DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

I-tésé

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec

Laboratoire Génie Industriel
CentraleSupélec

CHAIRE EUROPEAN ELECTRICITY MARKETS
Fondation Paris-Dauphine

Séminaire de recherche CEEM

Énergie nucléaire et renouvelables variables dans des systèmes électriques décarbonés. Conflit ou complémentarité ?

Interactions entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables dans la transition énergétique en France

Adaptations du parc électrique vers plus de flexibilité

Camille Cany, le 28 mars 2018
camille.cany@centralesupelec.fr

1. CONTEXTE

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec

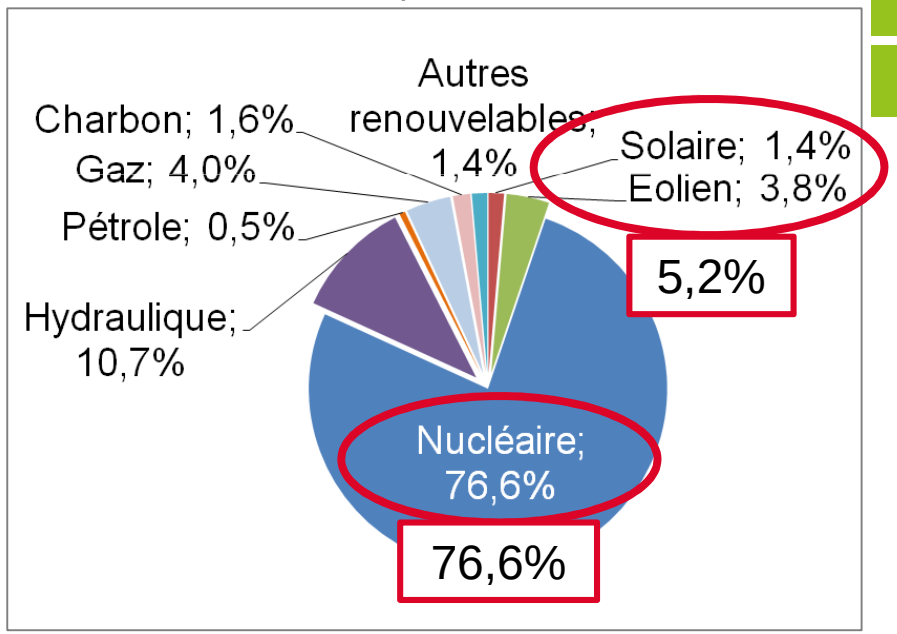
LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (1/3)

La LTECV : vers un mix électrique français bas-carbone diversifié

- Décroissance de la part du nucléaire
- Croissance de la part des énergies renouvelables, en particulier de l'éolien et du solaire

Production électrique en 2015

Production électrique totale : **540 TWhe**



Production électrique française (%)

Source : RTE, 2015

Capacités installées

GWe	Nucléaire	Eolien	Solaire
2015	63,1	10	6,5

Objectifs français *(PPE)* (X2) (X3)

GWe	Eolien	Solaire
2023	[21,8 – 26]	[18,2 – 20,2]

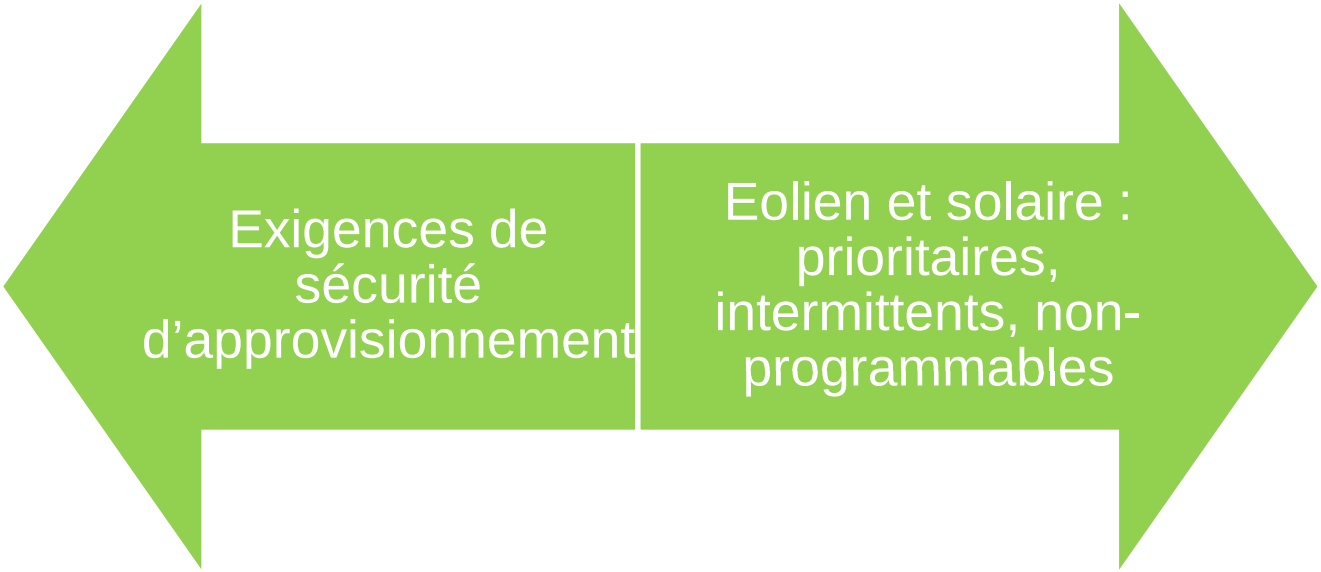
Nouvelle part dans la production

	Eolien	Solaire
2023	[8% – 9%]	[4% – 5%]

12% - 14%

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (2/3)

Les caractéristiques des énergies renouvelables variables : éolien et solaire

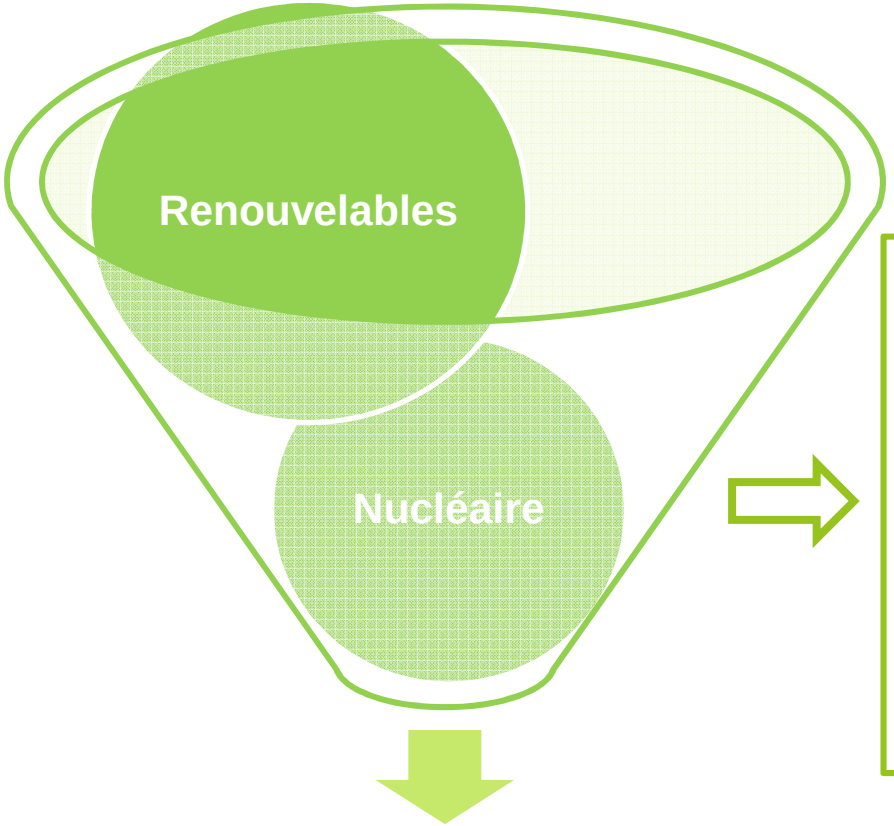


- **Niveau objectif de fiabilité :** 3h/an de défaillance (RTE)
- **Augmentation de la variabilité et de l'incertitude** de la demande résiduelle

⇨ **Nouveaux défis pour le système électrique dans le court et long terme**

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (3/3)

Energie nucléaire et énergies renouvelables variables



- Quelle compatibilité entre les sources de production bas-carbone ?
- Quel rôle le nucléaire peut-il jouer dans un contexte d'augmentation de la part des énergies renouvelables ?
- Quelles dynamiques de parc électrique favoriser ?

Mix électrique bas-carbone

2. PROBLÉMATIQUE ET APPROCHE

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec

CONTEXTE DE RECHERCHE

Revue de littérature

(Davis et al., 2013), (Hand et al., 2012), (Keppler and Cometto, 2012), (OECD/IEA, 2014), (Perrot et al., 2015)

Evaluer l'impact des enr sur :
le système résiduel (production et composition)

Moyens d'adaptations :
options opérationnelles

(Connolly et al., 2012), (Hirth, 2013), (Finn et al., 2012), (Lund et al., 2015), (Mikkola and Lund, 2016), (OECD/IEA, 2014), (Perrot et al., 2015), (Zakeri et al., 2015)

Evaluer l'impact des enr sur :
les profils de production

Intégration des énergies renouvelables variables

Moyens d'adaptations :
mécanismes de marché

(Huber et al., 2014), (Keppler and Cometto, 2012), (Perrot et al., 2015), (RTE, 2015), (Shaker et al., 2016), (Stappel et al., 2015), (Wagner, 2012)

(Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 2014), (Green and Léautier, 2015), (OECD/IEA, 2014), (Percebois and Pommeret, 2016)

- Une conclusion partagée : **à première vue, une incompatibilité économique à long terme entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables → vers plus d'émissions de CO_2**
- Mais **peu d'études traitent du mix français**, pourtant tout à fait singulier
  - Etudes d'impacts : (Keppler and Cometto, 2012), (RTE, 2015), (Stappel et al., 2015)
  - Construction et analyse de scénarios : (Groupe de travail du conseil national du débat sur la transition énergétique, 2013), (ADEME, 2016), (Krakowski et al., 2016), (Malischek and Trüby, 2016)

UNE APPROCHE INTERDISCIPLINAIRE

Comment :

- Augmenter la **flexibilité** du mix électrique
- Conserver un mix électrique **bas-carbone**
- Maîtriser le **coût** pour le mix électrique

Interactions entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables

AXE 1

Quelle flexibilité permise par le parc nucléaire français ?

AXE 2

Quels coûts avec un parc nucléaire français flexible ?

Adaptations du parc nucléaire aux énergies renouvelables variables

AXE 3

Flexibilité du parc nucléaire via de nouveaux usages, exemple de l'hydrogène

UN CHOIX DE SCÉNARIOS ET D'HYPOTHÈSES

- Basé sur des scénarios de transition pour le mix électrique français
  - L'ANCRE
  - L'ADEME (cas 50% éolien et solaire)
  - RTE (uniquement pour 2030)

- Choix d'un taux de pénétration indépendant pour l'éolien, le solaire et le nucléaire

	Part d'éolien et de solaire (% de l'énergie annuelle produite)	Capacité nucléaire (GWe)
2015	5	63 (80%)
2030	17	60 et 50 (72% et 65%)
	23	60 et 50 (65% et 60%)
2050	30	50 et 40 (55% et 45%)
	50	40 (35%)

- Base de comparaison : nucléaire en base à capacité abaissée

- A production totale égale à 540 TWhe (valeur moyenne actuelle incluant le solde exportateur (70 TWhe) et le pompage hydraulique (8 TWhe) ; valeur médiane à l'horizon 2050 (Groupe de travail n°2 du CNDTE, 2013))

3. MÉTHODOLOGIES ET RÉSULTATS

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec

Publications

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear power supply: going against the misconceptions. Evidence of nuclear flexibility from the French experience.* **Energy**, Volume 151, Mai 2018, 289-296 https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.064

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear contribution to the penetration of variable renewable energy sources in a French decarbonised power mix.* **Energy**, Volume 150, Mai 2018, 544-555, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.122

C. Cany, J-G. Devezeaux de Lavergne, C. Mansilla, G. Mathonnière, 2017. *Introduction accrue d'énergies renouvelables variables dans le système électrique : quelles conséquences sur le parc nucléaire ? Quelles marges de manœuvre ?* **Revue Générale du Nucléaire,** Numéro 1, Janvier-Février 2017, Pages 36-40.

AXE 1

QUELLE FLEXIBILITÉ PERMISE PAR LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS ?

1. ETAT DES LIEUX DE LA FLEXIBILITÉ ACTUELLE DU PARC NUCLÉAIRE
2. ANALYSE PROSPECTIVE DE LA PARTICIPATION À LA FLEXIBILITÉ PERMISE PAR LE PARC NUCLÉAIRE

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec

Publications

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear power supply: going against the misconceptions. Evidence of nuclear flexibility from the French experience.* **Energy**, Volume 151, Mai 2018, 289-296 https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.064

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear contribution to the penetration of variable renewable energy sources in a French decarbonised power mix.* **Energy**, Volume 150, Mai 2018, 544-555, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.122

C. Cany, J-G. Devezeaux de Lavergne, C. Mansilla, G. Mathonnière, 2017. *Introduction accrue d'énergies renouvelables variables dans le système électrique : quelles conséquences sur le parc nucléaire ? Quelles marges de manœuvre ?* **Revue Générale du Nucléaire,** Numéro 1, Janvier-Février 2017, Pages 36-40.

AXE 1

QUELLE FLEXIBILITÉ PERMISE PAR LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS ?

