidentiel et tertiaire

Résidentiel/tertiaire

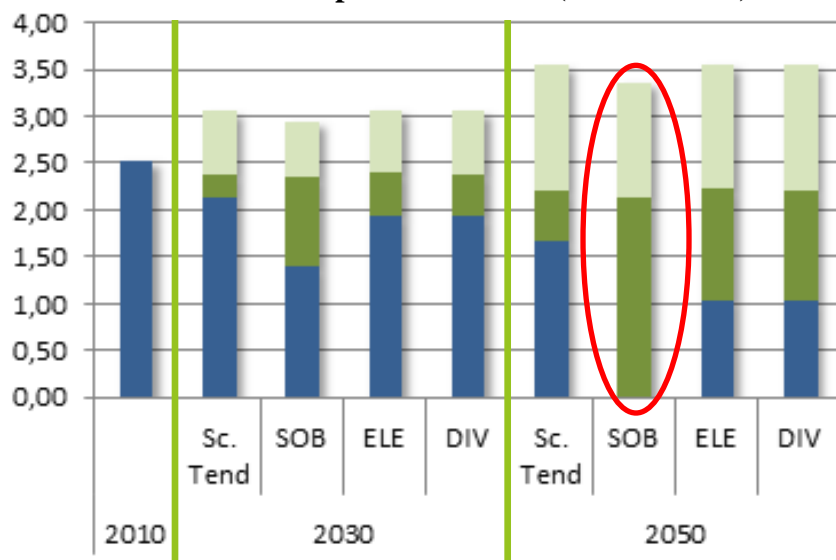
3 scénarios différenciés

<p>Sobriété Renforcée</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Comportements plus sobres : tassement de la demande de surface (m²/hab et m²/emploi) et renouvellement urbain plus dense, pas d'effets-rebond, stabilisation puis réduction progressive de la demande d'électricité spécifique • Améliorations de l'efficacité énergétique : rénovation complète du parc existant en 2050 (x4 par rapport au rythme actuel) et constructions neuves très performantes • Disparition du fioul dans les usages de chauffage et ECS
<p>Décarbonisation par l'électricité</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuite tendance de la demande : surfaces, répartition habitat collectif/habitat individuel, électricité spécifique, etc. • Amélioration de l'efficacité énergétique moins poussée : rénovation de la moitié du parc existant en 2050 (doublement par rapport au rythme actuel) • Fortes substitutions des énergies carbonées par l'électricité (développement massif des pompes à chaleur haute performance PAC)
<p>Vecteurs diversifiés</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuite tendance de la demande et améliorations de l'efficacité énergétique moins poussée (idem ELE sauf demande en électricité spécifique plus faible) • Fortes substitutions des énergies carbonées par la biomasse, les réseaux de chaleur (cogénération nucléaire notamment) et dans une moindre mesure le solaire ; le gaz issu de la biomasse se substitue partiellement au gaz naturel

*ECS : eau chaude sanitaire

Hypothèses communes

Evolution du parc résidentiel (milliards m2)



- Neuf
- Renové
- Non renové

Mutation du secteur d'activité

Rythmes identiques de constructions neuves et destructions (dans la fourchette des scénarios INSEE) sauf scénario SOB (moins besoin construction malgré destruction accélérée)

Rupture en terme de rénovation du parc (2 à 5 fois plus selon scénarios)

2050

TEND :

- la part du neuf est de 35% (résidentiel) – 25% (tertiaire)
- 45% du parc est de l'ancien non renové

SOB :

- la part du neuf est de 35% (résidentiel) – 20% (tertiaire)
- la **totalité du parc existant est renovée**, soit 650 000 logements/an contre 125 000 aujourd'hui

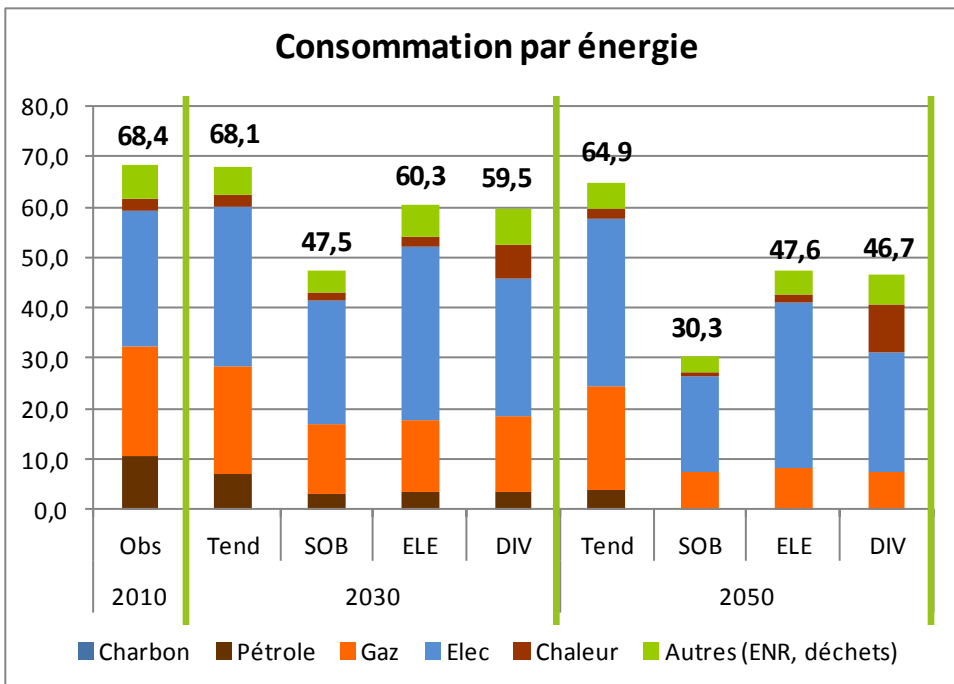
ELE et DIV :

- la part du neuf est de 35% (résidentiel) – 25% (tertiaire)
- 30% du parc est de l'ancien non renové

Résidentiel/tertiaire

Part des différentes énergies finales

Consommation par énergie



Disparition du fioul
Recul modéré du gaz
Croissance de la part de l'électricité

TEND : pas d'évolution des parts de marché (recul du fioul)

SOB : parts de marché peu modifiées (disparition du fioul).

ELE : forte augmentation des parts de marché de l'électricité pour chauffage et ECS (de 20 % à 60 %)

DIV : augmentation des parts de marché de la chaleur en réseau et (dans une moindre mesure) des sources renouvelables (biomasse, solaire)

Industrie

Industrie

3 scénarios différenciés

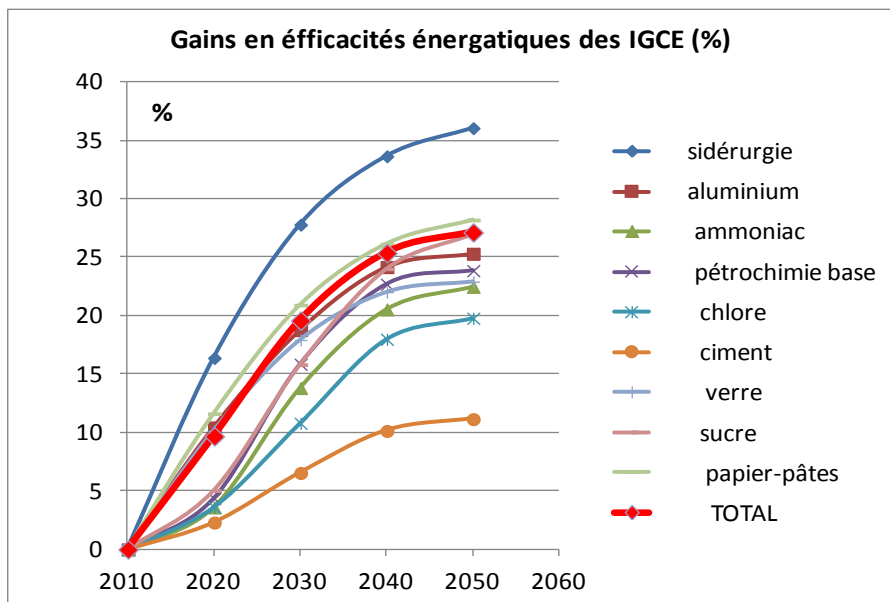
Hypothèses communes

- Évolutions des productions industrielles identiques pour les 3 scénarios
- Prise en compte d'un développement nécessaire du CCS à partir de 2030 (montée progressive) pour respecter trajectoire d'émissions de CO2

