

Flexibilité dans la Transition Energétique



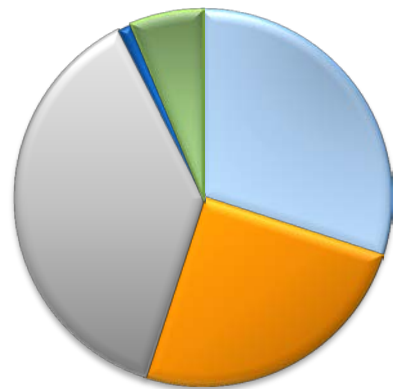
Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2028

Quelques fondamentaux

Décarboner l'énergie en France pour atteindre les objectifs climatique et la neutralité carbone en 2050

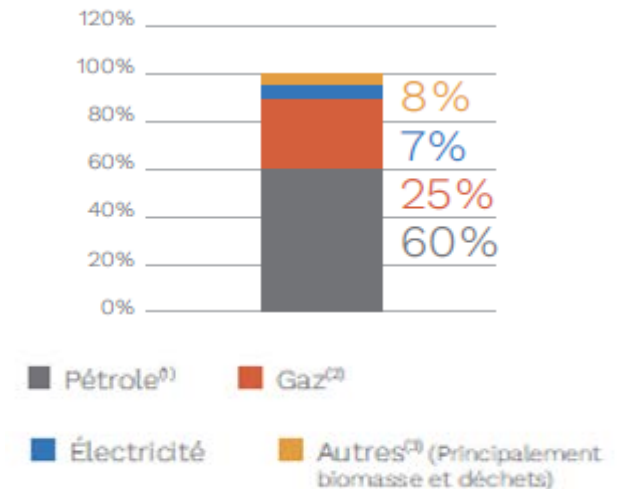
- Forte réduction de la consommation des énergies fossiles grâce à l'électrification bas carbone des usages
- Pas de nouvelle centrale électrique à énergie fossile
- Fermeture d'ici 2022 des dernières centrales charbon ou les convertir à la biomasse
- Obtenir un "juste prix" du carbone au niveau européen
- Développer les usages de l'électricité dans les transports et le bâtiment
- Accélérer l'efficacité énergétique, en particulier dans le bâtiment

Consommation finale
d'énergie en France en
2021 : 1600 TWh



- Electricité
- Gaz
- Produits Pétroliers
- Chaleur
- Énergies Renouvelables thermiques (biocarburants) et déchets

Participation aux émissions
de gaz à effet de serre (GES)



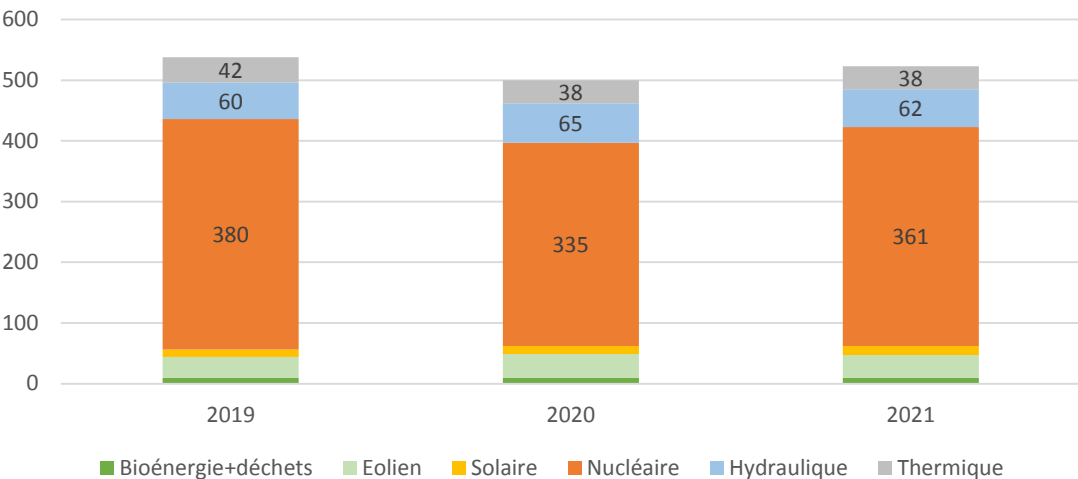
Programmation Pluriannuelle de l'Energie 2019-2028

Quelques fondamentaux

Des objectifs d'évolution du mix électrique

- Développement des renouvelables pour atteindre 40% en 2030 :
x 3 sur l'éolien terrestre, x 5 sur le PV
- Vers un mix équilibré 50/50 nucléaire/renouvelables en 2035
- Décliné pour le nucléaire :
 - Arrêt de 14 réacteurs 900 MWe d'ici 2035 à leur 5^{ème} VD (avant pour Fessenheim et potentiellement 4 autres entre 2025 et 2028)
 - Pas de fermeture de site
 - Instruction avec la filière d'une dossier nouveau nucléaire pour mi-2021