1. **ETAT DES LIEUX DE LA FLEXIBILITÉ ACTUELLE DU PARC NUCLÉAIRE**
2. ANALYSE PROSPECTIVE DE LA PARTICIPATION À LA FLEXIBILITÉ PERMISE PAR LE PARC NUCLÉAIRE

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation
CentraleSupélec

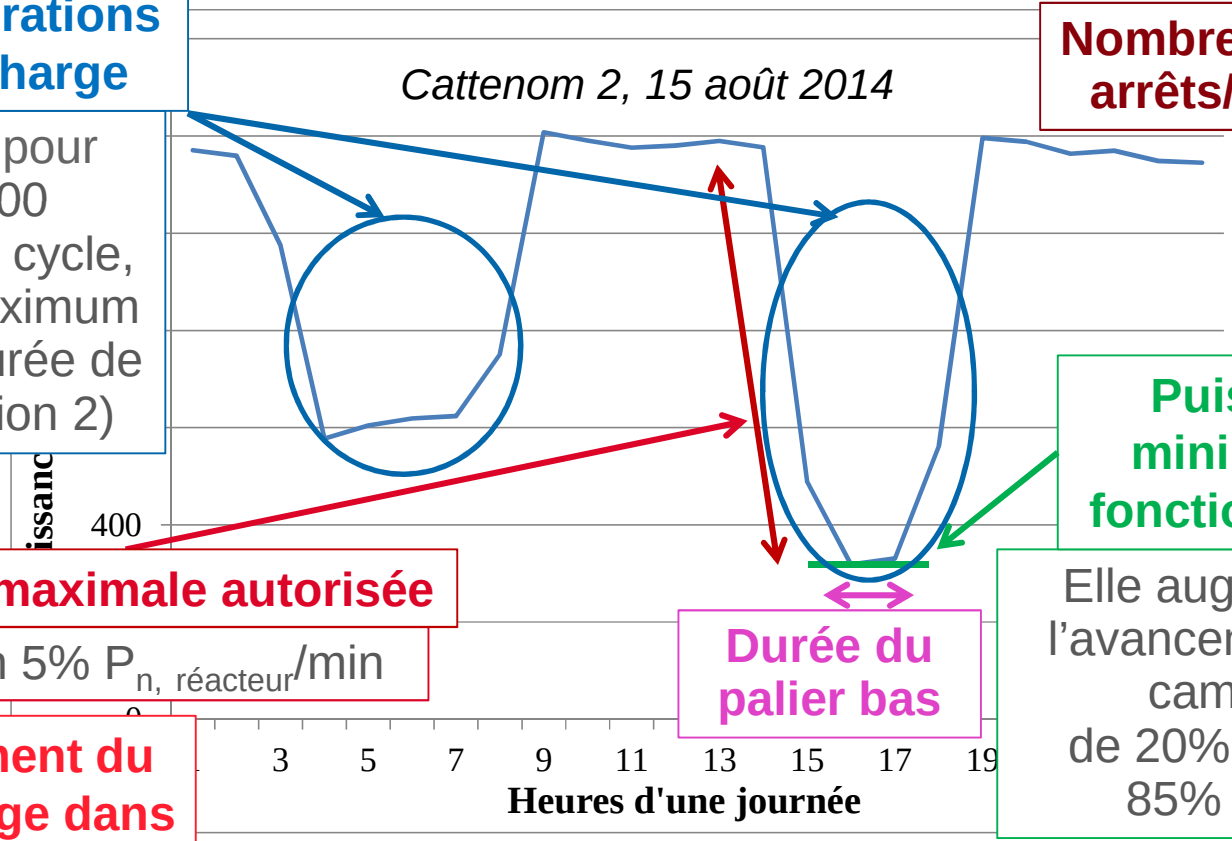
LA THÉORIE

- En fonction des contraintes physiques d'un réacteur nucléaire, son exploitation permet de :
  - Maintenir les marges de sûreté
  - Respecter les règles d'autorisation de rejets radioactifs
- Ces contraintes limitent les capacités de manœuvrabilité des réacteurs

Nombre d'opérations de suivi de charge

REP conçu pour réaliser 200 variations par cycle, 20 000 au maximum pendant sa durée de vie (Génération 2)

Nombre et durée des arrêts/démarrages



Puissance minimale de fonctionnement

Elle augmente avec l'avancement dans la campagne : de 20% $P_{n,\ réacteur}$ à 85% $P_{n,\ réacteur}$

Rampe maximale autorisée

Environ 5% $P_{n,\ réacteur}$/min

Durée du palier bas

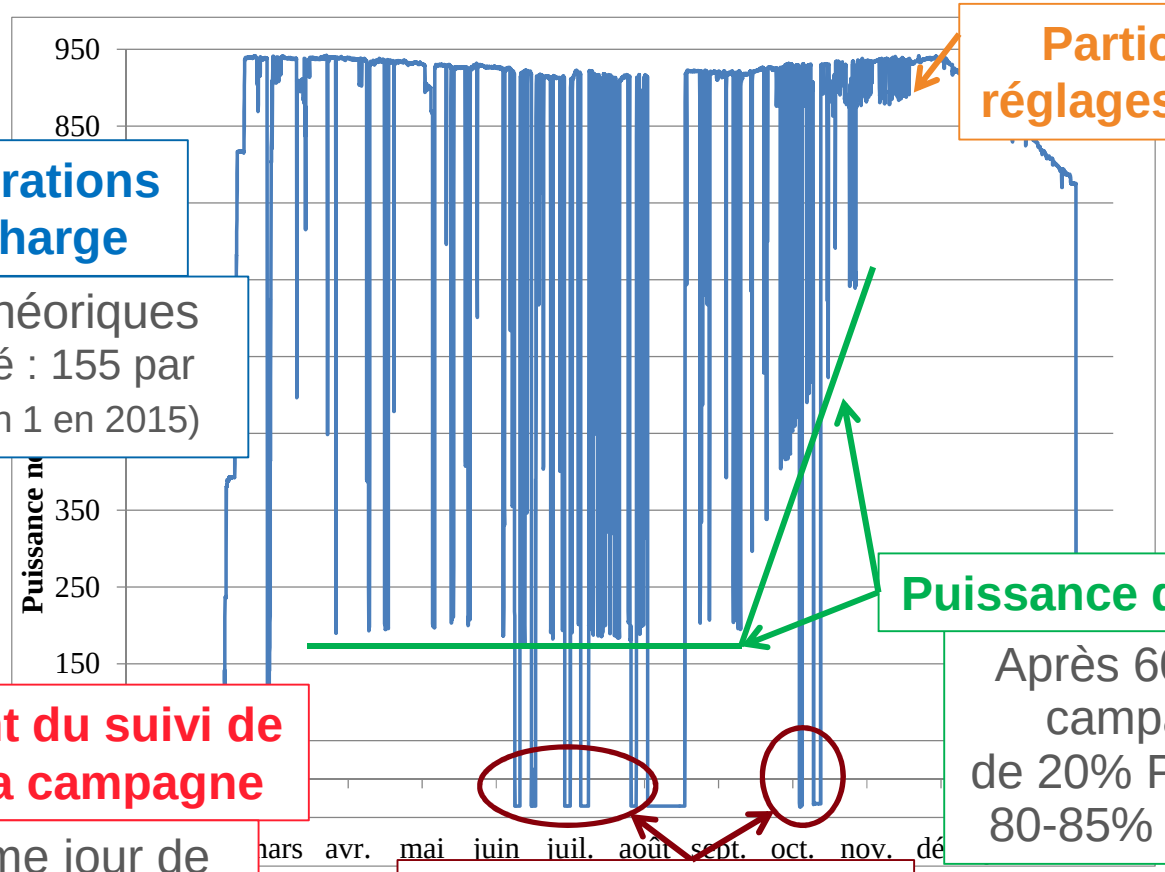
Positionnement du suivi de charge dans la campagne

Base de données de RTE

LA PRATIQUE

Au travers d'un exemple

Profil annuel de Blayais 2 (CPY) de Janvier 2014 à Février 2015



Participation aux réglages de fréquence

Nombre d'opérations de suivi de charge

Loin des limites théoriques
Maximum observé : 155 par campagne (Golfech 1 en 2015)

Puissance des paliers bas

Après 60% de la campagne :
de 20% $P_{n,\ réacteur}$ à 80-85% $P_{n,\ réacteur}$

Positionnement du suivi de charge dans la campagne

Entre le dixième jour de fonctionnement et 70-90% de la campagne

Nombre et durée des arrêts/démarrages

1 arrêt/réacteur par an en moyenne

Base de données de RTE

DE LA THÉORIE À LA PRATIQUE : ENSEIGNEMENTS

Participation du parc nucléaire à la flexibilité

- Le parc a un potentiel de flexibilité au niveau de la :
  - Dynamique de sollicitation du parc
    (la part de réacteurs participant au suivi de charge a augmenté de 20% à 40% entre 2012 et 2015)
  - Sollicitation de chacun des réacteurs

⇨ **Le potentiel de flexibilité du parc nucléaire pourrait être davantage exploité**

Choix de modélisation pour l'analyse prospective

- Deux caractéristiques sont observées pour l'ensemble des réacteurs :
  - L'augmentation linéaire de la $P_{min,\ réacteur}$ du réacteur entre 60% à 90% de la campagne
  - La capacité de participation de l'ensemble des réacteurs du parc aux arrêts/démarrages pour suivi de charge

⇨ **L'analyse prospective est réalisée à l'échelle du parc en choisissant les indicateurs de puissance basse et d'arrêts/démarrages pour caractériser la flexibilité demandée à l'échelle des réacteurs**

Publications

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear power supply: going against the misconceptions. Evidence of nuclear flexibility from the French experience.* **Energy**, Volume 151, Mai 2018, 289-296 https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.064

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear contribution to the penetration of variable renewable energy sources in a French decarbonised power mix.* **Energy**, Volume 150, Mai 2018, 544-555, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.122

C. Cany, J-G. Devezeaux de Lavergne, C. Mansilla, G. Mathonnière, 2017. *Introduction accrue d'énergies renouvelables variables dans le système électrique : quelles conséquences sur le parc nucléaire ? Quelles marges de manœuvre ?* **Revue Générale du Nucléaire,** Numéro 1, Janvier-Février 2017, Pages 36-40.

AXE 1

QUELLE FLEXIBILITÉ PERMISE PAR LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS ?

1. ETAT DES LIEUX DE LA FLEXIBILITÉ ACTUELLE DU PARC NUCLÉAIRE
2. **ANALYSE PROSPECTIVE DE LA PARTICIPATION À LA FLEXIBILITÉ PERMISE PAR LE PARC NUCLÉAIRE**

université PARIS-SACLAY

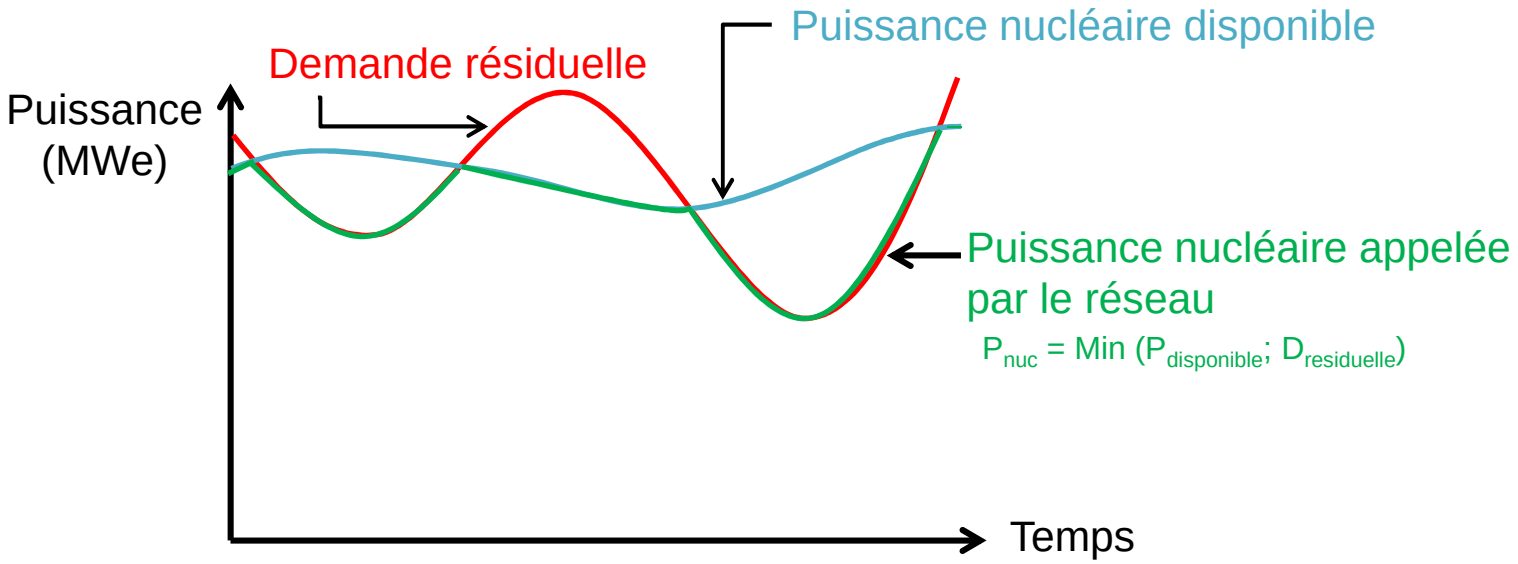
ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec

MÉTHODOLOGIE : PROFIL NUCLÉAIRE PROSPECTIF (1/3)

Modèle « Profil nuc. »

- Objectif
  - Extrapolation des profils de puissance prospectifs



- Hypothèses (Base de données de RTE, année 2014)
  - Demande résiduelle = (Production horaire totale) – (Production horaire extrapolée des technologies aux coûts variables faibles (éolien + solaire + hydraulique fil de l'eau + renouvelables thermiques))
  - Le nucléaire est appelé en premier à sa puissance maximale disponible
  - Les productions de l'hydraulique fil de l'eau et des renouvelables thermiques restent invariantes
  - Le profil de production totale reste identique à celui de l'année de simulation

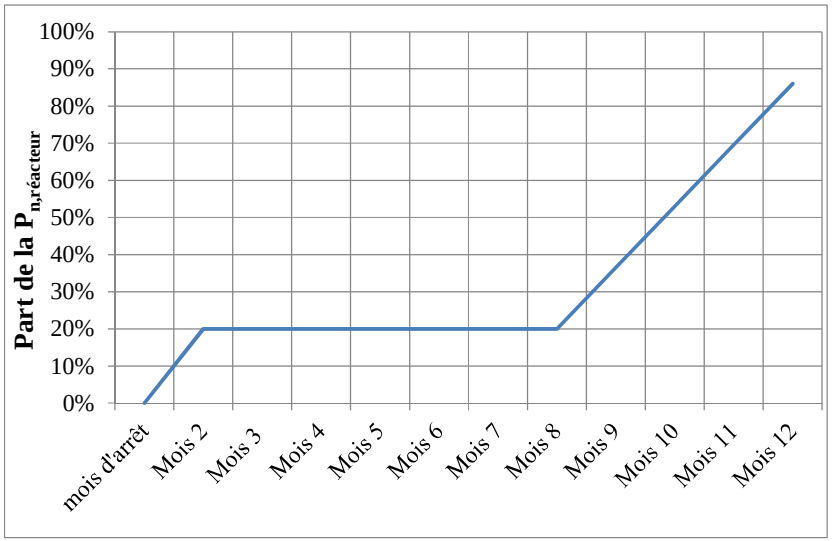
MÉTHODOLOGIE : PUISSANCES BASSES EXTRÊMES (2/3)

Modèle « P_{nuc} basse »

- Objectif
  - Construire le profil annuel de la $P_{min,\ parc}$ (échelle parc) en fonction du profil de la $P_{min,\ réacteur}$ (échelle réacteur)

Echelle réacteur

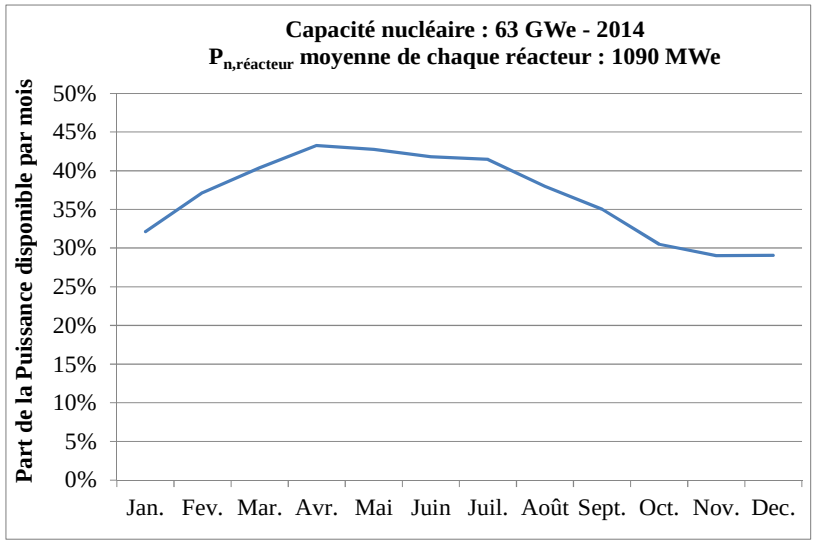
$P_{min,\ réacteur}$ avec l'avancement dans la campagne



Durée des campagnes : un an

Echelle parc

$P_{min,\ parc}$ par rapport à la puissance disponible



En accord avec : EDF, 2013, Load Following, EDF Experience Feedback. RTE, 2012-2015, Base de données.