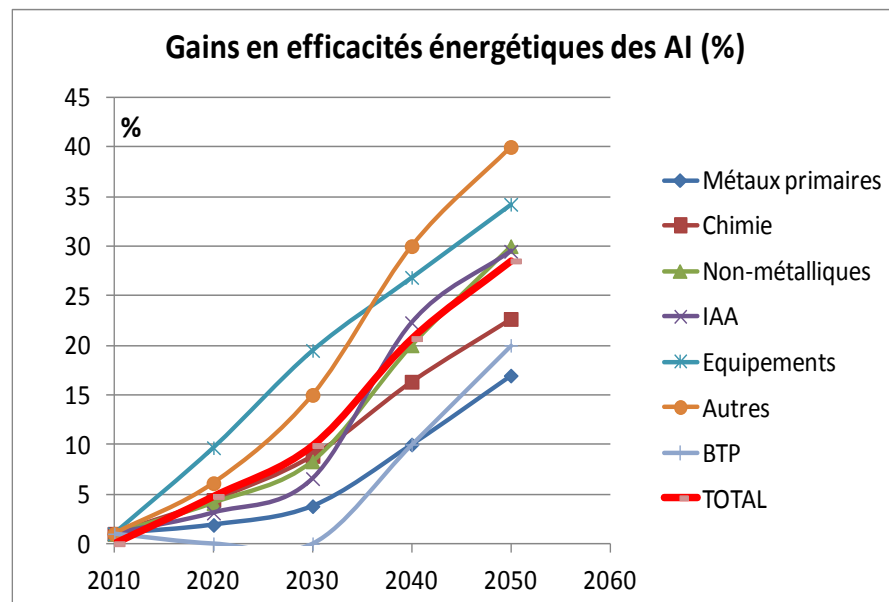
<p>Sobriété Renforcée</p>	<p>Amélioration poussée de l'efficacité énergétique / électricité et combustibles: jusqu'à 95% du maximum</p>
<p>Décarbonisation par l'électricité</p>	<p>Bascules énergétiques des combustibles fossiles vers électricité (+15% dans l'industrie au total, à l'horizon 2050 par rapport au scénario SOB)+ développement de l'acier électrique (de 1/4 à 1/3 en énergie)</p> <p>Efficacités énergétiques moindres que SOB (facteur 0,9)</p>
<p>Vecteurs diversifiés</p>	<p>Bascules énergétiques des combustibles fossiles vers vecteurs énergétiques renouvelables</p> <p>Efficacités énergétiques moindres que SOB (facteur 0,9)</p>

(Exemples scénarios SOB)

IGCE



AI



L'amélioration potentielle de l'efficacité énergétique est de 10 à 40 % selon les secteurs (enquête CEREN auprès des industriels)

L'amélioration est plus rapide pour les IGCE qui ont un intérêt économique immédiat

SOB : 95% du « gisement » atteint en 2050

ELE et DIV : 90% des gains atteints pour le scénario **SOB** en 2050

Production d'énergie

Production d'énergie

3 scénarios différenciés

Sobriété renforcée	Développement rapide des EnR « électriques » Nucléaire à 50% en 2025 Technologies de rupture : Capture et Stockage du CO ₂ (40 Mt)
Décarbonisation par l'électricité	Développement rapide des EnR « électriques » Nucléaire à 50% en 2025 Technologie de rupture : Stockage électrique de très grande capacité (38 GW, 47 TWh)
Vecteurs diversifiés	Développement rapide des EnR toutes énergies Nucléaire à 50% en 2025 Technologie de rupture : Développement du chauffage urbain par récupération de la chaleur des centrales électriques (120 TWh)

PRODUCTION D'ÉNERGIE HYPOTHÈSES COMMUNES

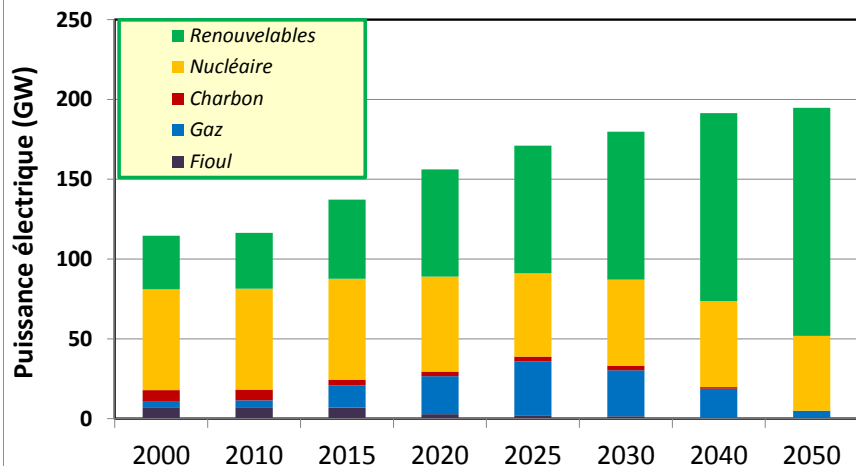
- ✓ **Baisse du nucléaire à 50%** de la production électrique dès 2025
- ✓ **Introduction de renouvelables** à un rythme très soutenu
- ✓ **Élimination progressive des centrales au fioul et charbon**
- ✓ « **Back-up** » de l'intermittence par des centrales au gaz
- ✓ **Prise en compte des objectifs nationaux, voire au-delà**
- ✓ **Exports d'électricité stables**

ENR 2020: objectifs nationaux

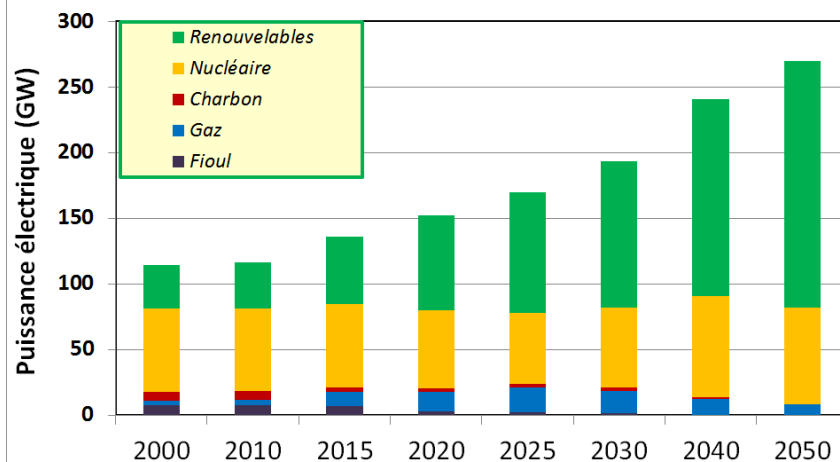
- ✓ Eolien: **25 GW**
(19 GW onshore + 6 GW offshore)
- ✓ Solaire PV: **10.6 GW**
(objectif = 5.4GW)
- ✓ Energies marines: **800 MW**
- ✓ Biogaz: **0.3 Mtep**
- ✓ Géothermie: **80 MW**
- ✓ Biomasse et déchets: **1.2 Mtep**
- ✓ Solaire thermodynamique:
10% du solaire PV