Evolution de la Production d'électricité en France



Production 2021 : 523 TWh
Consommation 2021 : 468 TWh



Hydraulique 25500 MW

PV 13000 MW

Eolien 18800 MW

Nucléaire 61370 MW

Charbon 1800 MW

Gaz 13000 MW

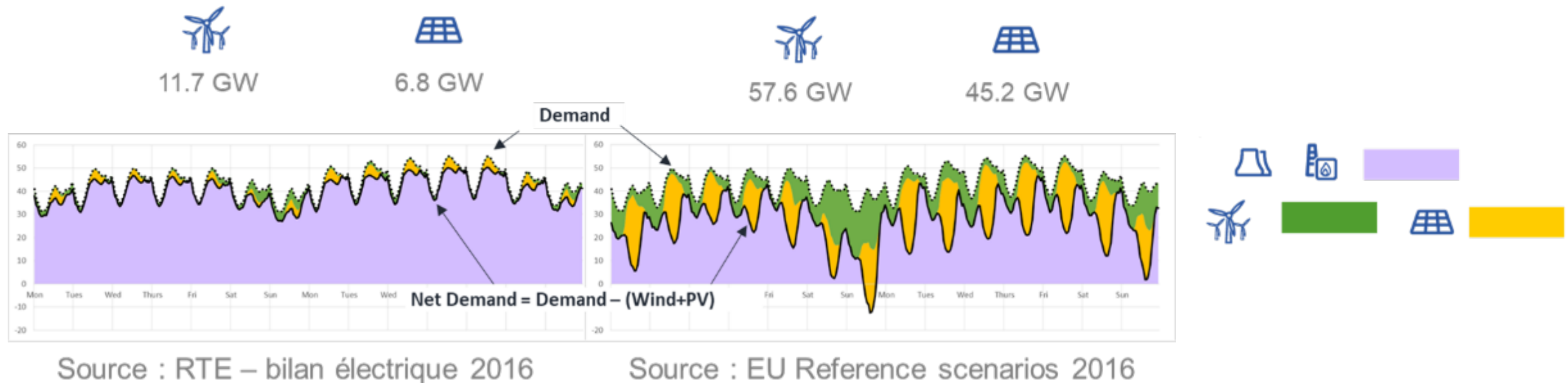
Fioul 2900 MW

Bioénergie 2300 MW

L'étude regarde l'impact d'un volume EnR important sur le parc nucléaire existant en France à 2040

- L'étude vise à analyser les **implications** d'un **volume d'EnR important** sur le **fonctionnement** du parc **nucléaire existant** dans des **situations climatiques contrastées**
- L'horizon d'étude choisi est **2040**

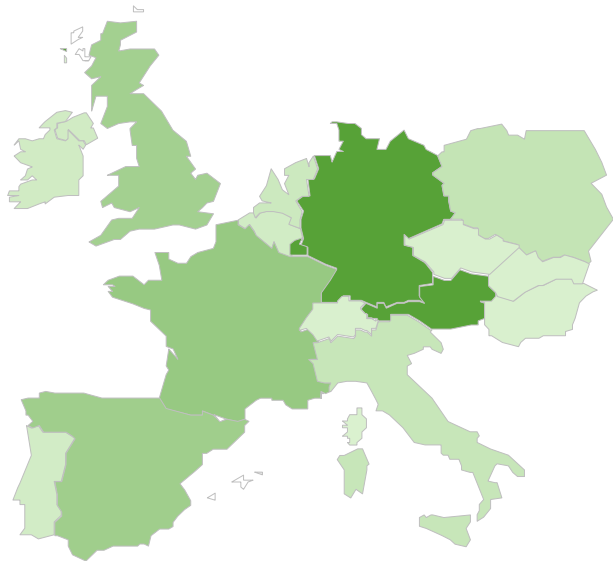
Illustration de la problématique de l'insertion massive du solaire sur des données RTE



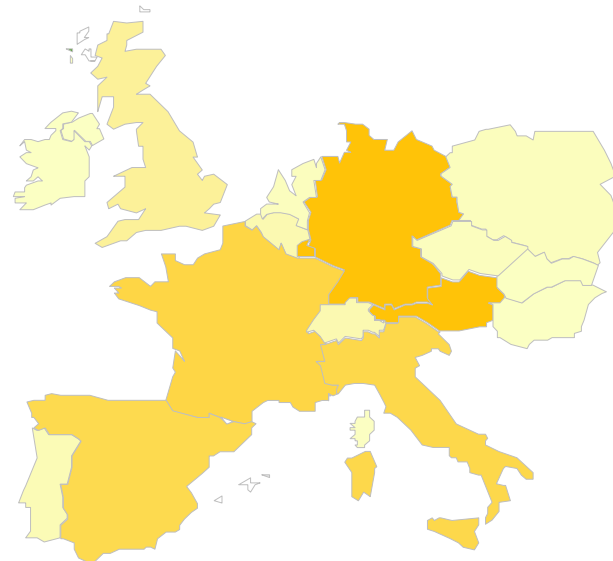
Une puissance EnR installée importante en Europe et 2 configurations étudiées de parcs nucléaires en France

- Les **puissances EnR** installées sont **importantes** sur **toute l'Europe**
 - Le **contexte économique** de ce scénario est **favorable** au développement des EnR
 - prix du **CO2 élevé** → le **gaz** passe **avant le charbon** dans le merit-order
- **2 variantes** de parc **nucléaire** installés sont considérées pour la **France**

Production éolienne



Production solaire



Parc nucléaire en France

2 variantes de parc nucléaire pour la **France**



Déclassement partiel REP 900



Déclassement total REP 900

2 variantes de parcs nucléaires étudiées

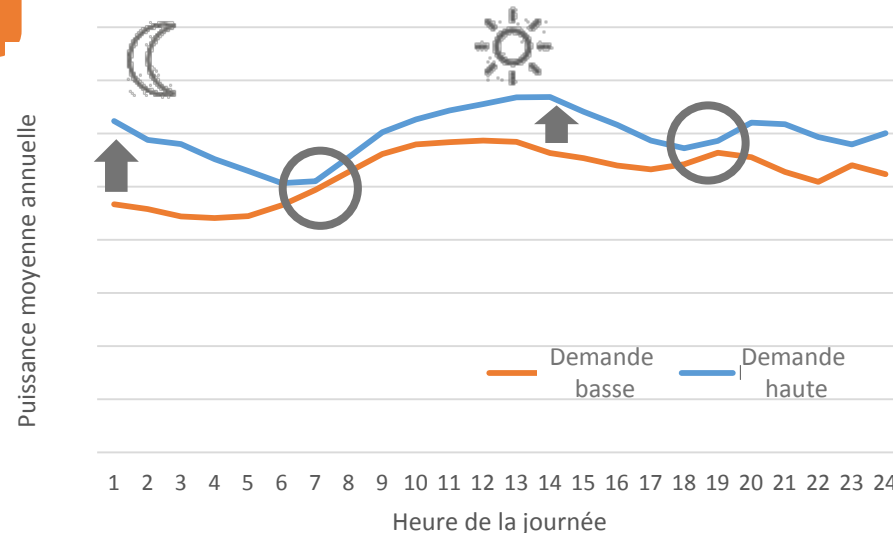
Typologie du parc	Puissance totale	Hypothèses de déclassement	Composition du parc
Déclassement partiel des tranches 900	Environ 54 GW	16 tranches 900 déclassées	18 réacteurs 900 20 réacteurs 1300 4 réacteurs N4 3 réacteurs EPR
Déclassement total des tranches 900	Environ 34 GW	34 tranches 900 déclassées	20 réacteurs 1300 4 réacteurs N4 1 réacteur EPR