MÉTHODOLOGIE : ARRÊTS/DÉMARRAGES (3/3)

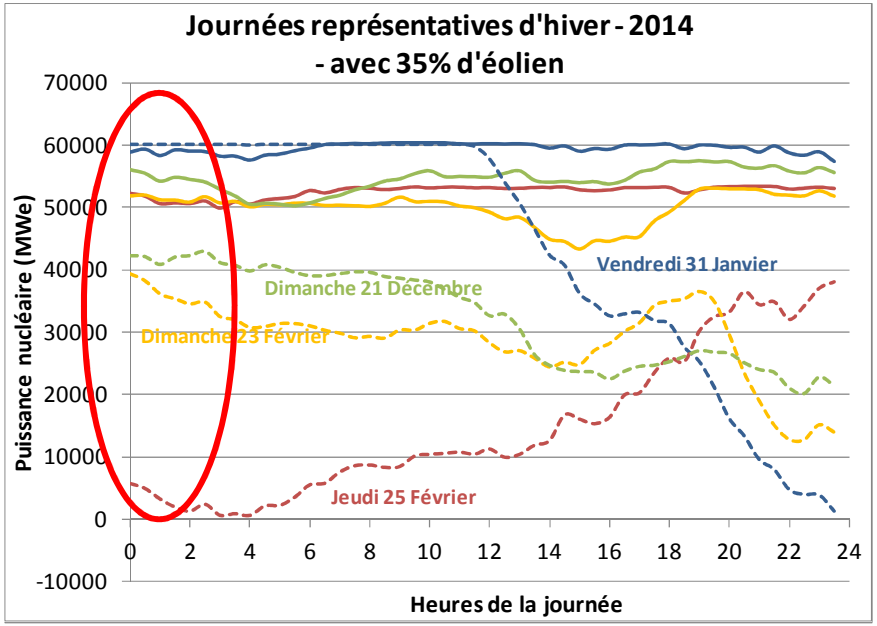
Modèle « Arrêts/démarrages »

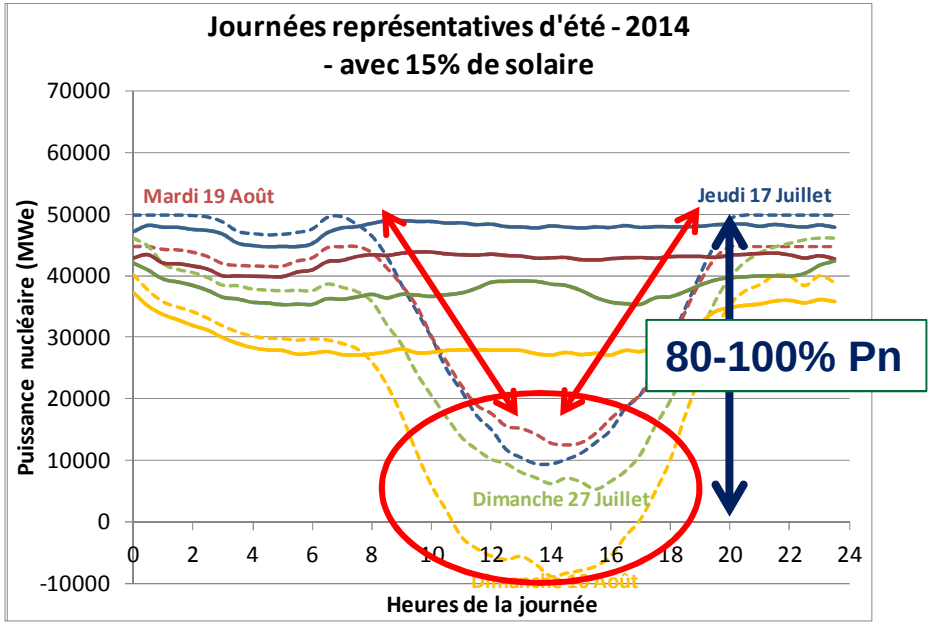
- Objectif
  - Quantifier le nombre minimal d'arrêts de réacteurs pour satisfaire le profil de production

- Modélisation simplifiée du fonctionnement du parc
  - Un seul type de réacteur (puissance nominale moyenne du parc de l'année considérée)
  - Trois états possibles : 100% $P_{n,\ réacteur}$, $P_{min,\ réacteur}$, seul un réacteur peut être à puissance intermédiaire (P_{inter})
  - Liée au modèle « P_{nuc} basse » : la $P_{min,\ réacteur}$ du réacteur type disponible est modélisée à partir de la $P_{min,\ parc}$ calculée au cours de l'année avec le modèle « P_{nuc} basse »
  - La production favorise la fiabilité du système électrique (préférence pour les surplus)

Copyright : arcady31

CONSÉQUENCES D'UN PROFIL NUCLÉAIRE LIÉ À L'ÉOLIEN ET AU SOLAIRE





Un profil nucléaire dépendant :

- ➕ **Productions éoliennes et solaires**
- ➖ **Consommation française d'électricité**

Augmentation de la fréquence des creux de puissance très significatifs

UN EXEMPLE DE VARIATION SIGNIFICATIVE DE PUISSANCE : ARRÊTS/DÉMARRAGES

Estimation du nombre minimum d'arrêts de réacteurs par an

(Modèle « Arrêts/démarrages »)

	2030			2050		
Nucléaire	63 GWe	60 GWe	60 GWe	40 GWe	50 GWe	40 GWe
Eolien et solaire	5%	17%	23%	30%	30%	50%
Arrêts (/an)	0	~ 40	~ 80	~ 420	~ 530	~ 3600
Arrêts par réacteur (/an)	0	<1	4	17	17	150

Concentrés au printemps et en été

Toute l'année

ENSEIGNEMENTS

- **Besoin d'adapter la gestion des réacteurs du parc nucléaire pour répondre à des variations de puissance significatives plus fréquentes**

- **Dans le cadre du modèle étudié, le solaire présente plus de défis que l'éolien**
  - La présence du solaire dicte le rythme des variations significatives de puissance du parc nucléaire (rampes, besoins et durée des arrêts à la mi-journée)
  - Les variations significatives de puissance pourraient s'avérer très exigeantes pour l'opérateur nucléaire (plus que l'augmentation des sollicitations)

- **A partir d'un taux important d'éolien et de solaire, la fréquence des baisses significatives de puissance s'amplifie fortement même si la capacité nucléaire est réduite**
  - Augmenter la part d'éolien et de solaire représente un défi pour le parc nucléaire et fait croître son besoin en flexibilité
  - Les besoins complémentaires de flexibilité devront être portés par l'ensemble des leviers disponibles du côté de l'offre et de la demande

⇨ **Trouver des solutions pour limiter le nombre de manœuvres et rendre le parc nucléaire moins coûteux avec un fonctionnement flexible, c'est éviter l'investissement dans des centrales fossiles flexibles**

Publication

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière , T. Duquesnoy, A. Baschwitz, 2016. *Nuclear and non-dispatchable renewables: two compatible supply options? The case of the French power mix.* **Energy Policy**, Volume 95, Août 2016, 135-146. doi:10.1016/j.enpol.2016.04.037

AXE 2

QUELS COÛTS AVEC UN PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS FLEXIBLE ?

1. MÉTHODOLOGIE
2. COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE
3. LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE ET RENDRE LE PARC NUCLÉAIRE COMPÉTITIF AVEC UN MODE DE FONCTIONNEMENT FLEXIBLE

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation
CentraleSupélec

Publication

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière , T. Duquesnoy, A. Baschwitz, 2016. *Nuclear and non-dispatchable renewables: two compatible supply options? The case of the French power mix.* **Energy Policy**, Volume 95, Août 2016, 135-146. doi:10.1016/j.enpol.2016.04.037

AXE 2

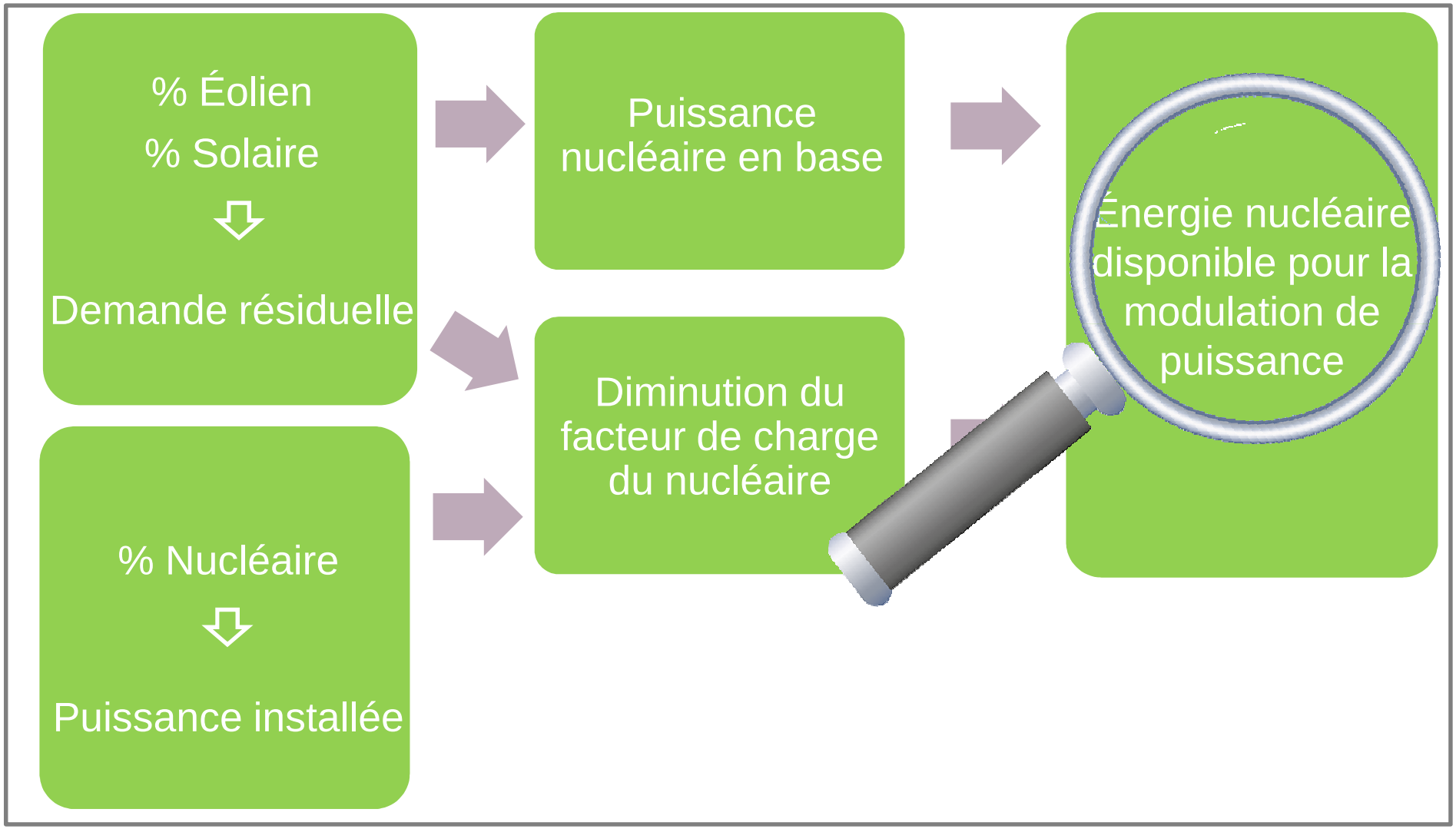
QUELS COÛTS AVEC UN PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS FLEXIBLE ?

1. **MÉTHODOLOGIE**
2. COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE
3. LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE ET RENDRE LE PARC NUCLÉAIRE COMPÉTITIF AVEC UN MODE DE FONCTIONNEMENT FLEXIBLE

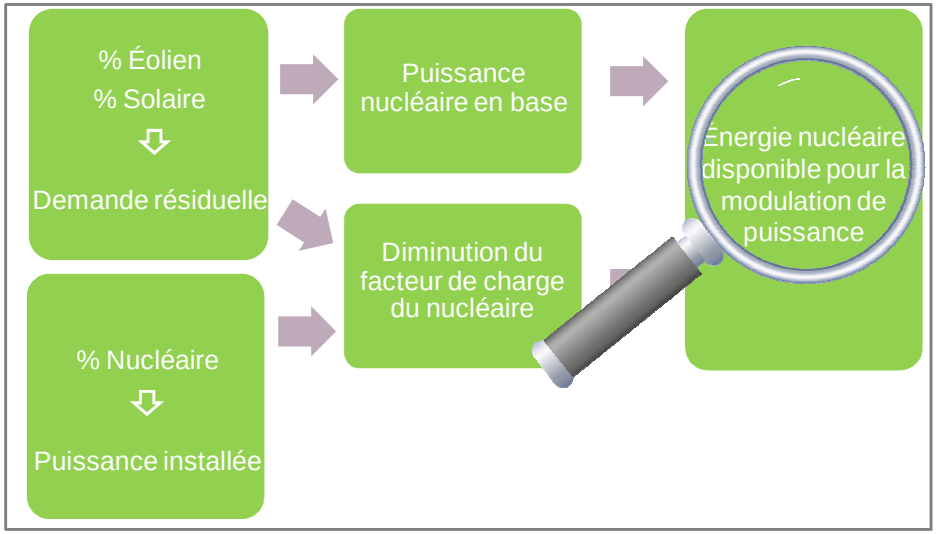
université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation
CentraleSupélec

MÉTHODOLOGIE (1/10)

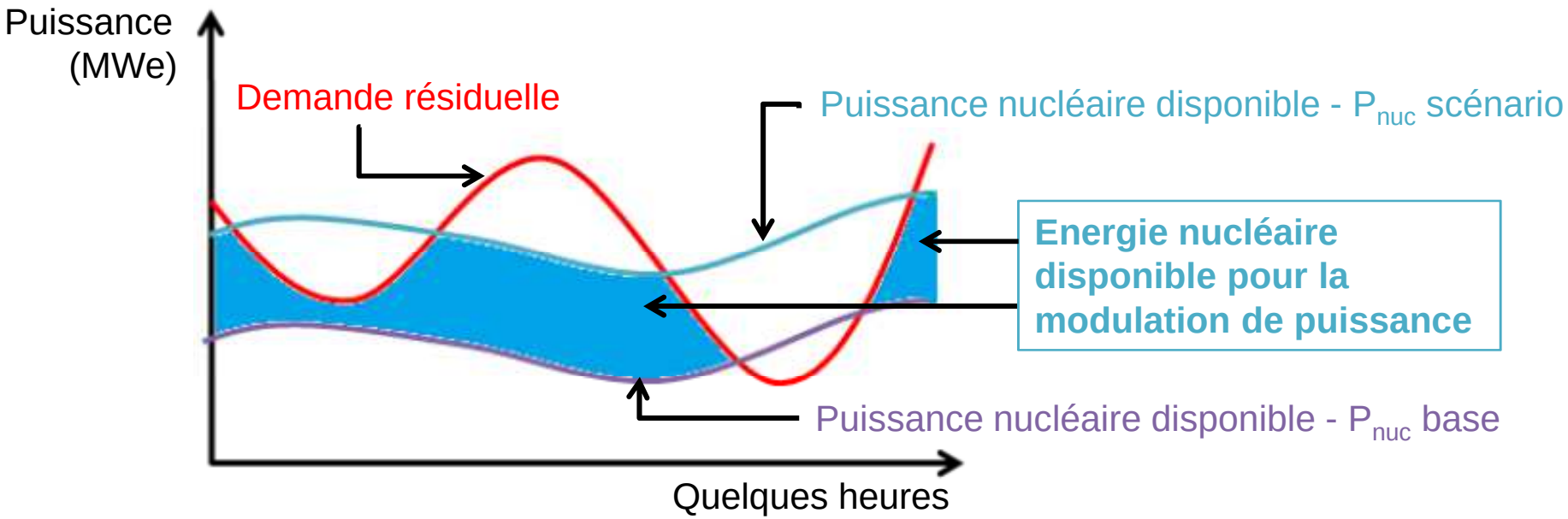
Énergie nucléaire annuelle produite



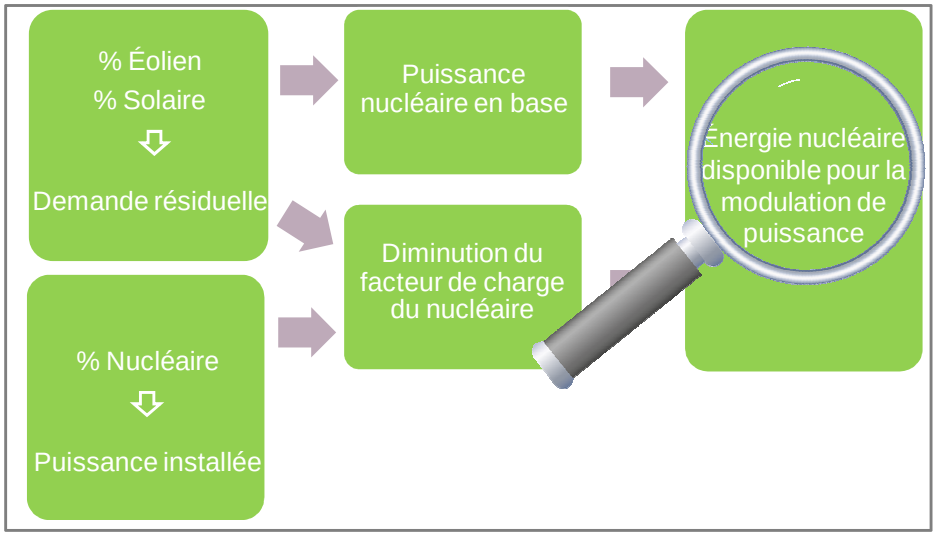
MÉTHODOLOGIE (2/10)