cea PUISSANCE ÉLECTRIQUE INSTALLÉE

Scénario SOBRIETE - Puissance électrique installée

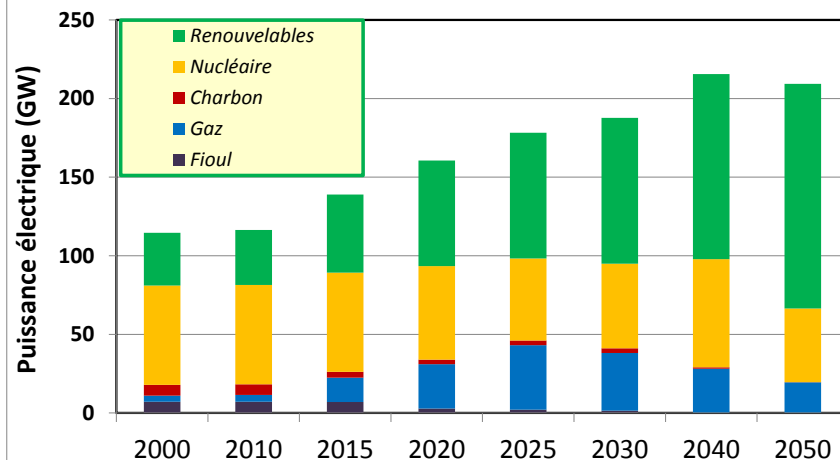


Scénario ELECTRIFICATION - Puissance électrique installée



- Très forte pénétration des EnR variables (ERV)
- La puissance électrique installée est très supérieure à la pointe de puissance appelée
- La puissance nucléaire peut être transitoirement supérieure

Scénario DIVERSIFICATION - Puissance électrique installée



Production d'énergie

Challenges technologiques

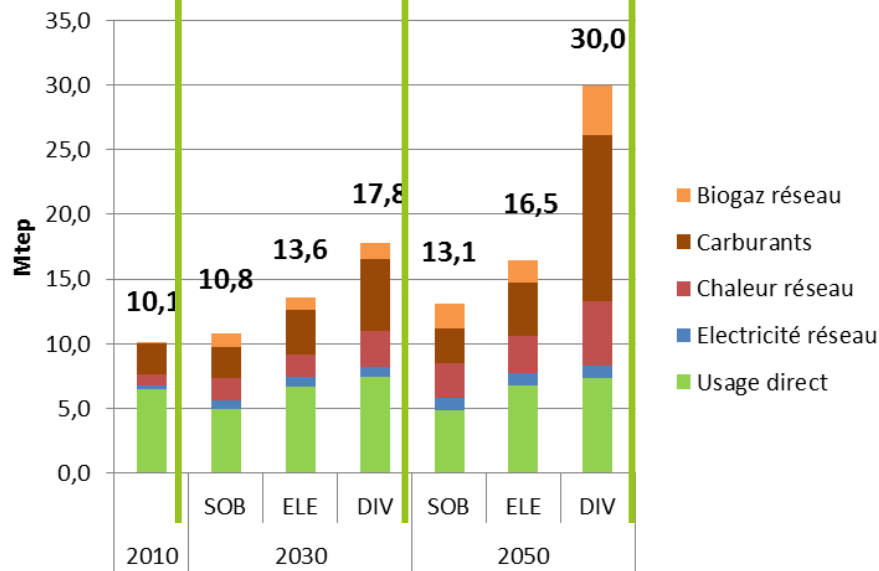
- **Prise en compte de l'introduction d'énergies intermittentes sur le réseau électrique**
 - Performances, origines et coûts des matériels (éolien, solaire...)
 - Développement, gestion et équilibrage du réseau (smart grids)
 - Stockage d'électricité de grande capacité (à définir)
 - Production interruptible de nouveaux vecteurs énergétiques
 - Suivi de charge des centrales nucléaires
- **Récupération de la chaleur fatale des centrales**
 - Développement des réseaux de chaleur
 - Optimisation de la chaleur industrielle
- **Production de vecteurs énergétiques flexibles**
 - Biomasse de 2nde génération (carburants liquides)
 - Carburants gazeux (biogaz, hydrogène, méthane)
- **Capture et stockage du CO₂**

Biomasse

Biomasse

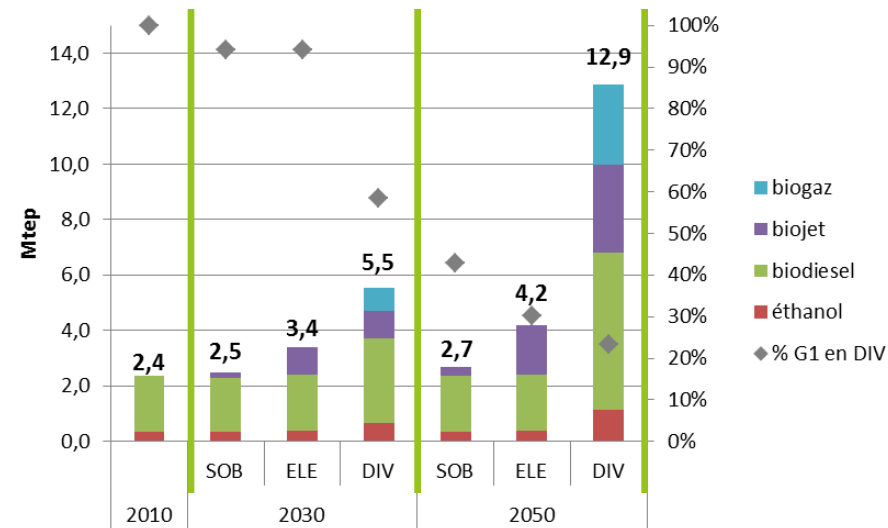
Usages énergétiques

Production de Bio-énergie



- **SOB**, **ELE** et **DIV** : Bio-énergie en croissance
- **SOB**, **ELE** : Le biogaz issu de déchets est la principale source de croissance
- **DIV** : multiplication par 3 des bioénergies (carburant x5,5, chaleur réseau x 5,3)

Production de biocarburants



- **SOB** et **ELE** : L'efficacité énergétique des transports permet d'atteindre des taux d'incorporation de 20% à 25% énergie dans les carburants routier
- **DIV** : Le développement massif des biocarburants permet d'atteindre 50% énergie dans les carburants routiers

Analyse d'impacts et évaluation multicritères

Les investissements sur 2010-2050

	Secteur Résidentiel - Tertiaire	Secteur Transport	Production d'électricité
	G€ ₂₀₁₂ /an	G€ ₂₀₁₂ /an	Investissements cumulés (2012-2050) en G€ ₂₀₁₂
TEND	4,3	103,1	589
SOB	24 <i>x 6</i>	55,7 <i>-50 %</i>	468 <i>-20%</i>
ELE	12,4	<i>+ 30%</i> 133	606
DIV	<i>x 3</i> 12,5	<i>+ 10%</i> 113	491 <i>-17%</i>
ELEC-V	12,4	133	499

Production d'électricité

*Il reste à évaluer
CSC dans **SOB**
Stockage dans **ELE**
Chaleur BT dans
DIV et ELEC-V*

- Forte concentration des investissements sur **2030-2040** (+de 50 % des investissements)

CONSÉQUENCES SUR L'EMPLOI

Evolution des emplois directs et indirects
entre 2010 et 2050 par secteur d'activités *
(en milliers d'emplois)

	Secteur tertiaire, résidentiel	Secteur Transports	Production d'électricité
TEND	72	484	163
SOB	405	-168	156
ELE	209	386	171
DIV	211	393	170
ELEC-V	209	386 - 20 %	165

Annotations: x 5,5 (green arrow from 72 to 405), x 3 (green arrow from 209 to 211), -20% (red arrow from 484 to 386).