Le profil et le niveau de la demande sont des hypothèses structurantes : 2 hypothèses pour l'étude



Demande basse 458 TWh

- **Développement** des usages électriques à un rythme plus **lent**
- Atteinte d'objectifs d'**efficacité énergétique** très **ambitieux**



Recharge des VE placée sur les heures nocturnes et méridiennes



Les 2 demandes sont proches sur les points bas de la courbe bleue

Demande haute 521 TWh

- **Hausse** de la demande électrique
- **Placement optimisé** des **usages** par rapport à la production EnR

Une chaîne a été développée en collaboration avec les équipes du parc et intègre la gestion actuelle

Modélisation du système électrique européen interconnecté

Contraintes pour le parc nucléaire et thermique à flamme:

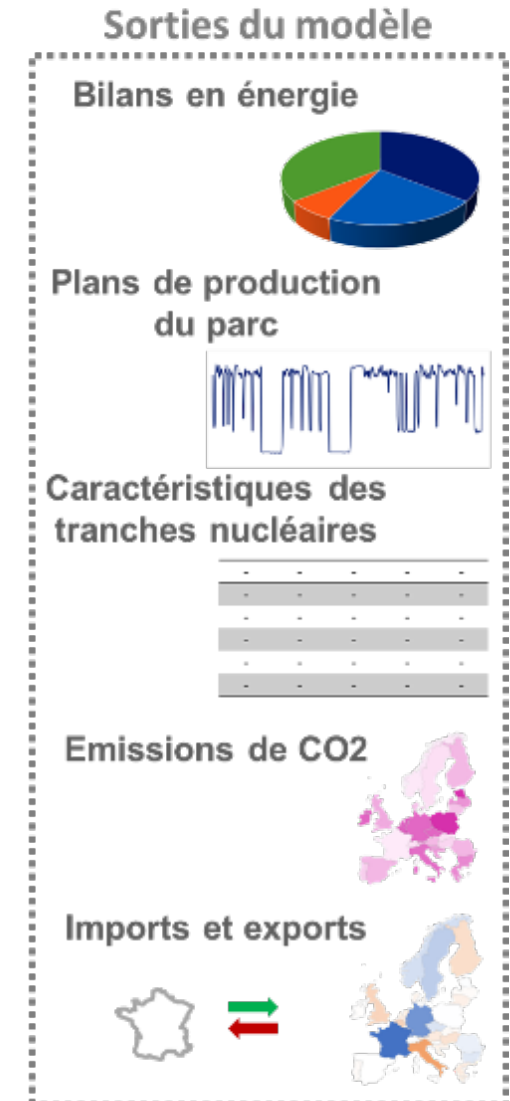
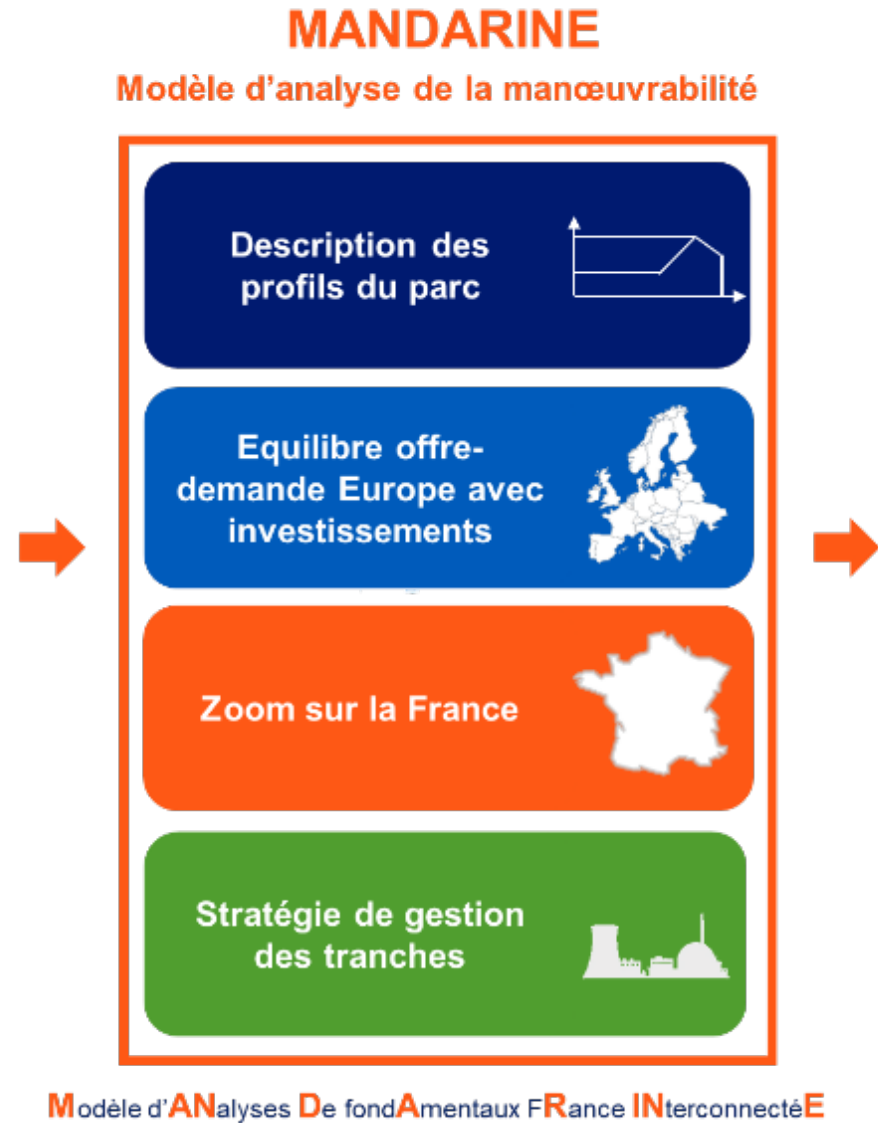
- durée minimale de marche
- durée minimale d'arrêt
- puissance minimale (MT)
- fourniture en SSY optimisée