Approche de court terme

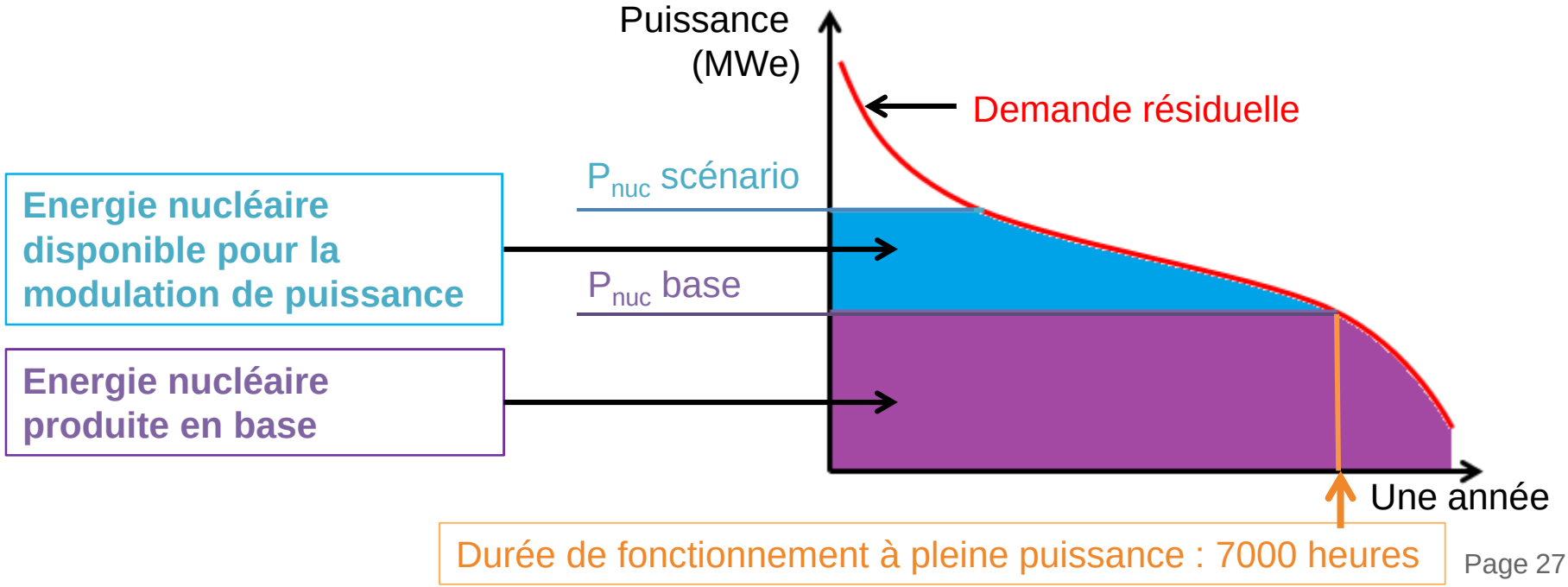


MÉTHODOLOGIE (3/10)



Approche de long terme

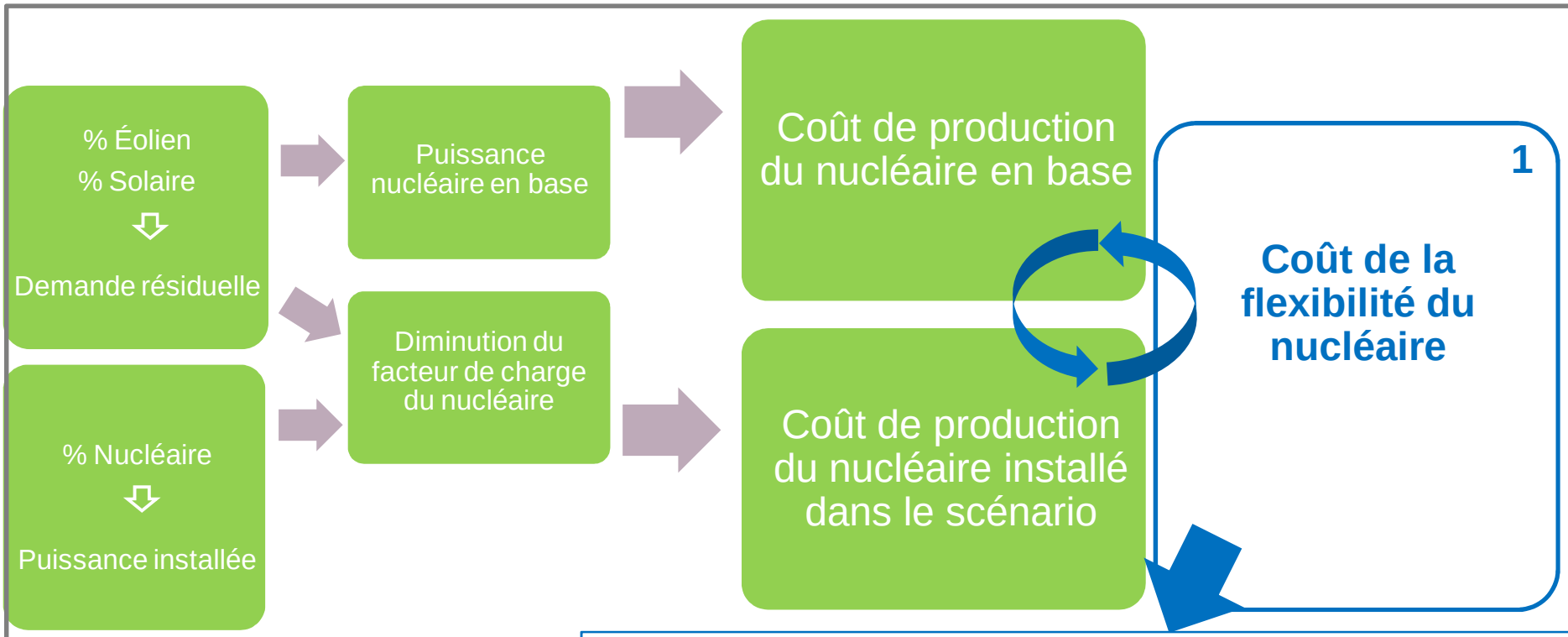
- P_{nuc} base déterminée selon le facteur de disponibilité historique du parc nucléaire français (IAEA, 2015), indépendamment du reste du mix électrique



Durée de fonctionnement à pleine puissance : 7000 heures

MÉTHODOLOGIE (5/10)

Coût de production actualisé du nucléaire



$$Coût_{nuc,\,flex} = \frac{Coût_{nuc,\,scénario} - Coût_{nuc,\,base}}{E_{mod}}$$

$Coût_{nuc,\,flex}$: coût de la flexibilité du nucléaire (€/MWhe)
$Coût_{nuc,\,scénario}$: coût annuel de production du parc nucléaire du scénario étudié (€)
$Coût_{nuc,\,base}$: coût annuel de production du parc nucléaire fonctionnant en base (€)
E_{mod} : Energie disponible pour la modulation de puissance (MWhe)

MÉTHODOLOGIE (6/10)

Coût de production actualisé du nucléaire

Hypothèses

Issues du rapport de la Cour des comptes sur le coût du nucléaire (Cour des comptes, 2014), (Les Echos, 2015).

- **Annuités d'investissement des REP (gen. 2) :** coût d'investissement du parc historique incluant les intérêts intercalaires
- **Courbe d'apprentissage pour le coût d'investissement de l'EPR™** depuis la première unité construite à la onzième, puis coût constant
- **Investissements de maintenance « normale » et de remplacement de gros composants** : 45 milliards d'euros entre 2011 et 2033.
- **Investissements de maintenance pour la prolongation de la durée de vie** : 45 milliards d'euros entre 2011 et 2033

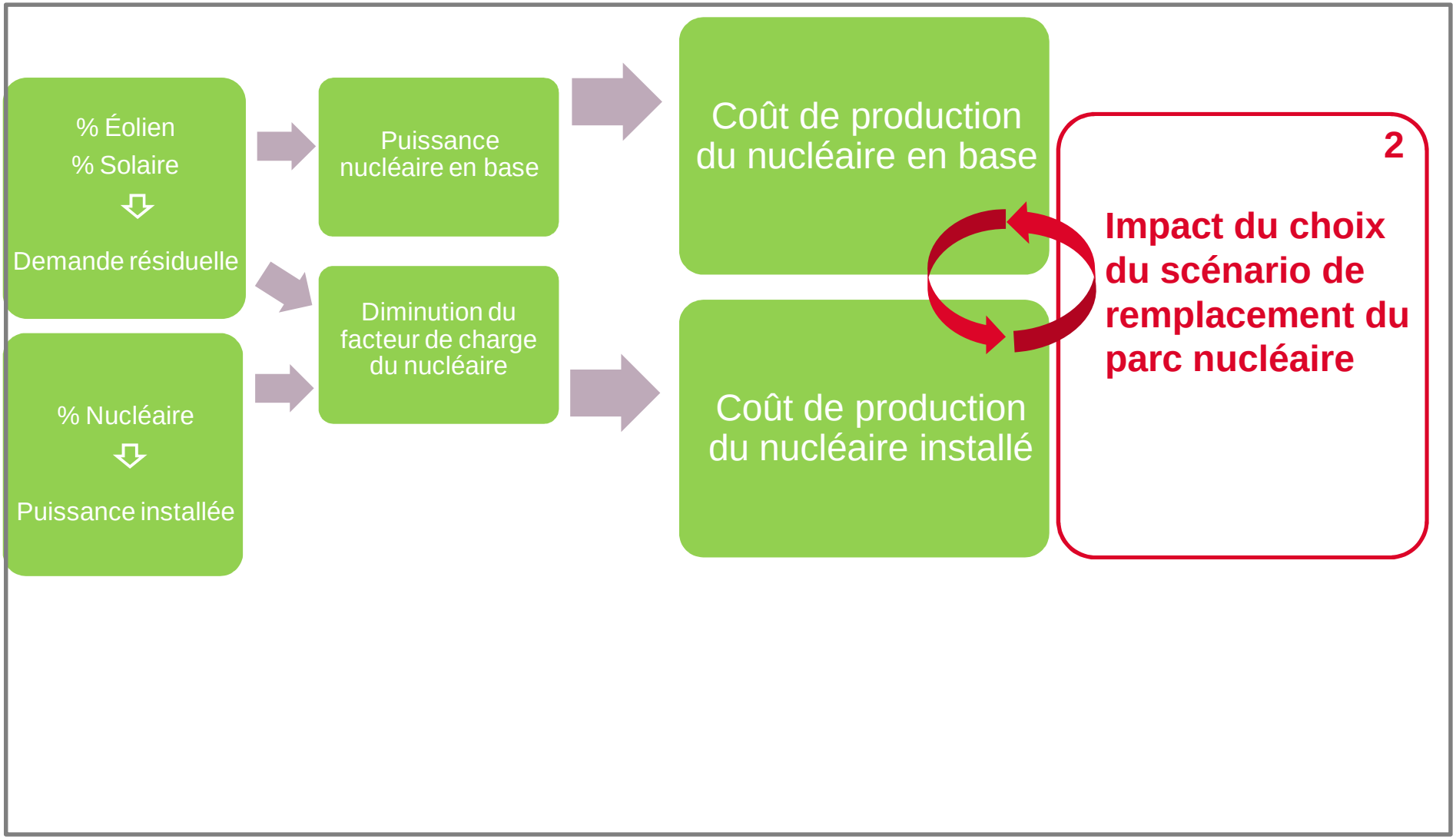
- Taux d'actualisation : 8%
- Durée de vie économique : REP (gen. 2) : 40 ans ; EPR™ : 60 ans

Méthode du coût courant économique

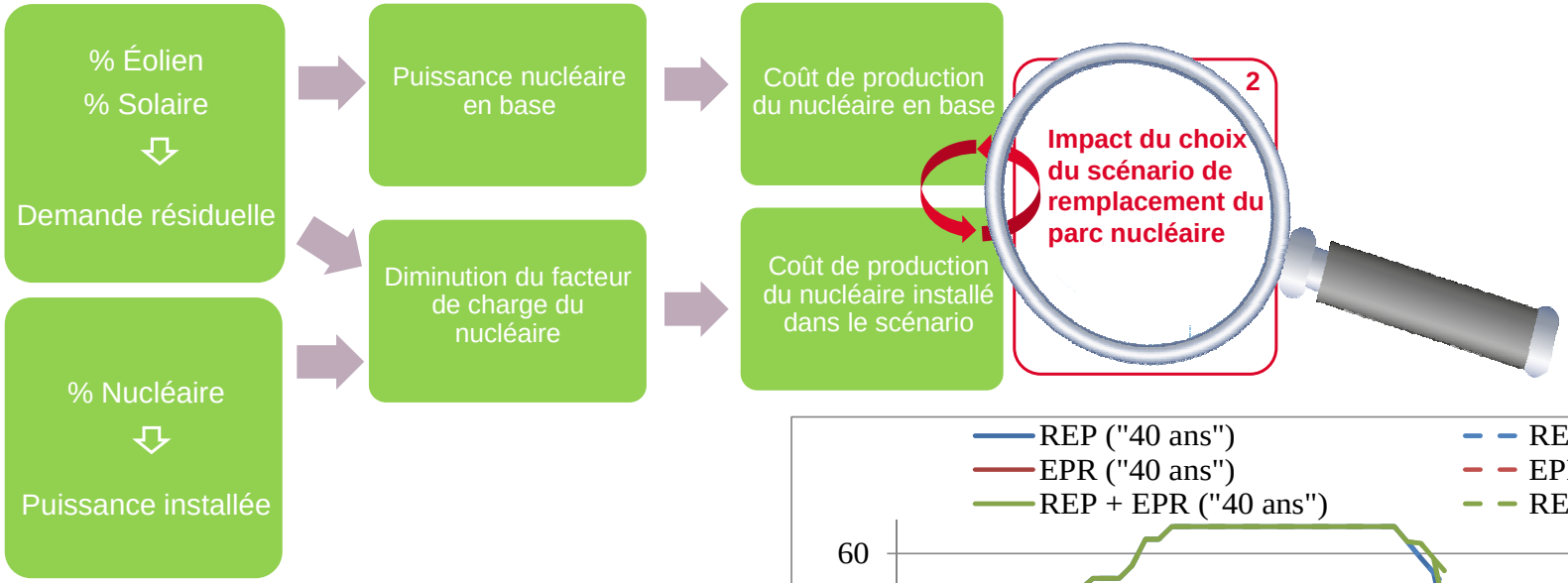
- Annuité d'investissement (incluant les intérêts) et provisions pour démantèlement prises en compte pendant la durée de vie économique, à partir de cette date, ces composantes de coûts sont nulles