*L'impact sur l'emploi des scénarios de l'ANCRE a été chiffré pour les différents secteurs, mais les résultats doivent toutefois être pris avec beaucoup de précaution étant données les incertitudes du chiffrage macroéconomique. Les chiffres donnés ne peuvent être considérés comme un gain d'emploi net pour l'économie française.

Quels enseignements pour la politique de recherche?

Du Facteur 4 CO₂ énergie au Facteur 4 "tous gaz"

LE FACTEUR 4 EST TECHNIQUEMENT POSSIBLE AVEC DES STRATÉGIES DIVERSIFIÉES, MAIS AU PRIX D'EFFORTS TRÈS SOUTENUS

- Les scénarios montrent que des **modifications importantes de comportements et le déploiement massif de technologies nouvelles**, en supposant leur faisabilité économique et sociétale, permettent d'atteindre le Facteur 4 pour l'énergie
- Au-delà, vers le Facteur 4 "tous gaz", **il devient nécessaire de mettre en œuvre au moins une technologie de rupture**
- Les dynamiques de recours aux technologies nouvelles sont différentes selon les secteurs et les technologies. A l'exception de certaines EnR et des STICs, **les nouvelles technologies ne jouent un rôle majeur qu'à partir de 2025-2030.**
- Il importe cependant de les développer sans tarder par **un effort soutenu de R&D mené au plan national et européen**

Les technologies de rupture dans les scénarios

Scénario SOB : Captage et stockage du CO₂,
passage de 0 à 40 Mt/CO₂ entre 2030 et 2050.

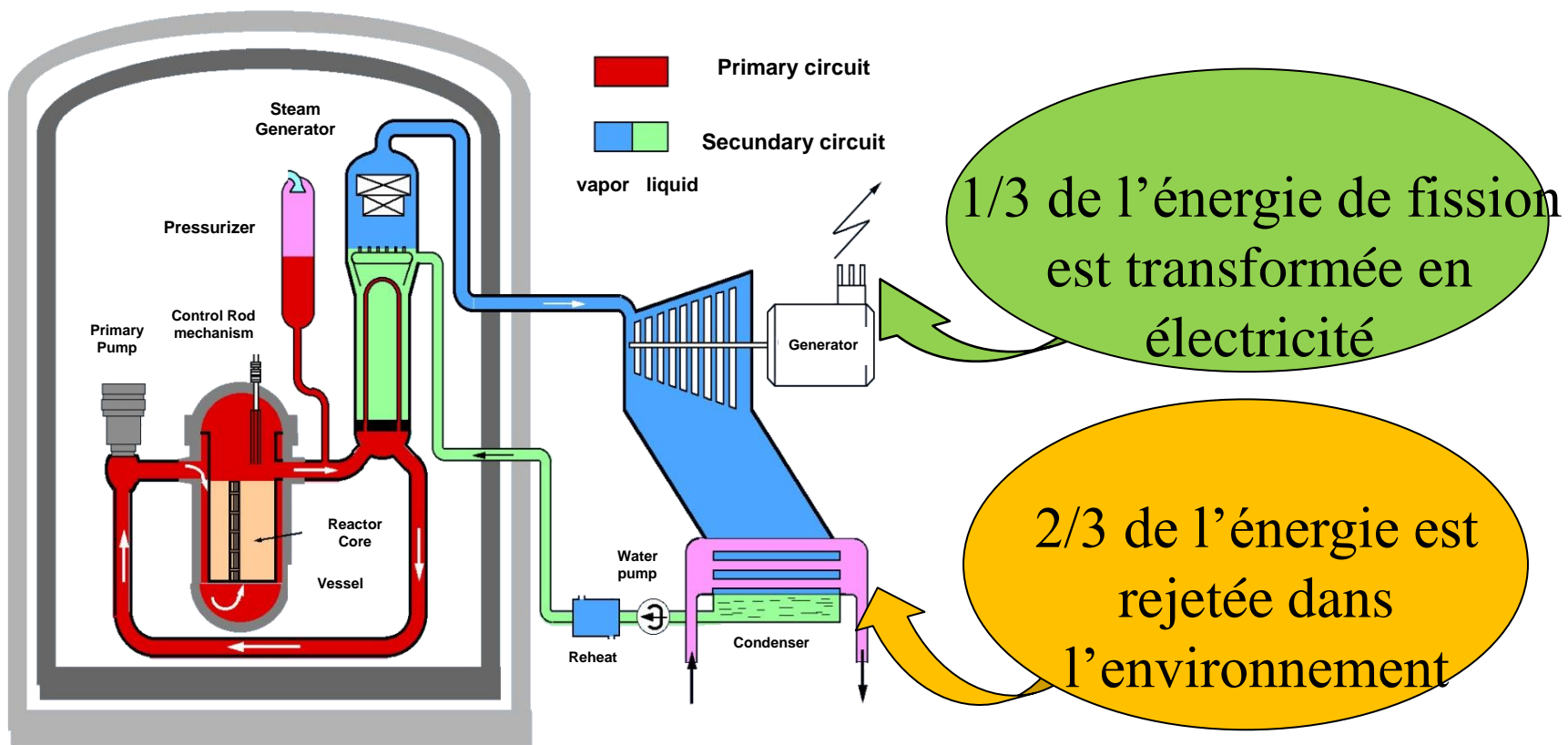
Scénario ELE : Stockage massif d'électricité
38 GW, 47 TWh, technologie à identifier

Scénario DIV : Chauffage urbain par récupération de la chaleur des
centrales électriques nucléaire 120 TWh

Variante ELEC-V: Chauffage urbain par récupération de la chaleur des
centrales électriques nucléaire 120 TWh

1. Le nucléaire dans le monde
2. Les fondamentaux du nucléaire
3. La R&D au CEA
4. Les scénarios énergétiques de l'ANCRE
5. La cogénération nucléaire

LE RENDEMENT ÉLECTRIQUE



Exemple d'un réacteur nucléaire de 1300 MWe

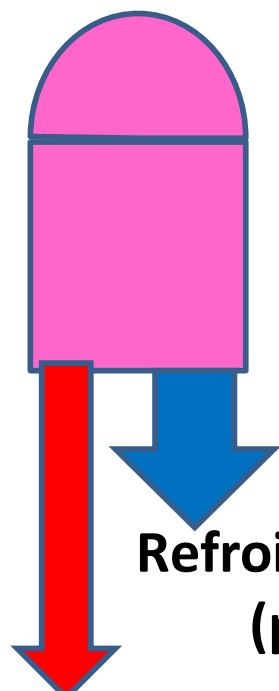
T _{hot} (°C)	T _{cold} (°C)	W _p (MW)	Q _i (MW)	W _{HP} (MW)	W _{BP} (MW)	W _{gross} (MWe)	Q _s (MW)	η _{carnot} (%)	η (%)
288	39	9	3 920	-417	-936	1 353	-2 562	44.4%	34.3%

LA COGÉNÉRATION

Mode Cogénération

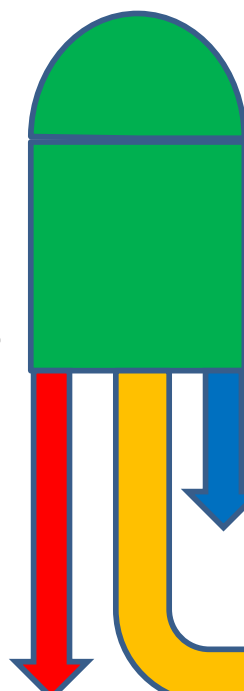
Rendement électrique plus faible
(soutirage à plus haute température)
Rendement énergétique plus élevé

CENTRALE ÉLECTRIQUE



Refroidissement
(pertes)

ÉLECTRICITÉ



Refroidissement
(pertes)

Autre produit
énergétique
(chaleur,
combustibles, eau, ...)