Hypothèses macro-économiques

Aléas production et climatiques

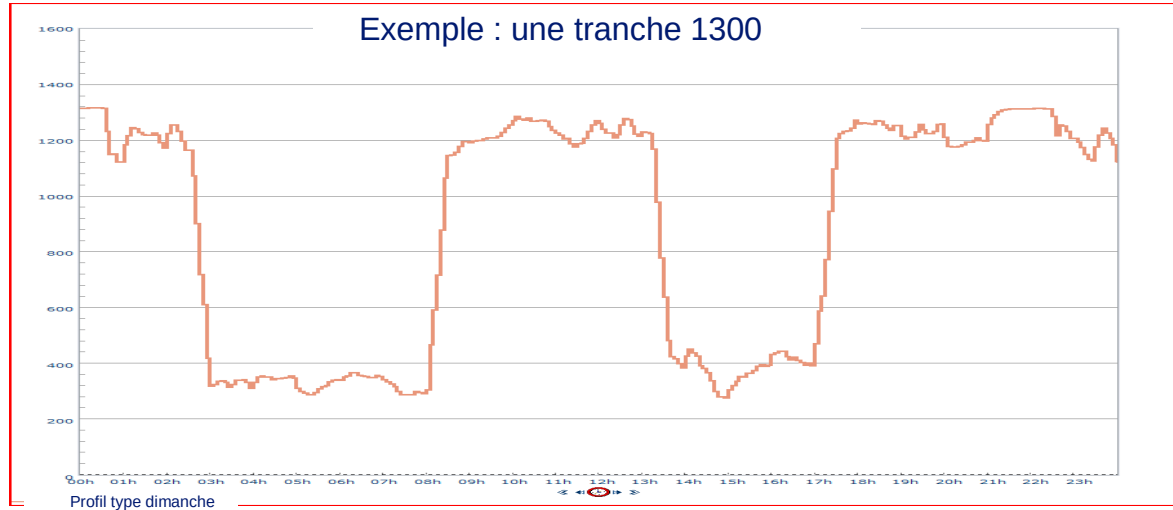
55 aléas climatiques répétés 3 fois et croisés avec 165 aléas de fortuits sur le parc de production (nucléaire et thermique à flamme)

Demande



La manoeuvrabilite actuelle

Capacités nominales (et observées) du Parc



- Jusqu'à 2 baisses profondes par jour pour la plupart des tranches
- Amplitude de baisse pouvant aller jusque 80% de puissance nominale
- 30 minutes pour varier, à la baisse comme à la hausse
- Superposition avec réglage de fréquence

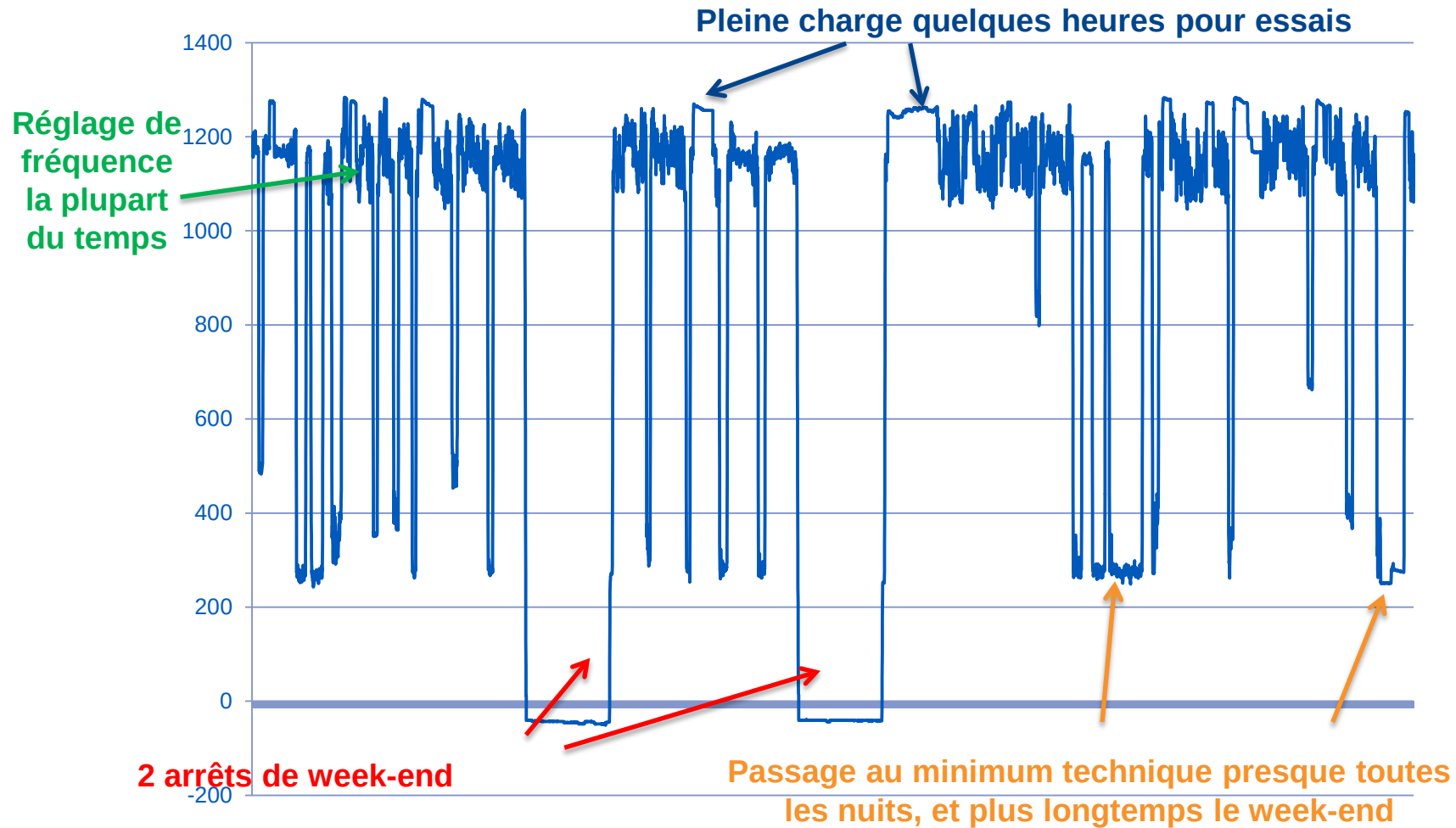
Energie modulée annuellement : ~15 TWh (575 JEPP) : 4 en réglage de fréquence + 7 en baisse de charge + 4 en arrêt de week-end (ou de semaine). Volume stable sur 15 ans.