MÉTHODOLOGIE (7/10)

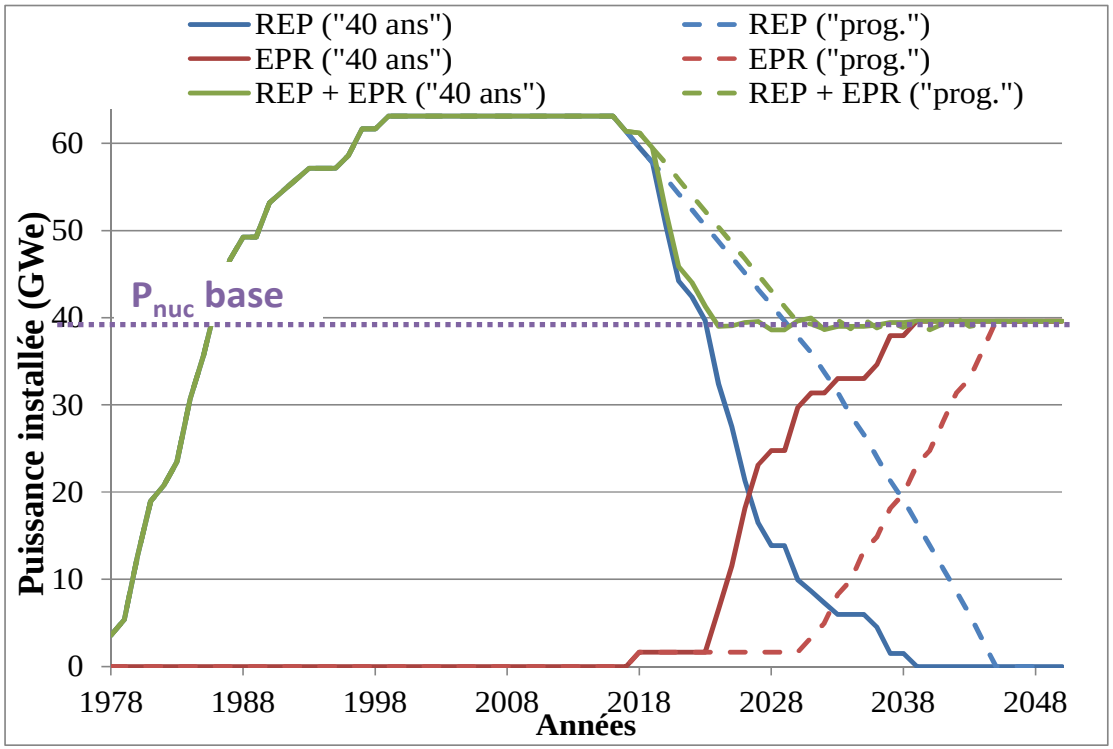
Des leviers pour réduire le coût de la flexibilité du nucléaire



MÉTHODOLOGIE (8/10)

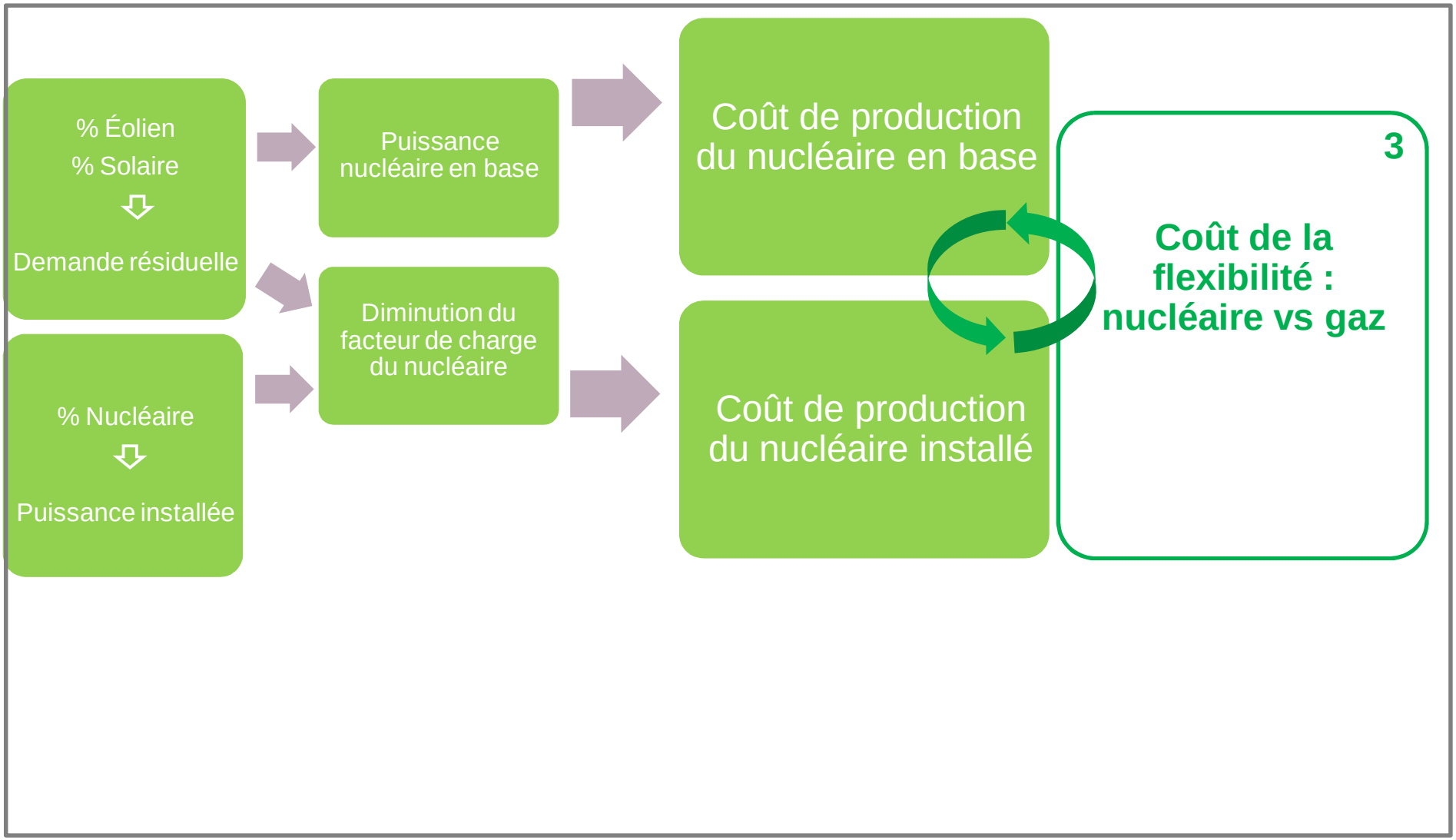


- 2 scénarios
  - 40 ans de fonctionnement (scénario « 40 ans »)
  - Remplacement progressif : 2GWe par an depuis 2017 (scénario « prog »)



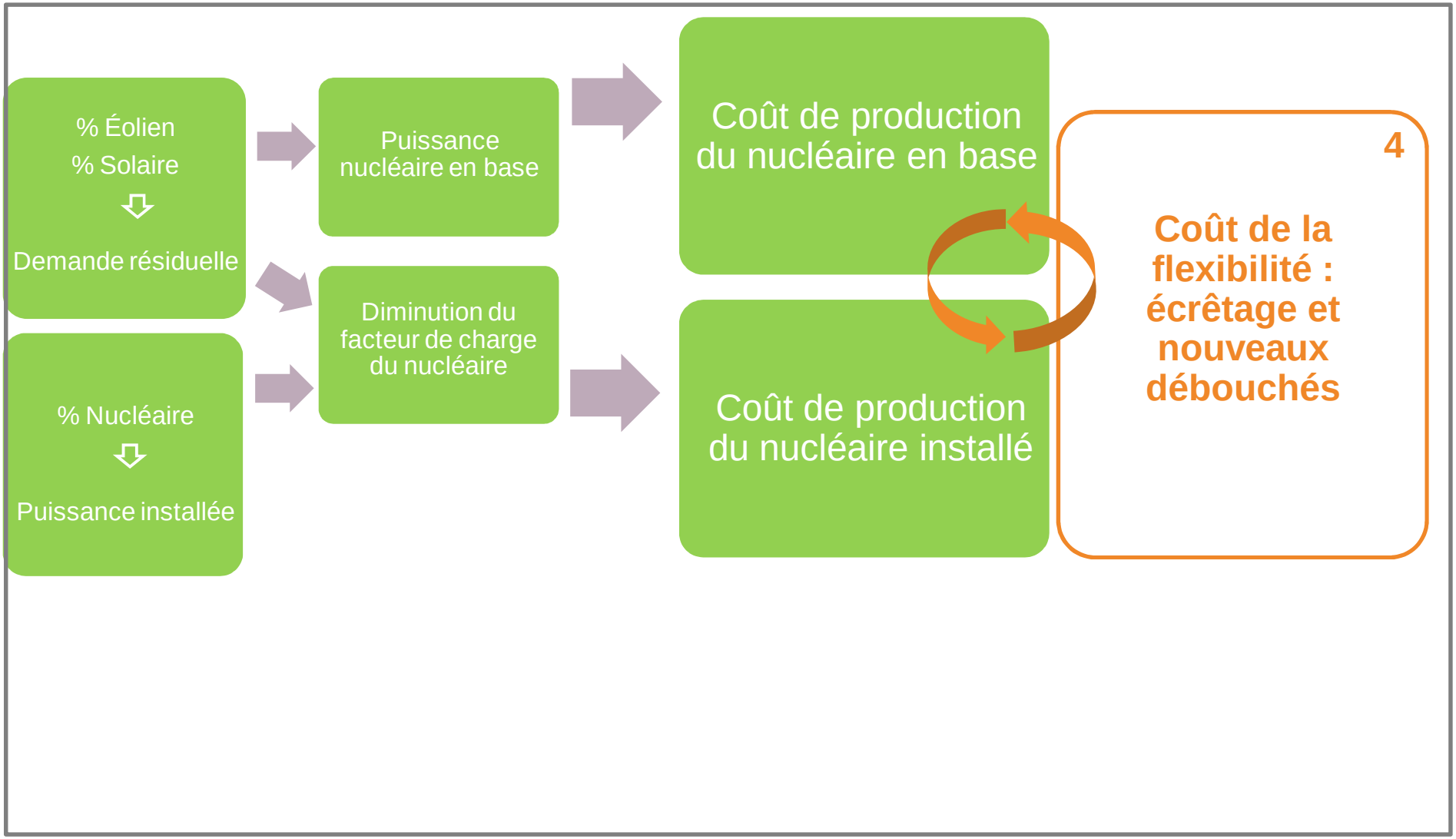
MÉTHODOLOGIE (9/10)

Des leviers pour rendre le nucléaire flexible compétitif



MÉTHODOLOGIE (10/10)

Des leviers pour réduire le coût de la flexibilité du nucléaire



Publication

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière , T. Duquesnoy, A. Baschwitz, 2016. *Nuclear and non-dispatchable renewables: two compatible supply options? The case of the French power mix.* **Energy Policy**, Volume 95, Août 2016, 135-146. doi:10.1016/j.enpol.2016.04.037

AXE 2

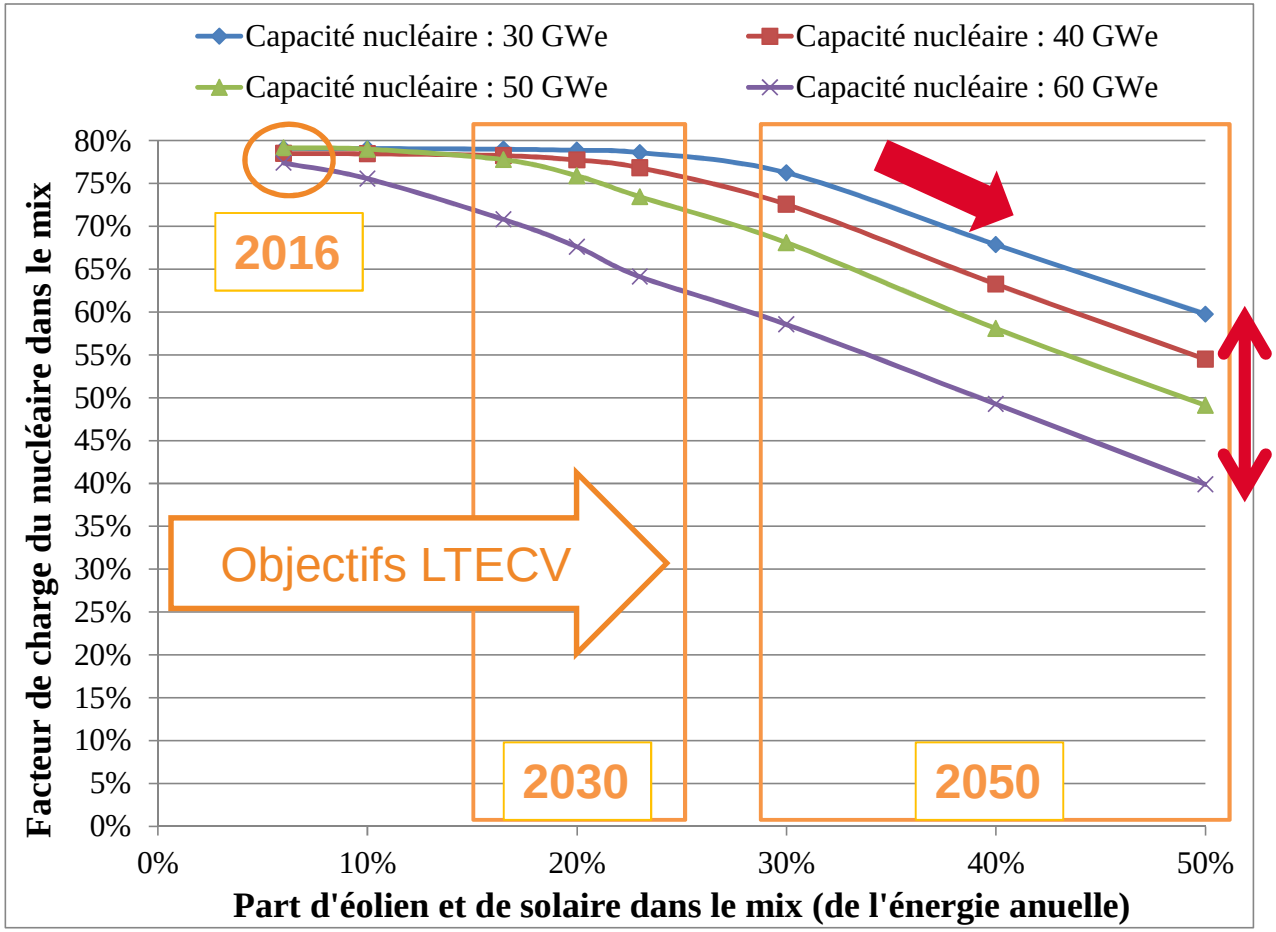
QUELS COÛTS AVEC UN PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS FLEXIBLE ?

1. MÉTHODOLOGIE
2. **COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE**
3. LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE ET RENDRE LE PARC NUCLÉAIRE COMPÉTITIF AVEC UN MODE DE FONCTIONNEMENT FLEXIBLE

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation
CentraleSupélec

IMPACT SUR LE FACTEUR DE CHARGE DU PARC NUCLÉAIRE

Sensibilité du facteur de charge du parc nucléaire au taux d'éolien et de solaire



Pour 50% d'éolien et de solaire, facteur de charge : de 40% à 60%

Le facteur de charge a une influence directe sur le coût de production du nucléaire

COMMENT ÉVITER UNE AUGMENTATION MÉCANIQUE DES ÉMISSIONS DE CO_2 ?