ÉLECTRICITÉ

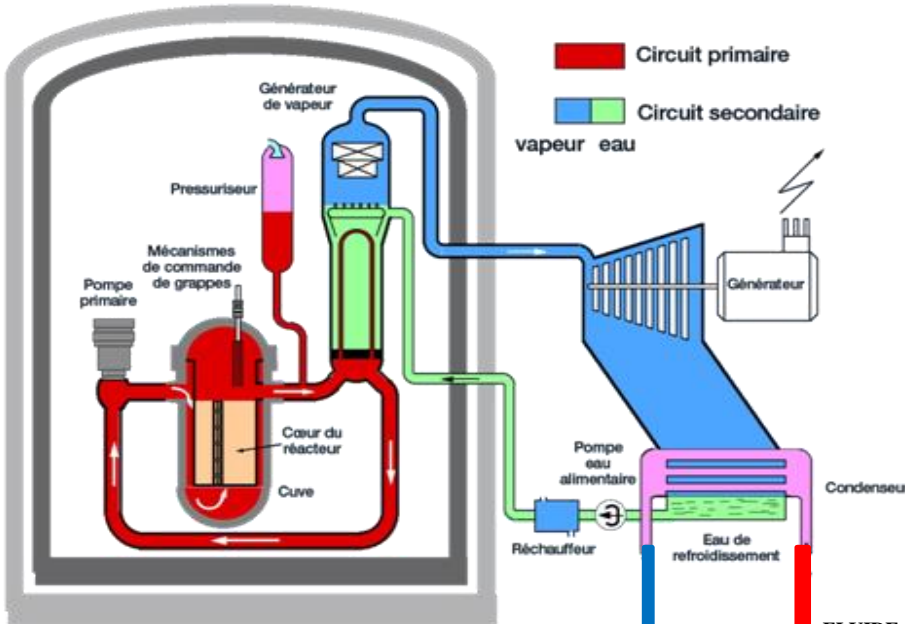
Mode électrique pur

Rendement électrique
de 34% (nucléaire) à 56% (Gaz en CCGT)