Le réglage de fréquence est assuré prioritairement par le thermique lorsqu'il est couplé (1 TWh), l'hydraulique (5,5 TWh), puis le nucléaire (4 TWh).

La manoeuvrabilite actuelle

Profil mensuel d'une tranche 1300 – cas extrême

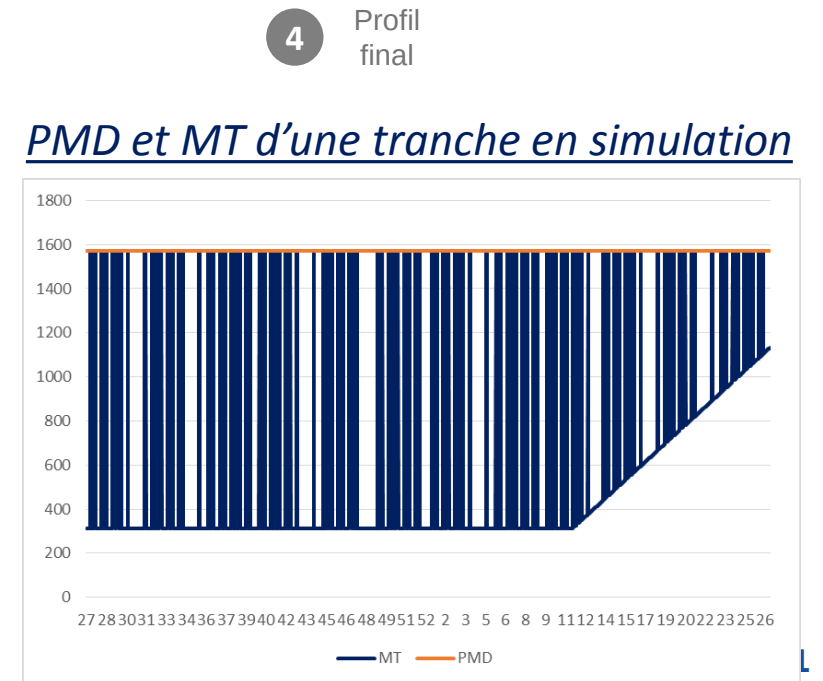
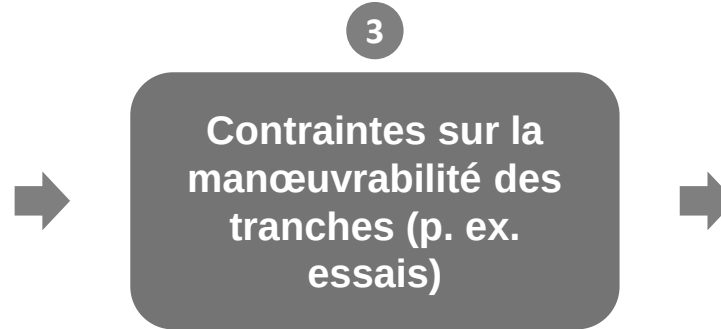
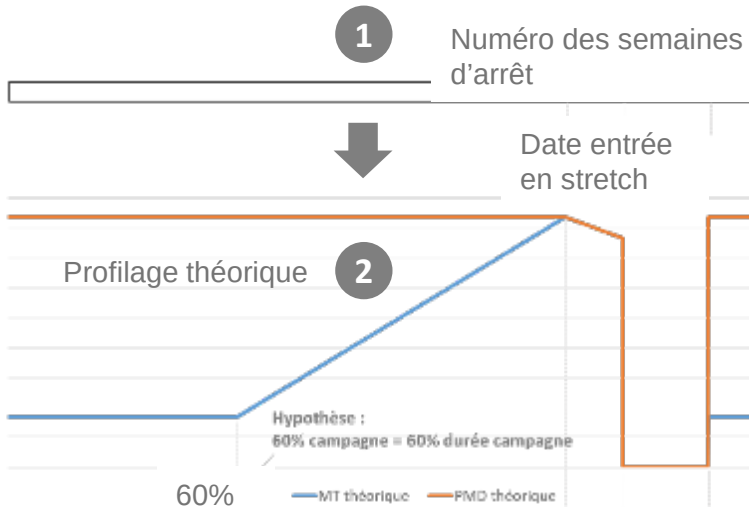
10 JEPP économisés sur le mois = 10 JEPP de production l'hiver suivant