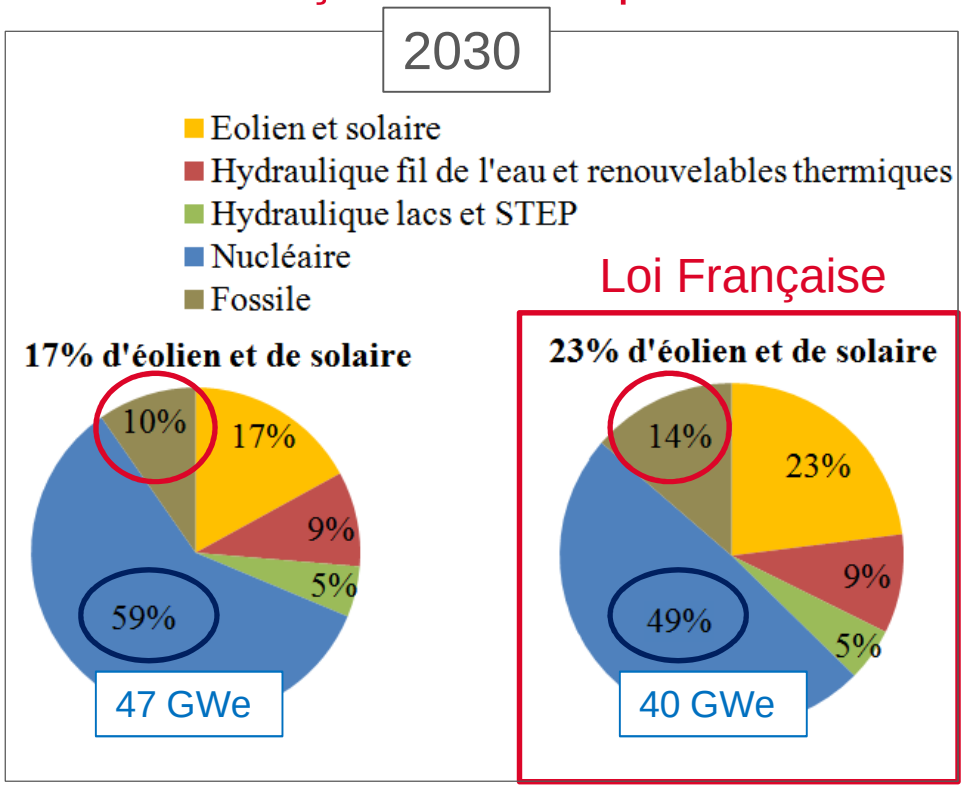
Pourquoi ?

↓ Capacité nucléaire

→ Demande d'électricité non totalement satisfaite

→ ↑ Centrales fossiles, économiquement adaptées → ↑ CO_2

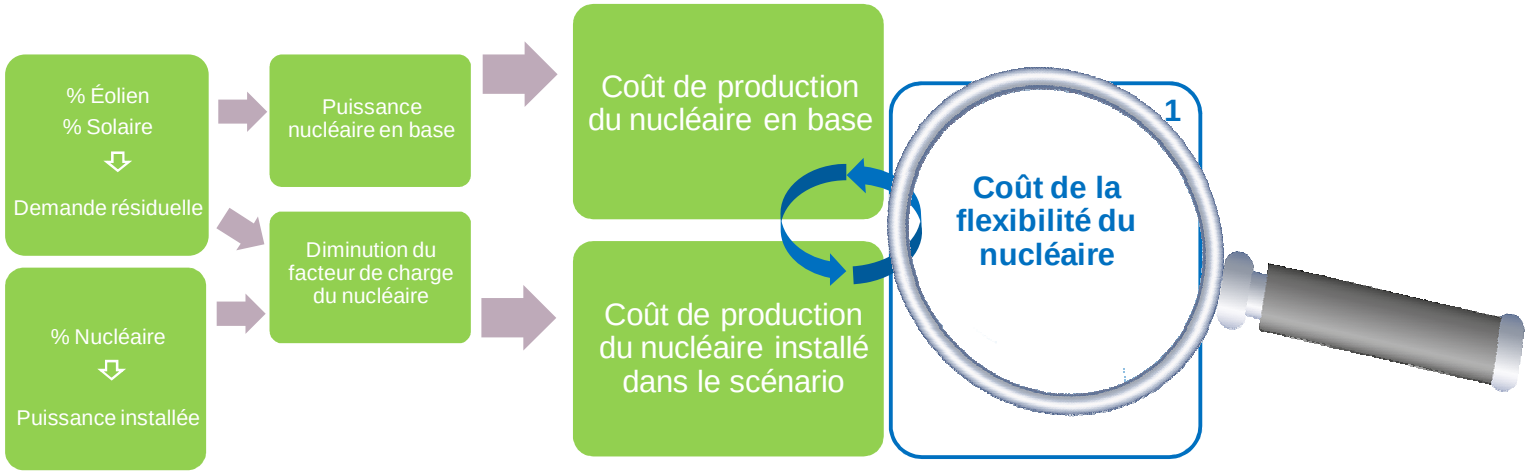
Le mix français avec un parc nucléaire en base (capacité abaissée)



- Augmentation de la part des énergies fossiles (entre 10 et 15% en 2030)
- 23% d'éolien et de solaire → 50% de nucléaire en base, en accord avec la LTECV
- 17% d'éolien et de solaire → 60% de nucléaire en base

⇨ **Adapter le pilotage de la transition à la pénétration des énergies renouvelables**

COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE



- Avoir une capacité nucléaire installée supérieure au cas de base pour diminuer la part d'énergies fossiles
- Le parc nucléaire fonctionne à facteur de charge réduit avec un coût de la flexibilité associé
- Si de nouvelles capacités devaient être construites, de tels investissements s'avéreraient difficilement justifiables avec des facteurs de charge bas

⇨ **Examiner des leviers pour réduire le coût de la flexibilité (choix stratégiques de l'opérateur et options dans les marchés) et rendre le nucléaire compétitif avec ce mode de fonctionnement (prix du CO_2)**

Publication

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière , T. Duquesnoy, A. Baschwitz, 2016. *Nuclear and non-dispatchable renewables: two compatible supply options? The case of the French power mix.* **Energy Policy**, Volume 95, Août 2016,135-146. doi:10.1016/j.enpol.2016.04.037

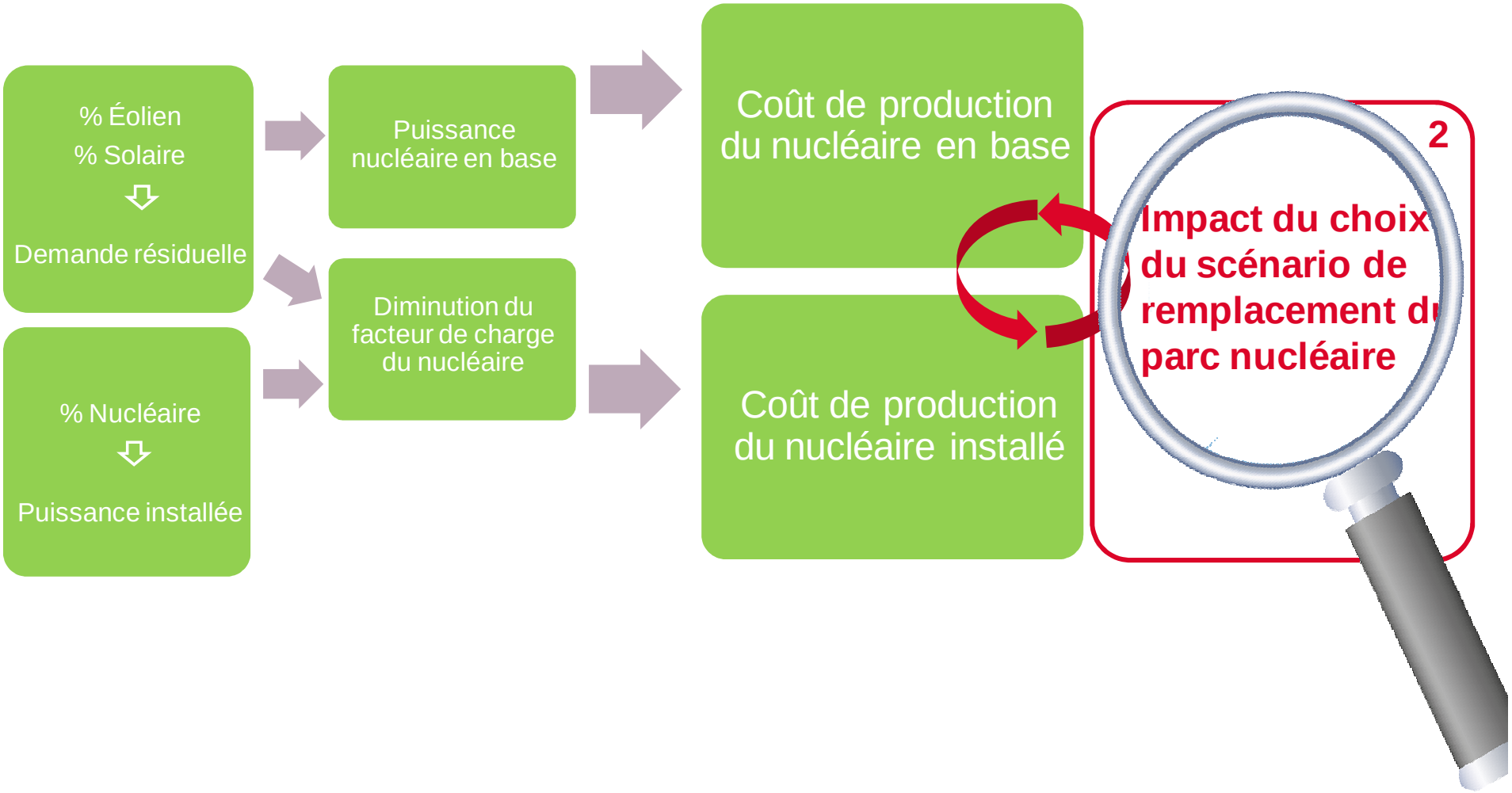
AXE 2

QUELS COÛTS AVEC UN PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS FLEXIBLE ?

1. MÉTHODOLOGIE
2. COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE
3. **LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DE LA FLEXIBILITÉ DU NUCLÉAIRE ET RENDRE LE PARC NUCLÉAIRE COMPÉTITIF AVEC UN MODE DE FONCTIONNEMENT FLEXIBLE**

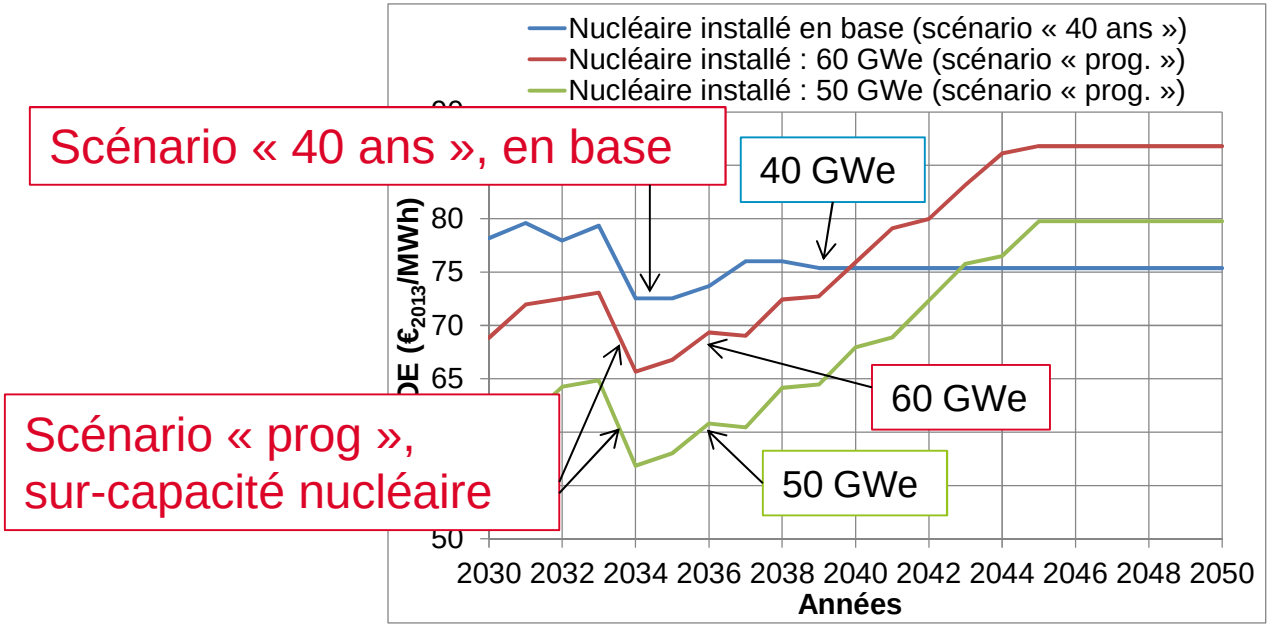
université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation
CentraleSupélec

DES LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DU NUCLÉAIRE (1/2)



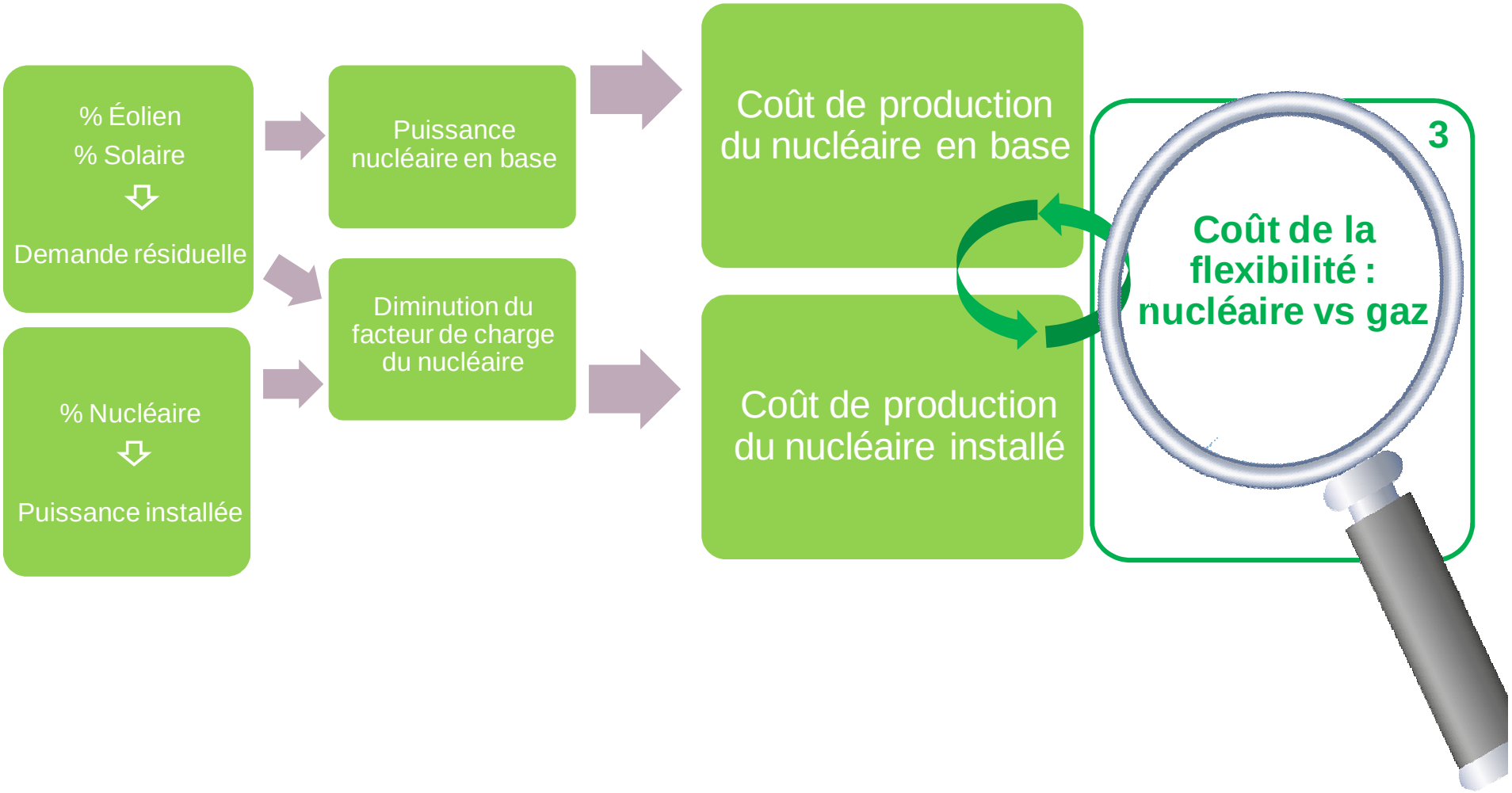
DES LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DU NUCLÉAIRE (2/2)