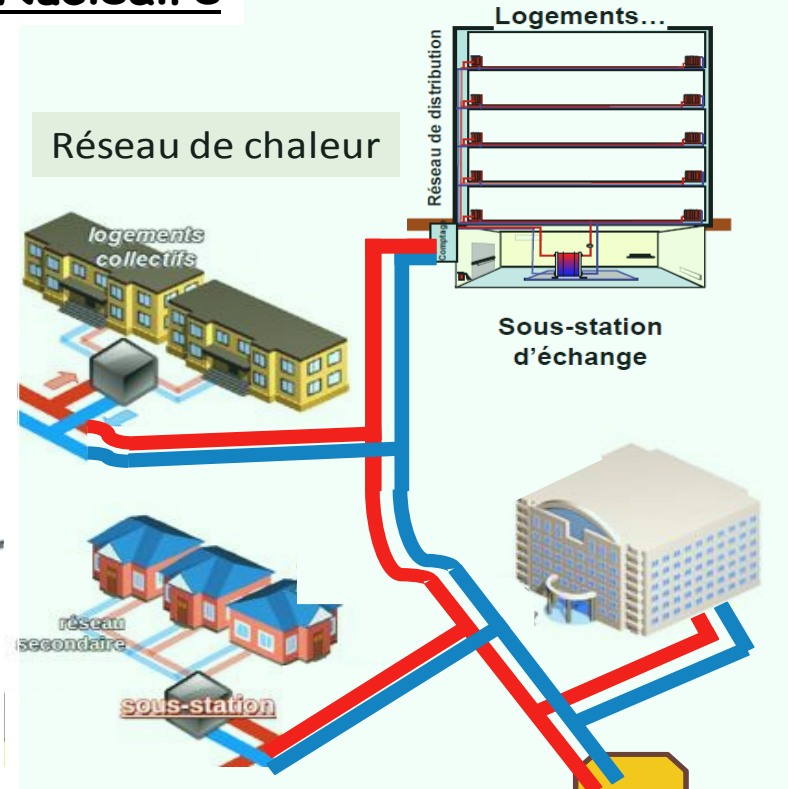
CHAUFFAGE URBAIN AVEC LES REJETS THERMIQUES DES CENTRALES

Cogénération Nucléaire

Réacteur nucléaire



Réseau de chaleur

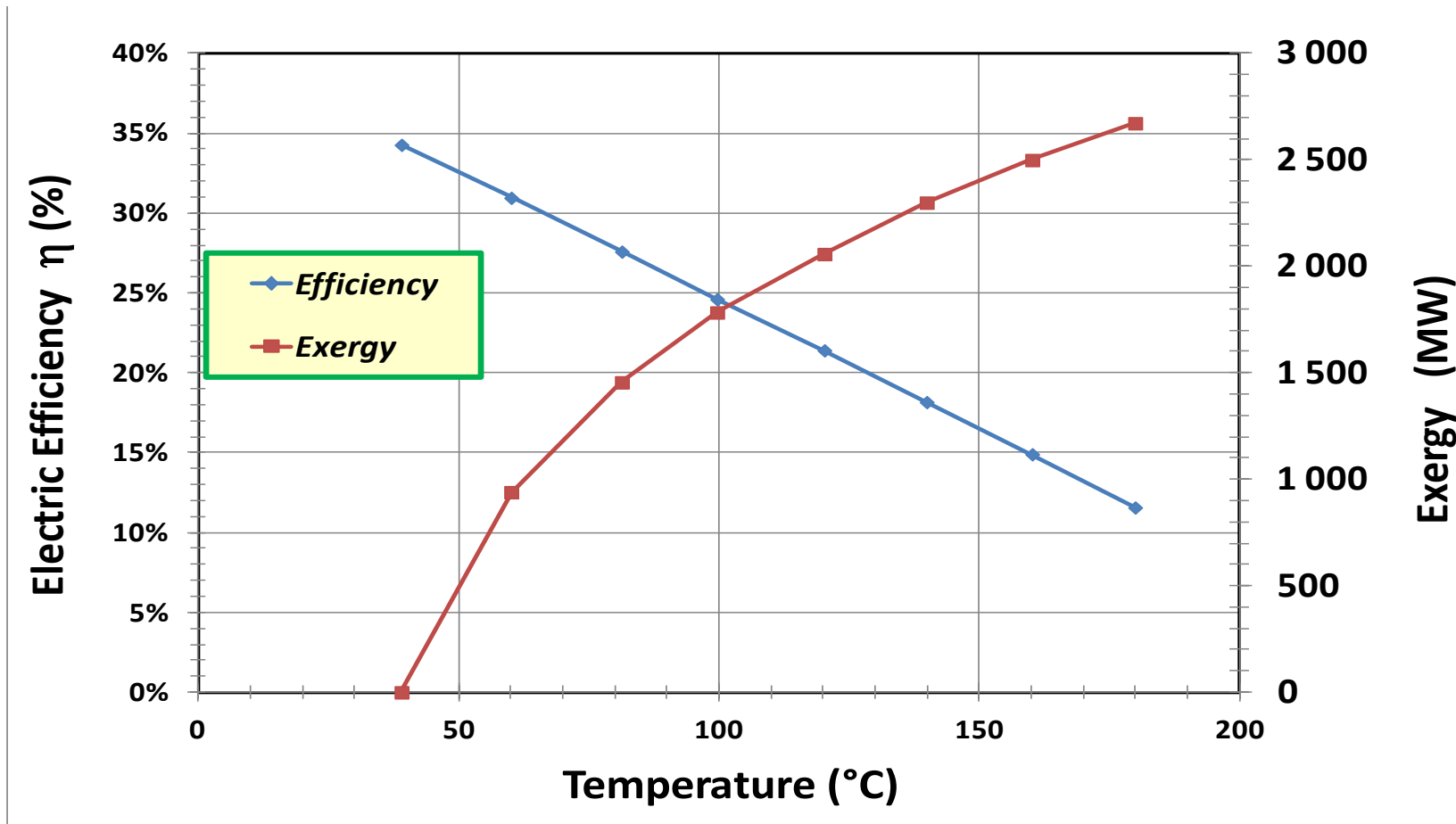


Ligne de transport

longueur ~ 100 km

Séminaire SPP – Saclay, le 17 mars 2014

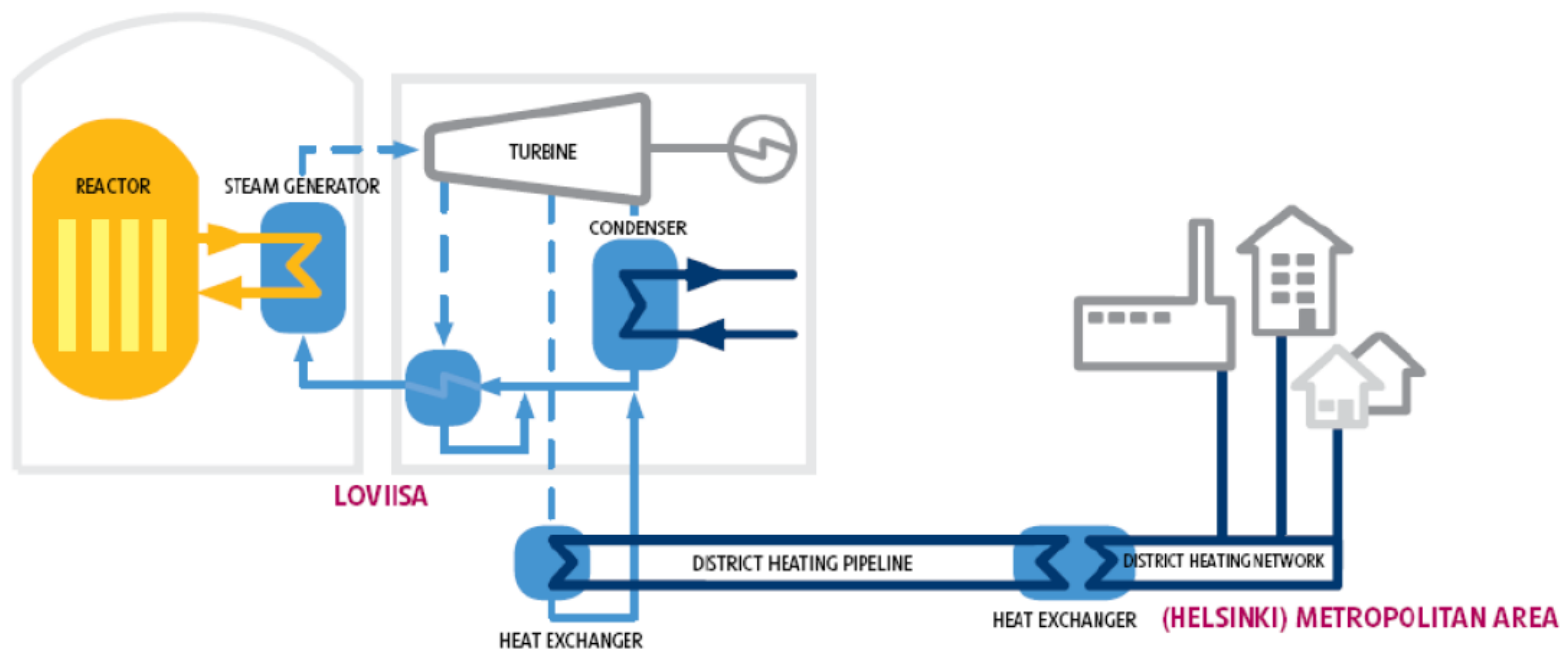
EXERGIE ET RENDEMENT ÉLECTRIQUE



Compromis entre production d'électricité et exergie

PWR Connexion

Heat extraction from a Pressurized Water Reactor



Source : Harri Tuomisto, FORTUM, Finland , October 2010

Loviisa 3 CP – Heat transport on a long distance

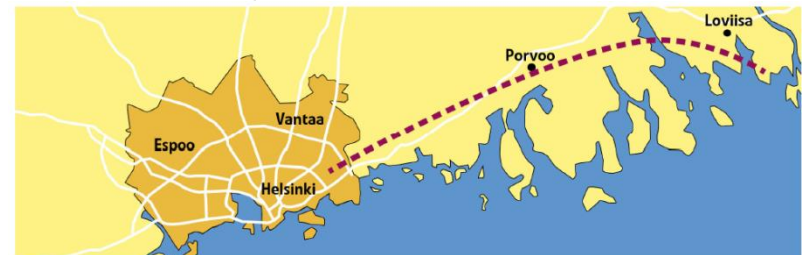
Heat transport in pipes

- Mounting in a rock tunnel, cross section 30 m²
 - stable conditions
 - positive maintenance aspects
- Near surface installation
 - lower costs
 - environmentally more challenging



District heat transport system

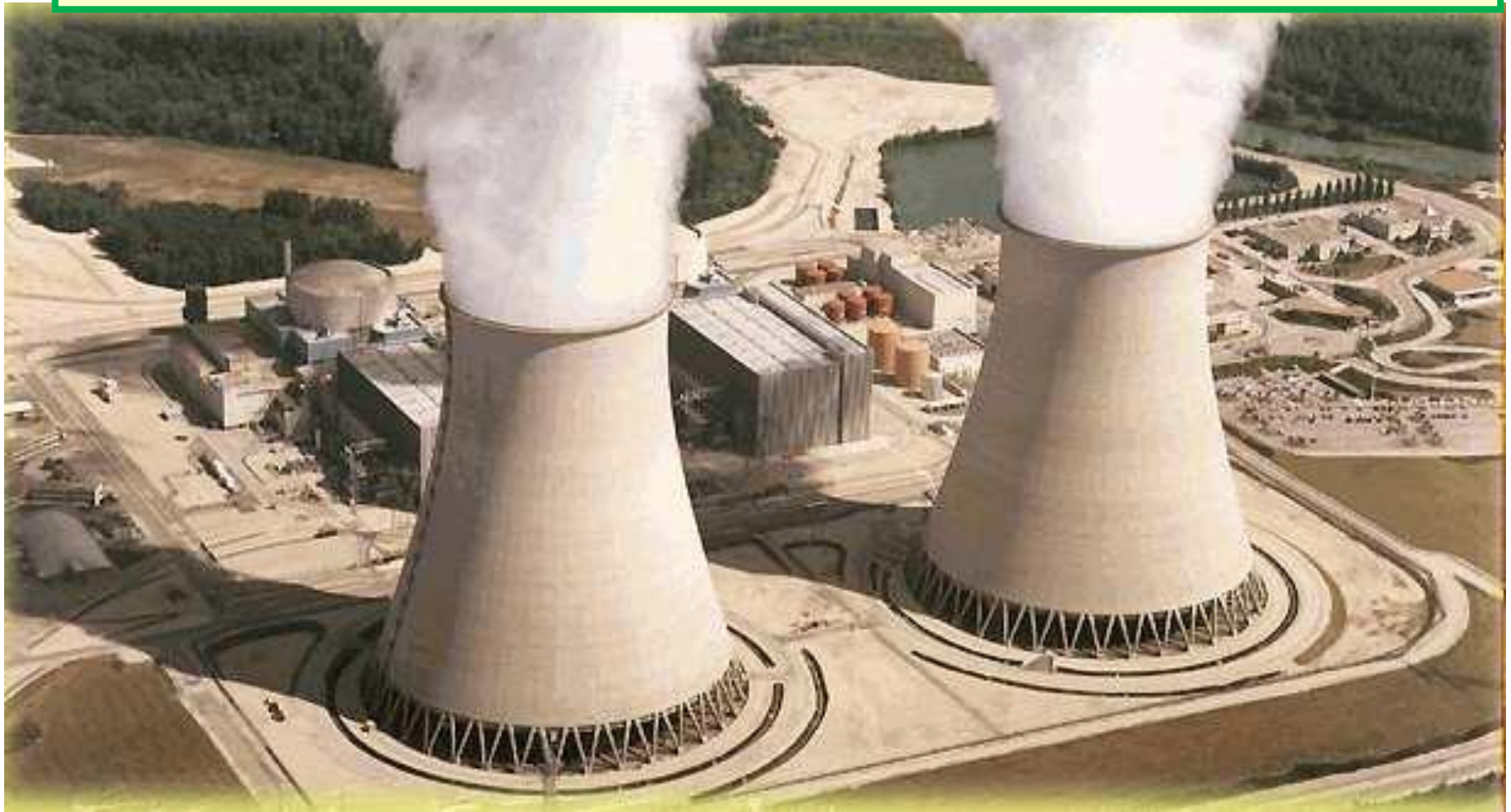
- Distance over 75 km (Loviisa – eastern Helsinki)
 - 2 x Ø 1200 mm pipes, PN25 bar, Q = 4 - 5 m³/s
 - 4 - 7 pumping stations
 - total pumping power needed tens of MWs
 - compensates for heat losses
 - Control scheme
 - district heat water temperature or flow rate
 - Heat accumulator needed, heat distribution to the local district heat network via heat exchangers