JEPP jour équivalent pleine puissance

Le parc nucléaire est modélisé finement

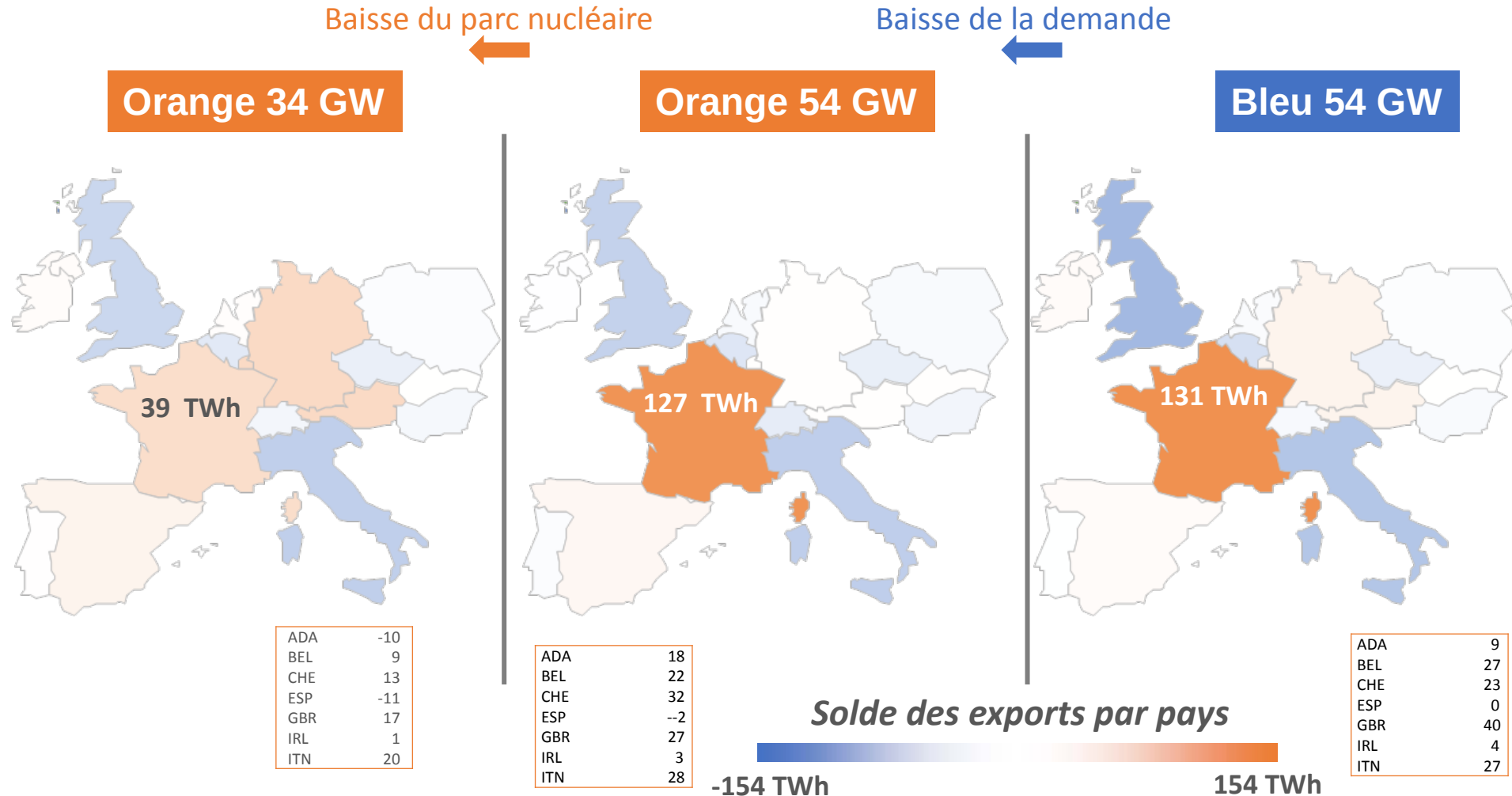
- Etape 1 : **Plannings** des arrêts pour **maintenance**
- Etape 2 : **Profilage théorique** du **Minimum Technique**, de la **PMD** et de la capacité à fournir des **services système**
- Etape 3 : Calibrage des **indisponibilités à manœuvrer**
- Etape 4 : Placement des **essais** par distribution statistique après exploitation de la base de suivi d'exploitation