23% d'éolien et de solaire



- **Un remplacement progressif** permet de réduire le coût de production du nucléaire suffisamment significativement pour donner une **marge de manœuvre** à l'opérateur pour participer au **suivi de charge** (parc en sur-capacité par rapport au fonctionnement en base)
- Opter pour un remplacement progressif a ainsi l'avantage **de rapprocher la décision d'investissement de l'horizon 2050** et ainsi de réduire les incertitudes

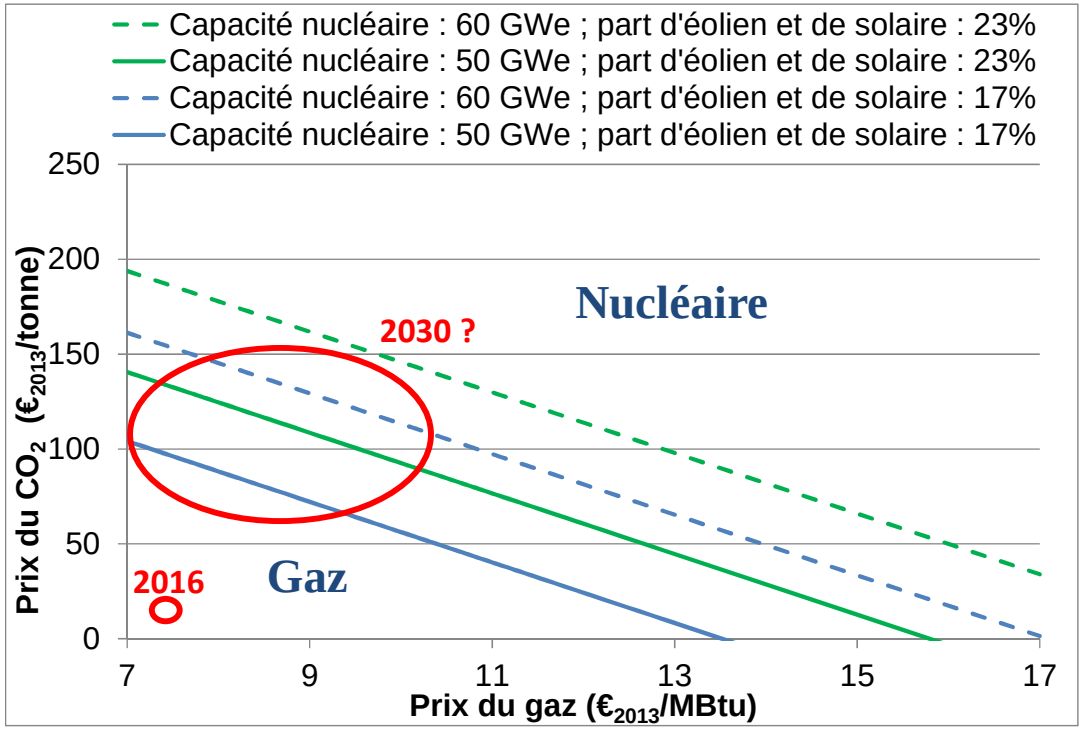
DES LEVIERS POUR RENDRE LE NUCLÉAIRE FLEXIBLE COMPÉTITIF (1/2)



DES LEVIERS POUR RENDRE LE NUCLÉAIRE FLEXIBLE COMPÉTITIF (2/2)

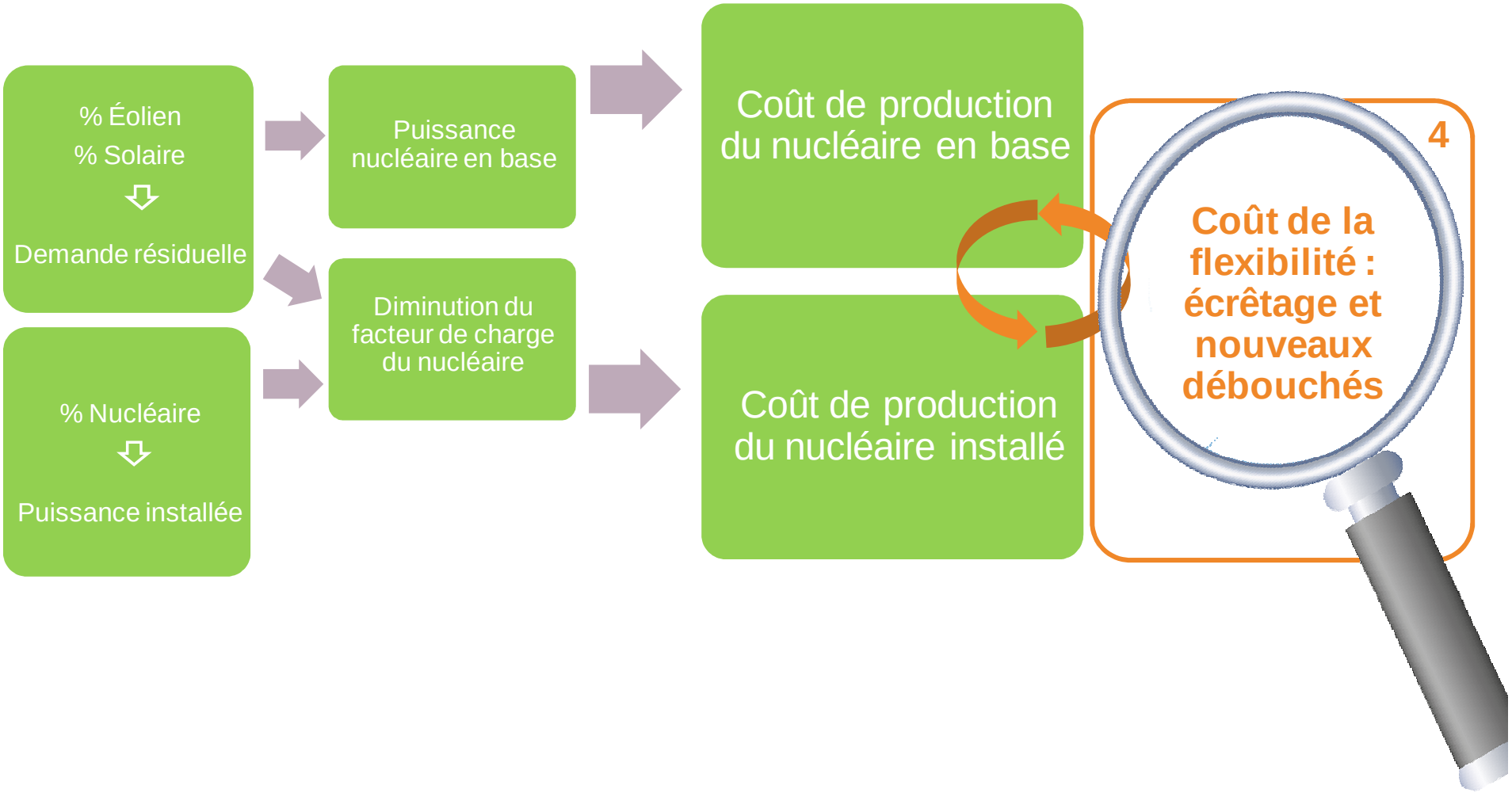
A l'horizon 2030

Scénario « prog »



- A l'horizon 2030, **choisir le nucléaire permettrait d'éviter entre 2 et 8% des émissions de $CO_{2,eq}$ par an du système énergétique** (entre 5 et 25 millions de tonnes de $CO_{2,eq}$ par an)
- Des incitations en faveur d'une **augmentation même limitée du prix du CO_2 pourraient changer la donne** dans la transition et dans le long terme
- Si le remplacement est très progressif (1 GWe/an), le nucléaire pourrait être moins coûteux quel que soit le prix du CO_2 et du gaz

DES LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DU NUCLÉAIRE (1/2)



DES LEVIERS POUR RÉDUIRE LE COÛT DU NUCLÉAIRE (2/2)

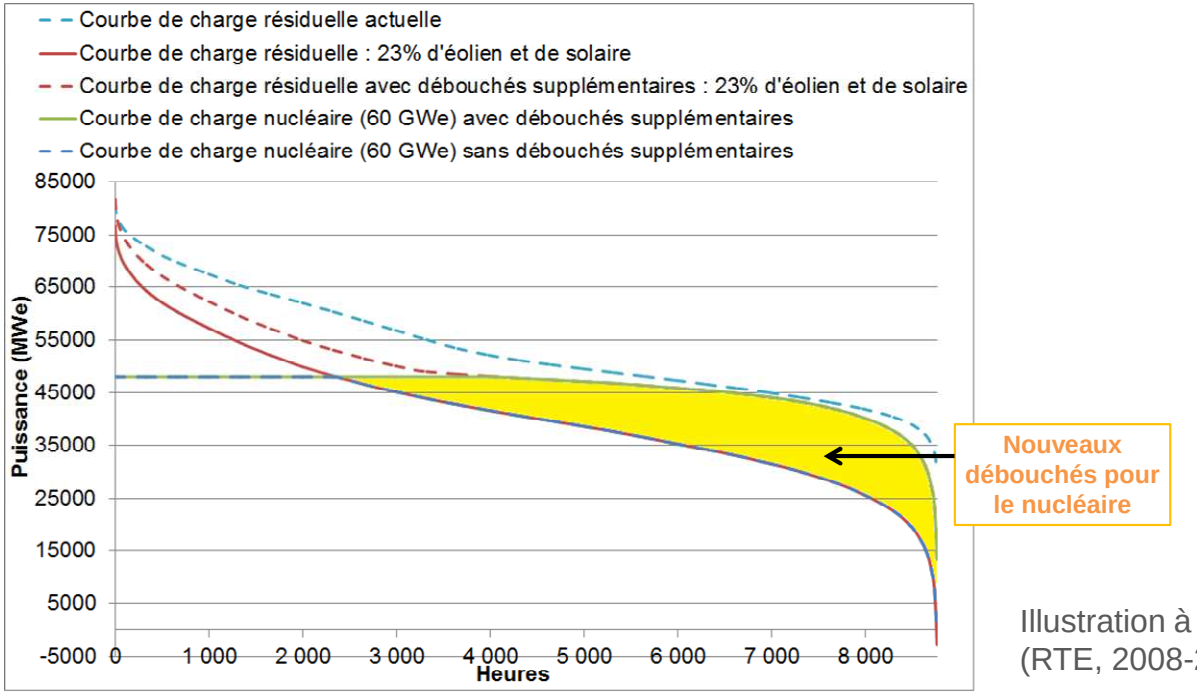


Illustration à partir des données (RTE, 2008-2016)

- **Réduire la contrainte de manœuvrabilité associée au fonctionnement en suivi de charge**
  - Ecrêter les puissances éoliennes et solaires (quelques pourcents de leur production annuelle jusqu'à 30% d'éolien et de solaire, dans le cadre du modèle et du jeu de données étudié)
  - Stocker l'électricité grâce aux STEP
- **Augmenter le facteur de charge du nucléaire**
  - Nouveaux usages flexibles et exportations (jusqu'à 10% de la demande jusqu'à 30% d'éolien et de solaire, dans le cadre du modèle et du jeu de données étudié)

ENSEIGNEMENTS

- **Le scénario prévu par la LTECV** (23% d'éolien et de solaire et 50% de nucléaire) pourrait signifier **une augmentation de 10 à 15 points de la part d'énergie électrique d'origine fossile en France à l'horizon 2030**
- Remplacer **de façon progressive** les réacteurs **devient crucial dans le contexte d'augmentation de l'éolien et du solaire** (gains supérieurs aux pertes générées par les pertes de production)
- **Augmenter le prix de la tonne de CO_2 même de façon limitée permettrait de rendre le nucléaire compétitif par rapport au gaz CCGT pour fonctionner en semi-base**
  - Dans la période de transition
  - Dans le long terme
- **Augmenter les débouchés pour le parc nucléaire et écrêter l'éolien et le solaire**
  - Pour réduire la contrainte de manœuvrabilité demandée au parc nucléaire
  - Pour augmenter le facteur de charge du parc nucléaire
- **Besoin d'une vision de long terme pour anticiper les investissements bas-carbone et éviter les investissements dans des centrales fossiles**
  - Prévision du taux d'énergies renouvelables variables
  - Prévision du prix de la tonne de CO_2
  - Prévision de la demande (y compris exports et nouveaux débouchés)

Publication

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, 2017. *Adapting the French nuclear fleet to the integration of variable renewable energies thanks to the production of hydrogen: towards massive production of low-carbon hydrogen?* **International Journal of Hydrogen Energy**, Volume 42, Mai 2017, 13339-13356. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.146

AXE 3

FLEXIBILITÉ DU PARC NUCLÉAIRE VIA DE NOUVEAUX USAGES, EXEMPLE DE L'HYDROGÈNE

1. ATTRACTIVITÉ DES MARCHÉS DE L'HYDROGÈNE ET PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR LE PARC NUCLÉAIRE : QUELLE ADÉQUATION ?

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation
CentraleSupélec

Publication

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, 2017. *Adapting the French nuclear fleet to the integration of variable renewable energies thanks to the production of hydrogen: towards massive production of low-carbon hydrogen?* **International Journal of Hydrogen Energy**, Volume 42, Mai 2017, 13339-13356. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.146

AXE 3

FLEXIBILITÉ DU PARC NUCLÉAIRE VIA DE NOUVEAUX USAGES, EXEMPLE DE L'HYDROGÈNE

1. ATTRACTIVITÉ DES MARCHÉS DE L'HYDROGÈNE ET PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR LE PARC NUCLÉAIRE : QUELLE ADÉQUATION ?