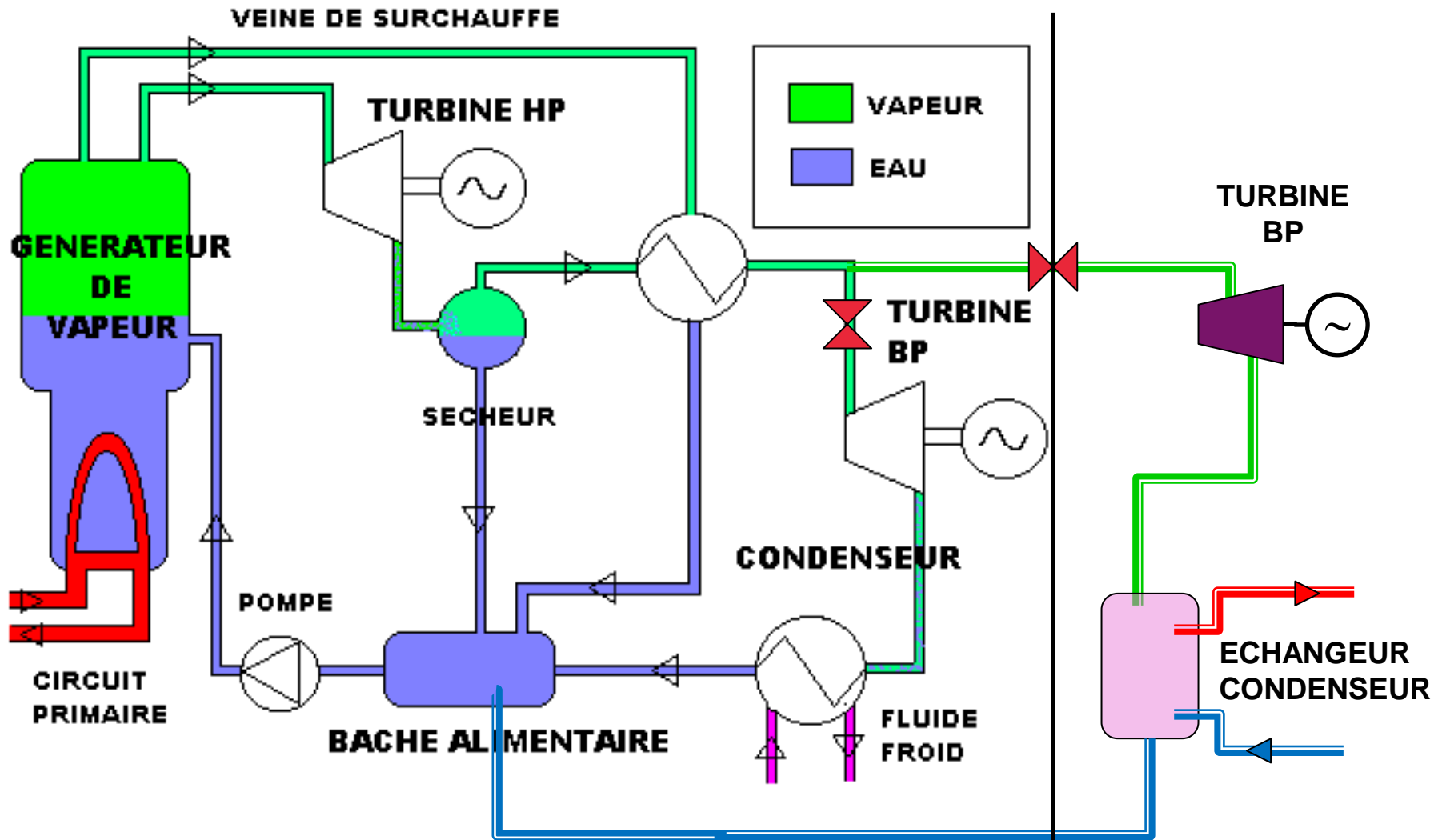
Source : Harri Tuomisto, FORTUM, Finland , October 2010