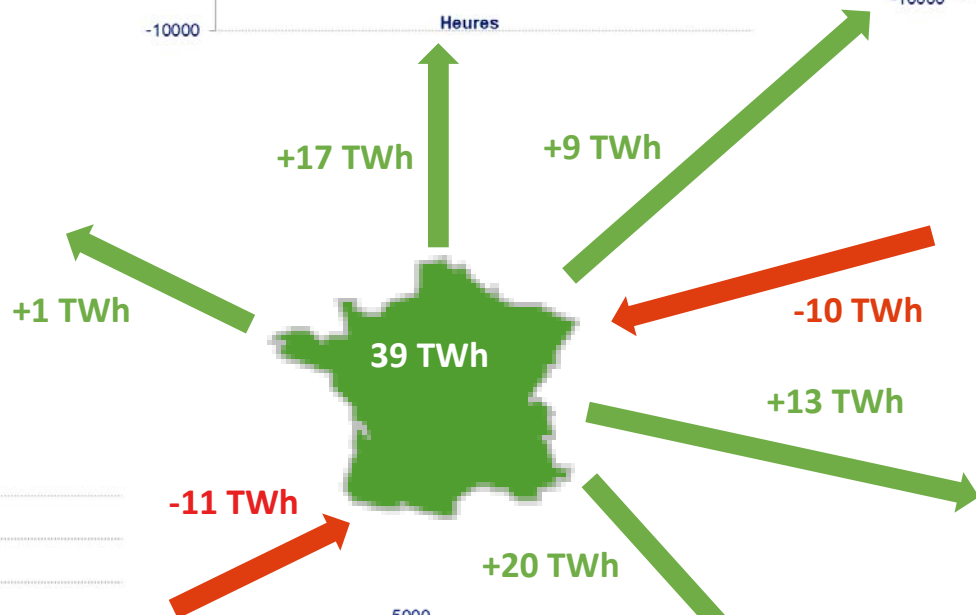
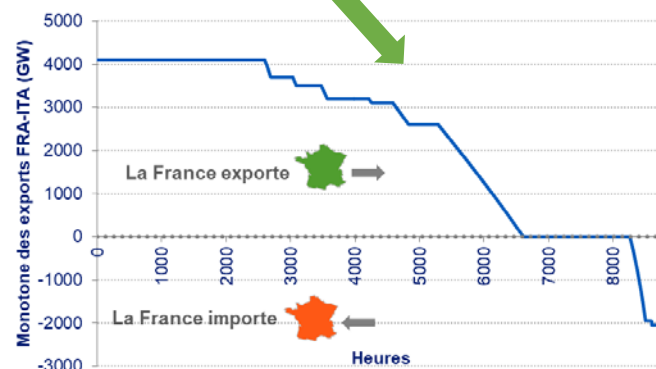
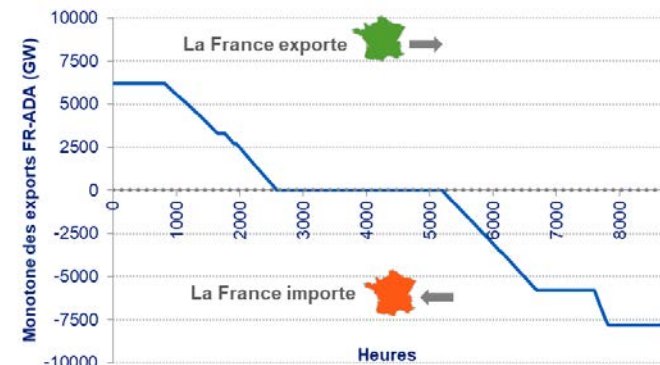
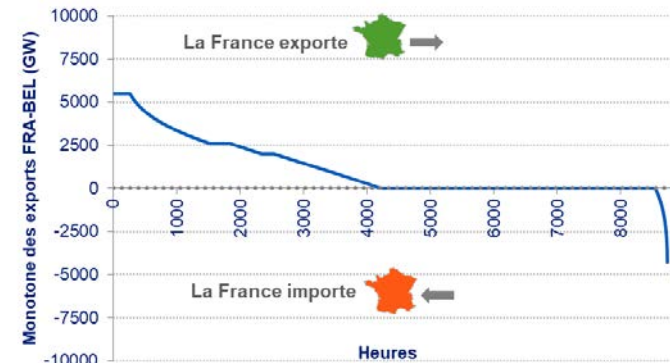
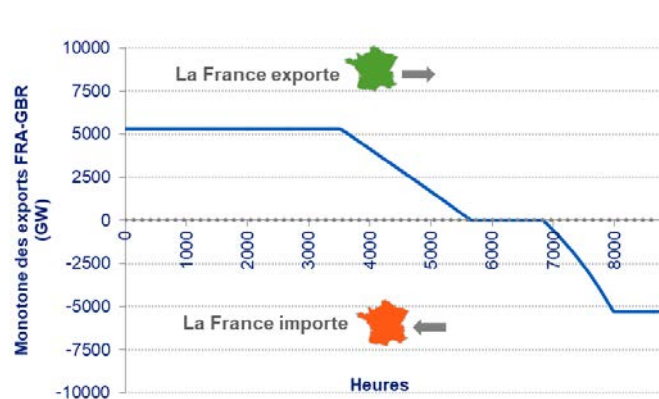
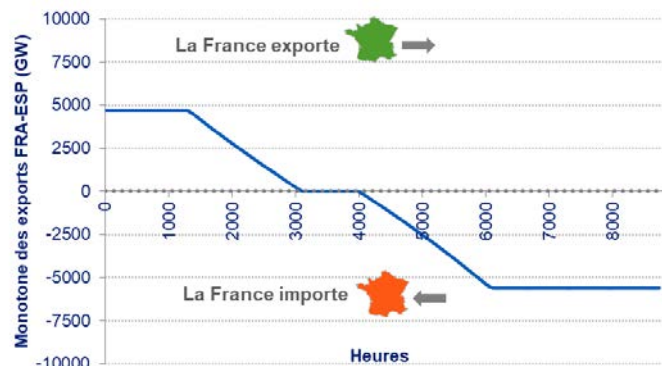
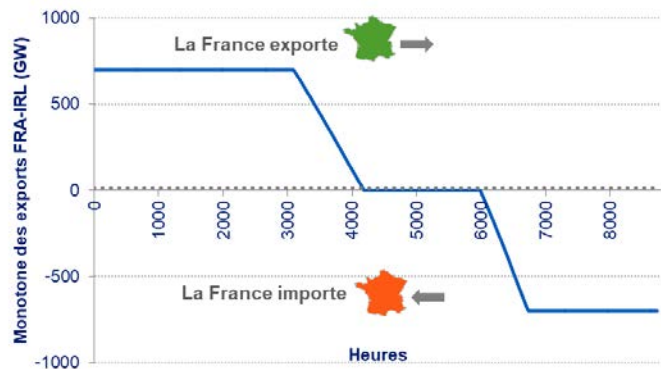
Positionnement des scénarios par rapport à la PPE : le scénario Bleu 54 GW à l’horizon 2040 correspond à la trajectoire dessinée par la PPE, à l’exception de la capacité solaire installée qui pourrait être plus élevée