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE INTERFACES Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation
CentraleSupélec

LE MARCHÉ DE L'HYDROGÈNE EN FRANCE

La demande d'hydrogène

- **Aujourd'hui**
  - Produit chimique (raffineries, producteurs d'ammoniac, …)
- **Dans les 15 à 30 ans qui viennent, croissance de l'hydrogène vecteur énergétique**
  - Utilisation dans les piles à combustibles pour des usages de mobilité ou stationnaires
  - Apport dans le procédé de fabrication du biodiesel de deuxième génération
  - Injection dans les réseaux de gaz

La production d'hydrogène

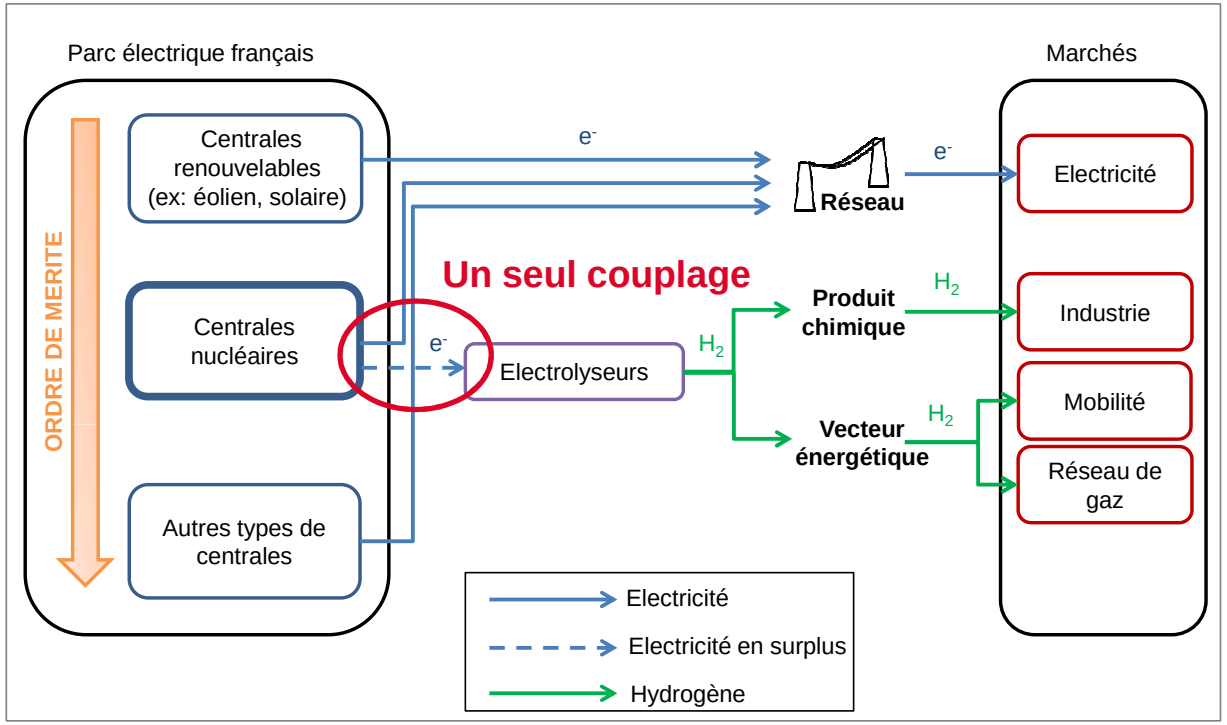
- **Aujourd'hui**
  - Plus de 99% de l'hydrogène produit provient de ressources fossiles
  - La production d'hydrogène représente 1 à 2 % des émissions de CO_2 annuelles françaises
- **Dans les 15 à 30 ans qui viennent**

⇨

- Dans quelle mesure **le nucléaire** pourrait-il contribuer à la **fourniture d'hydrogène bas-carbone** tout **en aidant l'intégration des énergies renouvelables variables** dans le réseau électrique ?

MÉTHODOLOGIE (1/3)

Description du système : vers un système énergétique hybride ?



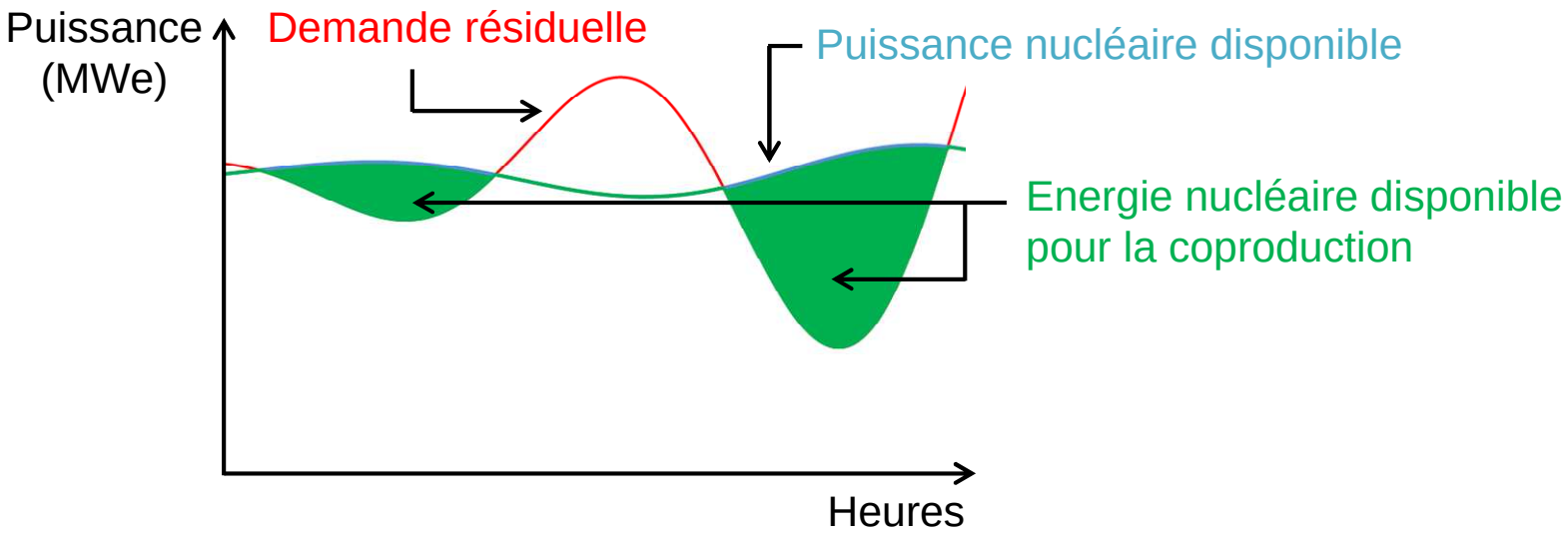
- Un système énergétique hybride : « couplage optimisé entre diverses sources énergétiques, divers services rendus et divers moyens de stockage pour améliorer l'économie, la flexibilité et l'impact environnemental du système global » (Cherry et al., 2012)
- Objectif : réduire le coût de l'intermittence, réduire les émissions de GES

(Cherry et al., 2012), (Forsberg, 2015), (Garcia et al., 2013), (Haratyk and Forsberg, 2012), (Sabharwall et al., 2015), (Ruth et al., 2014).

MÉTHODOLOGIE (2/3)

Modèle « Profil nuc. » couplé au modèle « Coût de l'hydrogène »

- Objectif
  - Extrapolation des profils de puissance nucléaire disponible pour la production d'hydrogène



- Deux modèles économiques pour le coût de l'électricité à l'horizon 2030
  - L'usine d'hydrogène est la propriété de l'opérateur nucléaire : **électricité gratuite**
  - L'opérateur de l'usine d'hydrogène achète l'électricité à l'opérateur nucléaire dans le cadre d'un contrat à tarif négocié : **27€/MWhe** (Cour des comptes, 2014)

MÉTHODOLOGIE (3/3)

Attractivité des segments de marché

- Coûts objectifs pour la production d'hydrogène à partir des surplus nucléaires
  - Comparaison aux concurrents actuels sur les marchés
  - Même service rendu

- Prix des ressources fossiles

(WEO, 2015 – BAU : "current policies")

	2030	2050
Prix du pétrole brut ($€_{2014}$/boe)	130	150
Prix du gaz ($€_{2014}$/MBtu)	10	10,5

- Prix du CO_2

(LTECV et ANCRE, 2015)

	2030	2050
Prix du CO_2 (€/$tonne_{CO2}$)	100	200

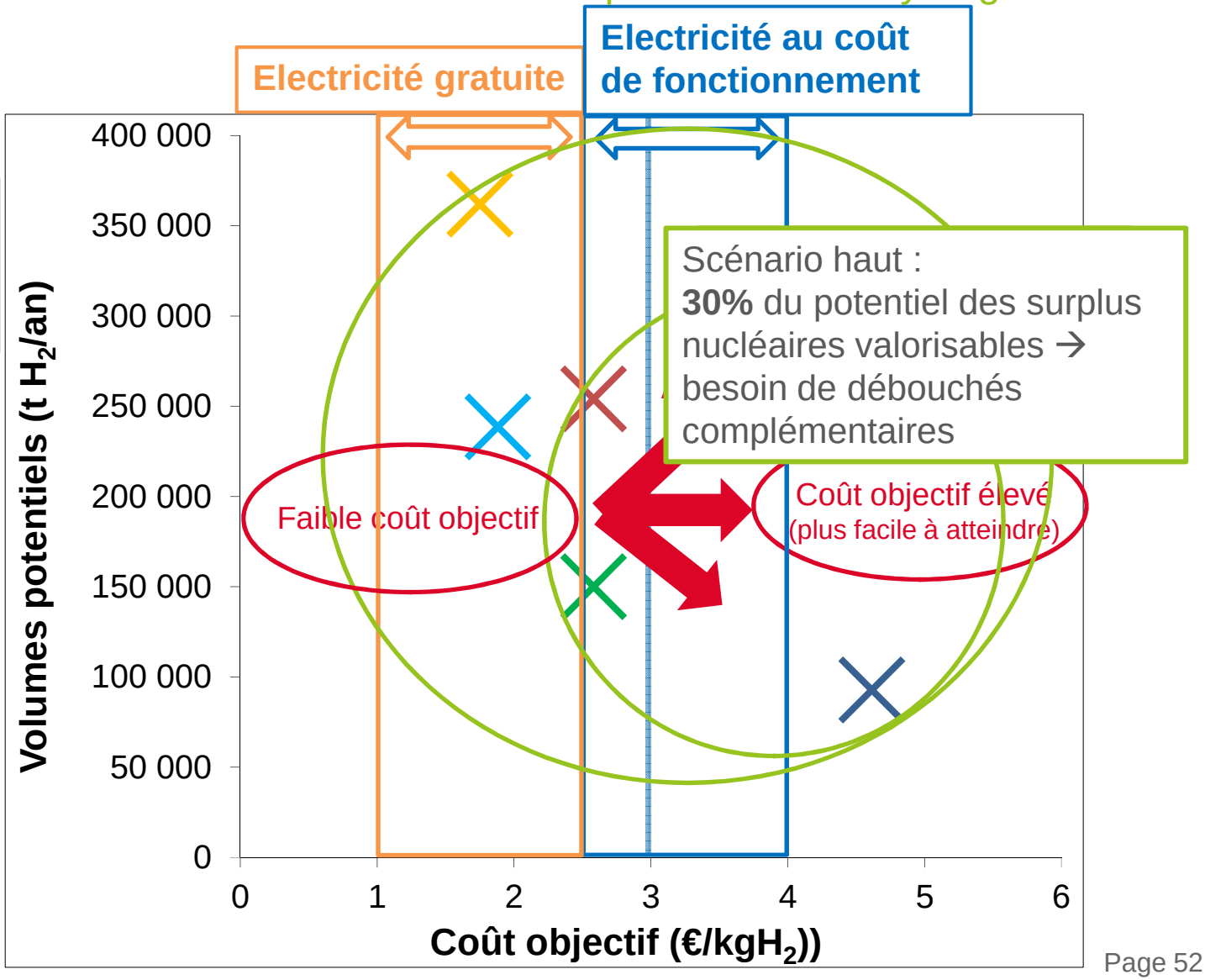
PRODUCTION D'HYDROGÈNE NUCLÉAIRE VS. ATTRACTIVITÉ DES MARCHÉS

France, 2030

Intervalles du coût de production de l'hydrogène

Légende

- Piles à combustible
- Biodiesel
- Réseaux de gaz
- Raffineries
- Producteurs d'ammoniac

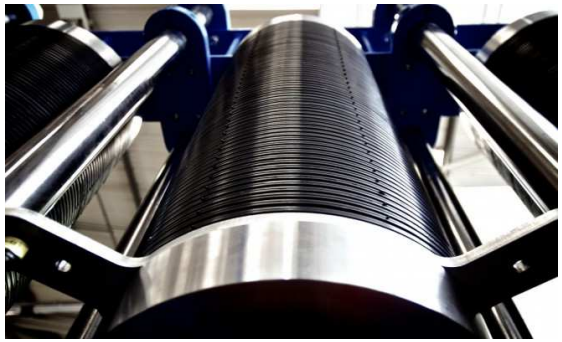


ENSEIGNEMENTS : DES SYNERGIES POSSIBLES ENTRE ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET ENR VARIABLES ?

- **Grâce à l'utilisation des surplus en fonction de la courbe de charge : exemple de l'hydrogène**
  - L'hydrogène, un levier pour apporter de la flexibilité
  - L'hydrogène pour réduire le coût de production d'électricité et générer des revenus supplémentaires
  - Le nucléaire et les énergies renouvelables variables pour réduire le coût de l'hydrogène et favoriser son développement pour décarboner d'autres secteurs énergétiques

- **Grâce à une dynamique de transition adaptée au développement des nouveaux usages de l'électricité**
  - Une première phase : conserver la capacité nucléaire pour promouvoir le développement des systèmes énergétiques hybrides
  - Une deuxième phase : abaisser la capacité nucléaire en fonction du taux d'éolien et de solaire

West Sacramento, Californie



Électrolyseur d'ITM Power

4. CONCLUSION, LIMITES ET PERSPECTIVES

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec

CONCLUSION

- **L'exploitation du parc nucléaire devrait être adaptée à l'augmentation des ENR variables**
  - Le parc dispose d'un potentiel pour être plus flexible
  - Avec la croissance du taux d'enr variables, d'autres options de flexibilité devraient être mobilisées en soutien au parc nucléaire (côté production et côté demande)

- **Pour conserver un mix électrique bas-carbone à coût maîtrisé**
  - Remplacer progressivement le parc nucléaire est crucial
  - Augmenter le prix de la tonne de CO_2 pour favoriser le nucléaire flexible plutôt que le gaz
  - Développer les usages du nucléaire, écrêter les puissances éoliennes et solaires

- **Des synergies entre énergie nucléaire et ENR variables grâce au développement de nouveaux usages**
  - Baisse des émissions de CO_2 du secteur électrique, du transport, des industries

- **Inciter le développement de modes de production bas-carbone**
  - Pénaliser les émissions de CO_2
  - Inciter le développement des :
    - nouveaux usages flexibles d'électricité
    - applications non-électriques du nucléaire (hydrogène, chaleur)
    - systèmes énergétiques hybrides et couplage de secteurs énergétiques

LIMITES ET PISTES D'AMÉLIORATIONS

- **Incertitudes associées aux choix des scénarios dans l'analyse prospective**

- **Système électrique français modélisé comme un système exportateur isolé**

  - **Modéliser les échanges aux frontières**
    - Influence sur le profil nucléaire du parc français
    - Influence sur le coût de la flexibilité du nucléaire

- **Focus sur une partie du système électrique**

  - **Modéliser le système électrique dans sa globalité**
    - Comparaison des options de flexibilité entre elles
    - Influence des options de flexibilité sur la flexibilité demandée aux centrales programmables

PERSPECTIVES

- **Analyse de systèmes énergétiques hybrides adaptés à la France et à l'Europe**
  - Sélection de sites d'intérêt
  - Recherche de synergies entre énergies bas-carbone

- **Choix d'investissement dans des centrales de production bas-carbone et analyse du jeu d'acteurs sur les marchés**
  - Variables d'incertitudes au-delà du système électrique, considérées dans une optique de système énergétique intégré

- **Analyse des politiques à mettre en œuvre pour favoriser le déploiement de systèmes énergétiques hybrides**
  - Evaluation de leur faisabilité socio-technique

Publications

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear power supply: going against the misconceptions. Evidence of nuclear flexibility from the French experience.* **Energy**, Volume 151, Mai 2018, 289-296 https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.064

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière, 2018. *Nuclear contribution to the penetration of variable renewable energy sources in a French decarbonised power mix.* **Energy**, Volume 150, Mai 2018, 544-555, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.122

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, 2017. *Adapting the French nuclear fleet to the integration of variable renewable energies thanks to the production of hydrogen: towards massive production of low-carbon hydrogen?* **International Journal of Hydrogen Energy**, Volume 42, Mai 2017, 13339-13356. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.146

C. Cany, C. Mansilla, P. da Costa, G. Mathonnière , T. Duquesnoy, A. Baschwitz, 2016. *Nuclear and non-dispatchable renewables: two compatible supply options? The case of the French power mix.* **Energy Policy**, Volume 95, Août 2016, 135-146. doi:10.1016/j.enpol.2016.04.037

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

MERCI DE VOTRE ATTENTION

camille.cany@centralesupelec.fr

Pour accéder à mon manuscrit de thèse :
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01509918

université PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

CentraleSupélec