LA CENTRALE DE NOGENT-SUR-SEINE

Deux réacteurs de 1300 MWe
refroidis par des tours aéro-réfrigérantes

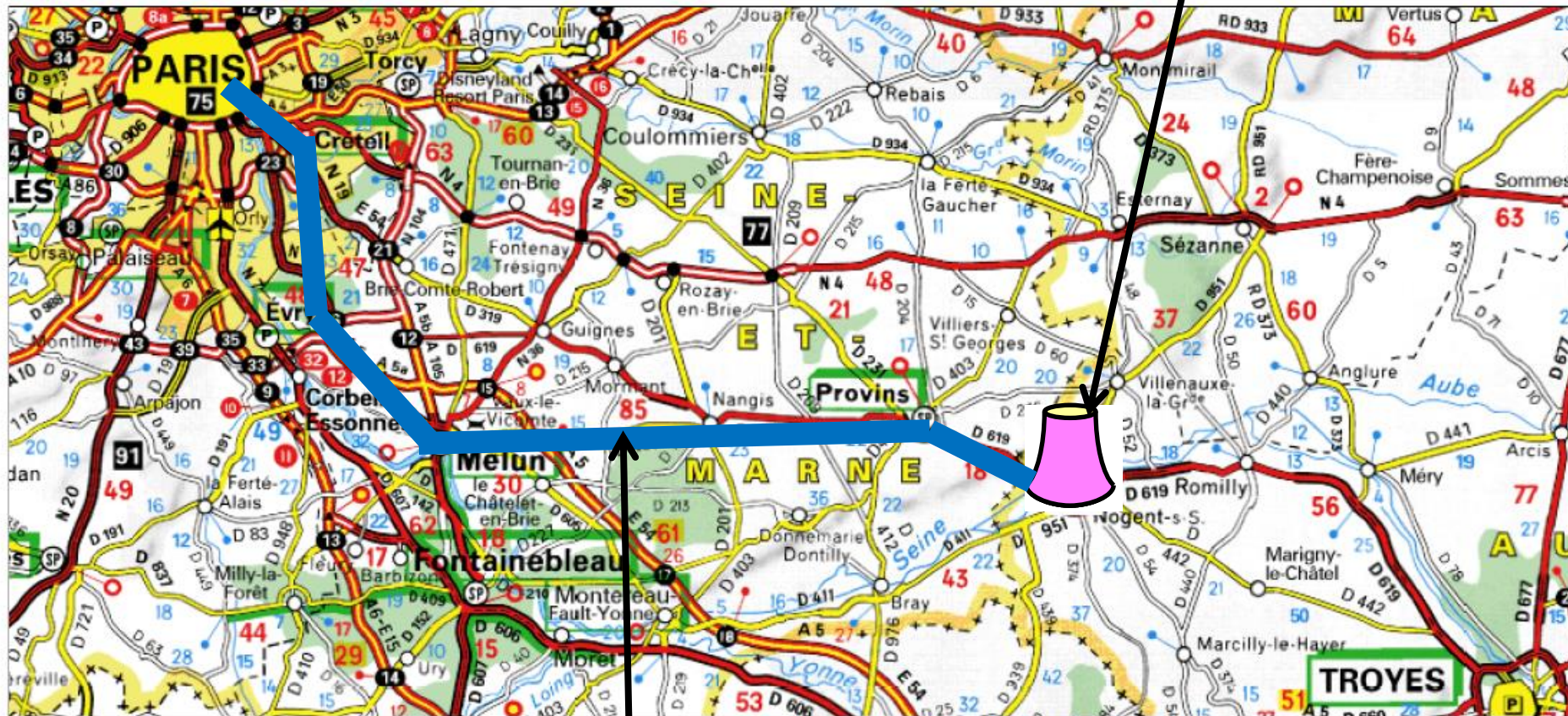


MODIFICATIONS DU CIRCUIT SECONDAIRE



UN EXEMPLE POSSIBLE

**Centrale de
Nogent-sur-Seine**



Ligne de transport principale

10 km

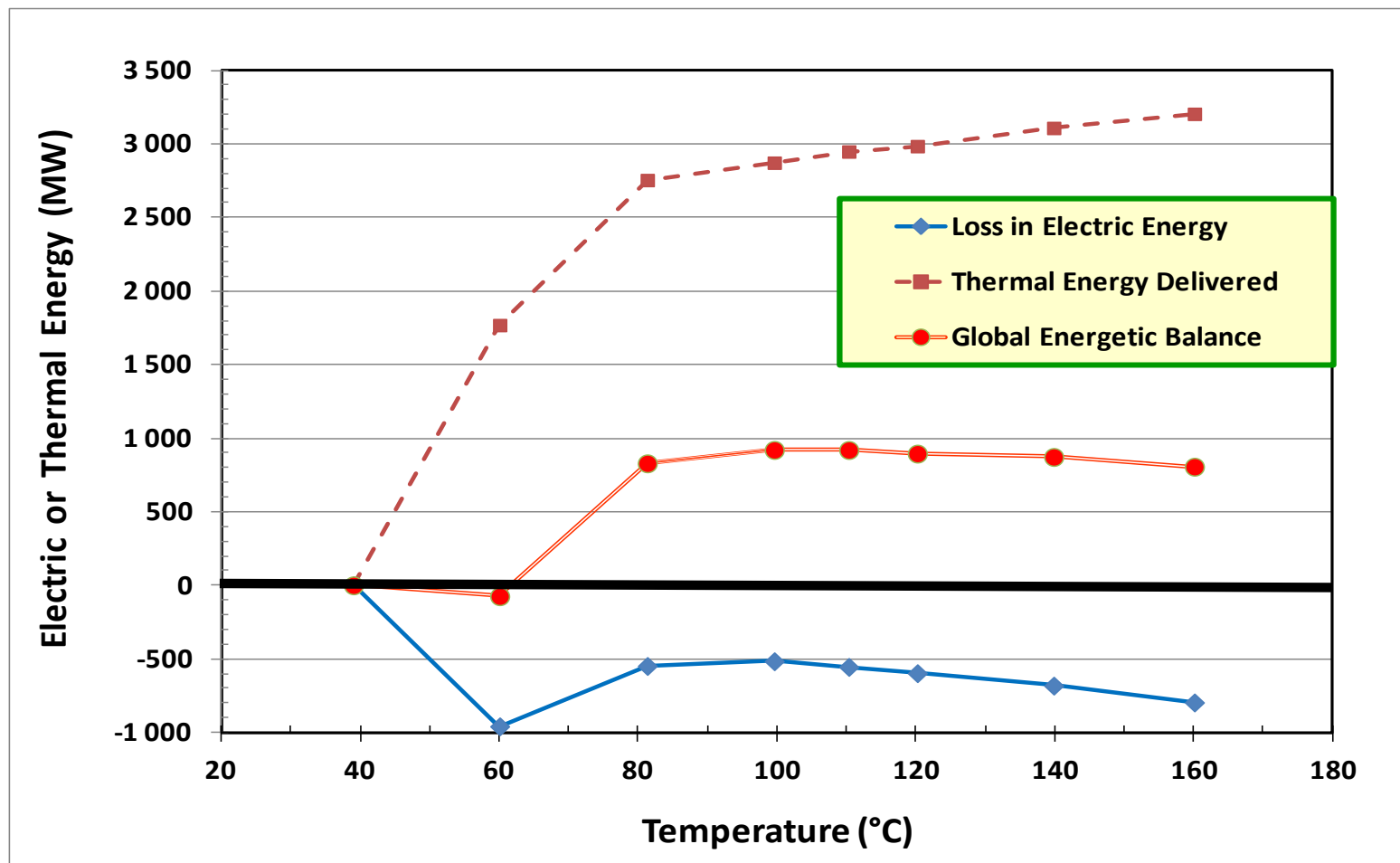
PREMIÈRE ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

➤ Deux paramètres dimensionnants :

1. La **température T** du caloporteur qui détermine le rendement électrique et les pertes thermiques
2. La **taille de la conduite Φ** qui détermine la puissance de pompage

➤ Hypothèses :

- ✓ Fonctionnement : 1/3 cogénération, 2/3 électrique pur
- ✓ Valeur d'1 MW thermique = 50% d'1 MW électrique
- ✓ 2 lignes de 1500 MW chacune



Gain énergétique équivalent de 920 MWe (soit +70%)

- Une ligne de transport de la chaleur de Nogent à Paris
 - ✓ Achat de la chaleur à la production
 - ✓ Vente de la chaleur aux réseaux

- Production annuelle de 9 TWh
 - Plus-value annuelle de +540 M€

- Perte de production électrique de -1.8 TWhe
 - Moins-value annuelle de -180 M€

Gain annuel de +360 M€

➤ Emissions actuelles de CO₂ du chauffage urbain de Paris (source CPCU)

- ✓ 60% combustibles fossiles (*gaz, charbon, fioul*)
- ✓ 40% incinération des déchets ménagers

→ Moyenne annuelle de 195 gCO₂/kWh

La récupération de la chaleur de la centrale de Nogent-sur-Seine éviterait l'émission de 1.7 Mtonnes/an de CO₂

Forte réduction des émissions de CO₂

- La **croissance future du nucléaire** dans le monde est une réalité qui se concrétise dans les pays émergents
- Les **fondamentaux du nucléaire** demeurent (indépendance, économie, pas d'émissions de gaz à effet de serre, ressources)
- La R&D au CEA se décline en **soutien au nucléaire existant** (sûreté, durée de vie, performances) et prépare le **nucléaire du futur** (4^{ème} génération), indispensable sur le long terme (ressources, déchets)
- Les scénarios énergétiques de l'ANCRE montrent que pour atteindre les objectifs du facteur 4 en 2050, il faut introduire des **« game changers »** comme le stockage d'énergie ou la **cogénération nucléaire**.