Périmètre France	PPE	Orange 34 GW	Orange 54 GW	Bleu 54 GW
Horizon de temps	2028 – 2030 – 2035	2040		
Consommation (TWh)	Électrification et efficacité énergétique	458 TWh		521 TWh
Production (TWh)	Environ 650 TWh (2035)	503 TWh (2040)	588 TWh (2040)	653 TWh (2040)
Nucléaire existant	14 réacteurs fermés d’ici 2035	-34 réacteurs 900	-16 réacteurs 900	
Nouveau nucléaire	Visibilité en 2022	--	+2 EPR	
% Nucléaire	50% (2035)	41%	52%	52%
% THF	5% (2035)	7%	3%	7%
% EnR	45% (2035)	52%	45%	41%
Eolien	38.8 à 40.8GW (2028)	58.35 GW (2040)		
Solaire	35.6 à 44.5GW (2028)	43.19 GW (2040)		
Electricité renouvelable	235-260 TWh (2030)	264 TWh (2040)		
Charbon	Fermeture centrales charbon (2024)	0 GW		

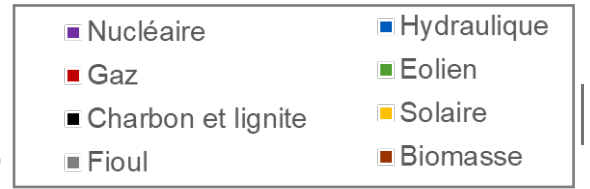
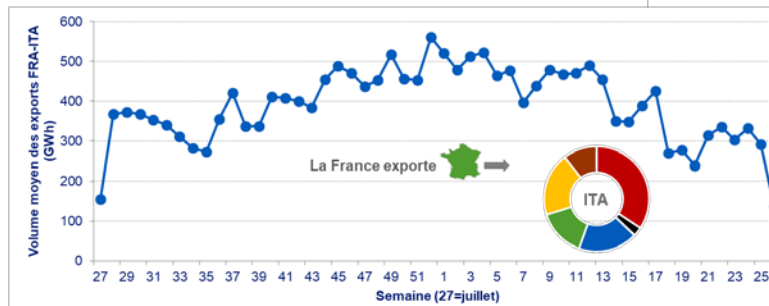
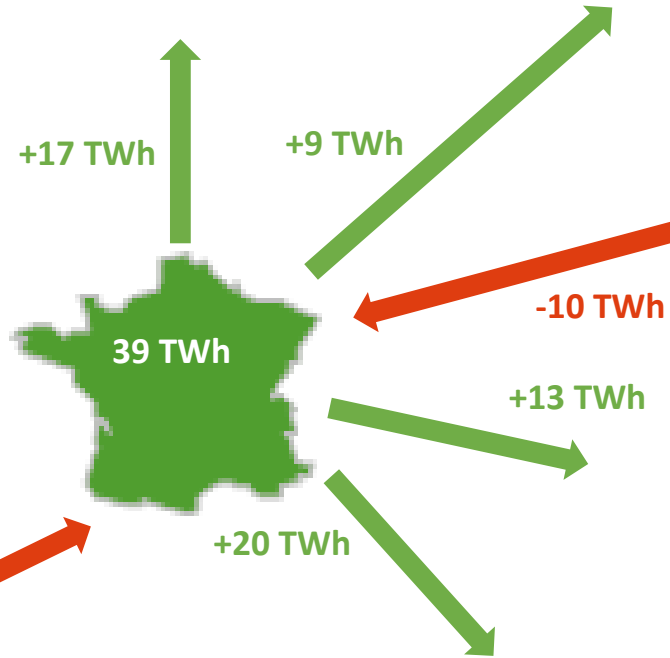
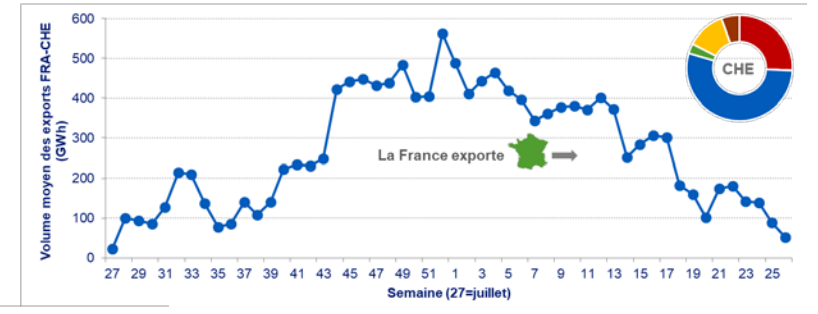
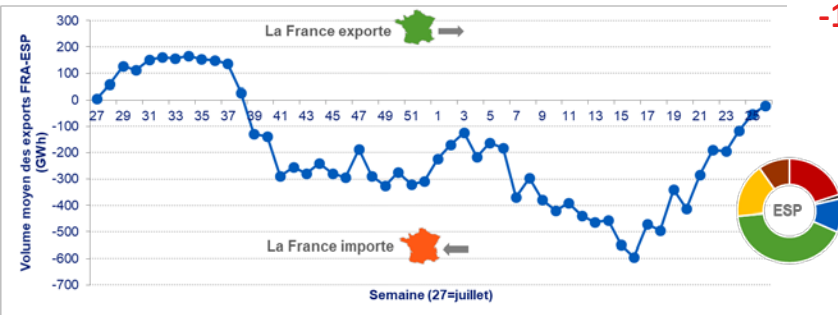
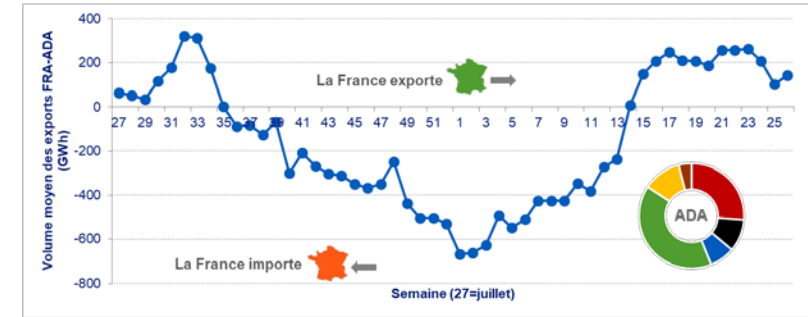
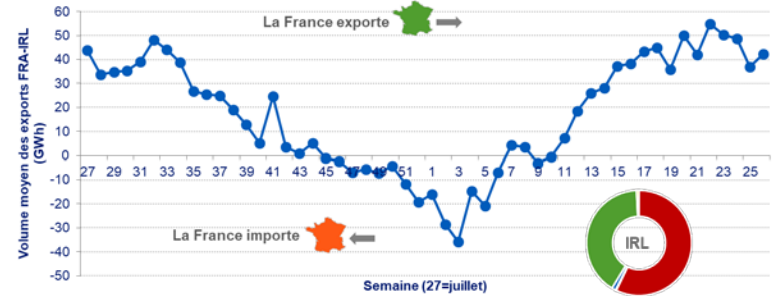
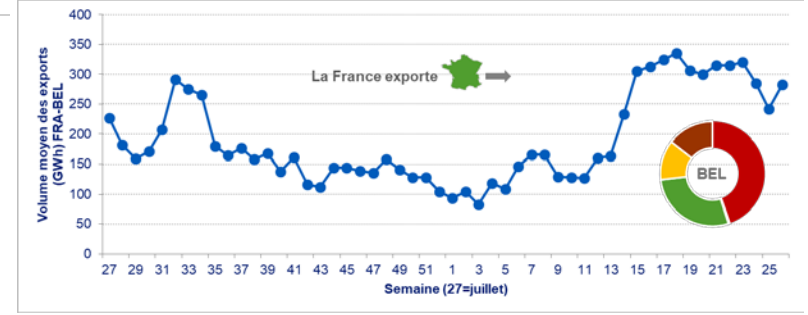
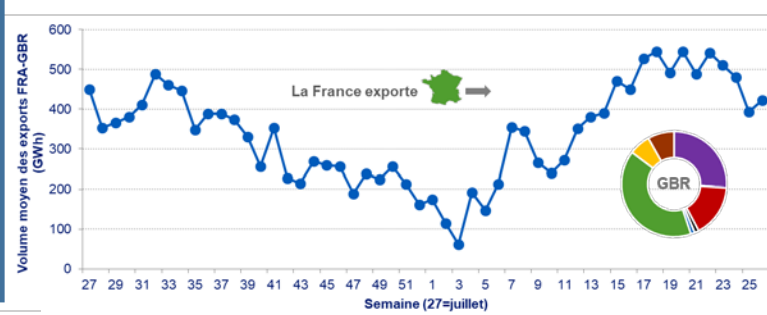
La France est fortement exportatrice avec un parc installé de 54 GW et reste exportatrice avec un parc installé de 34 GW



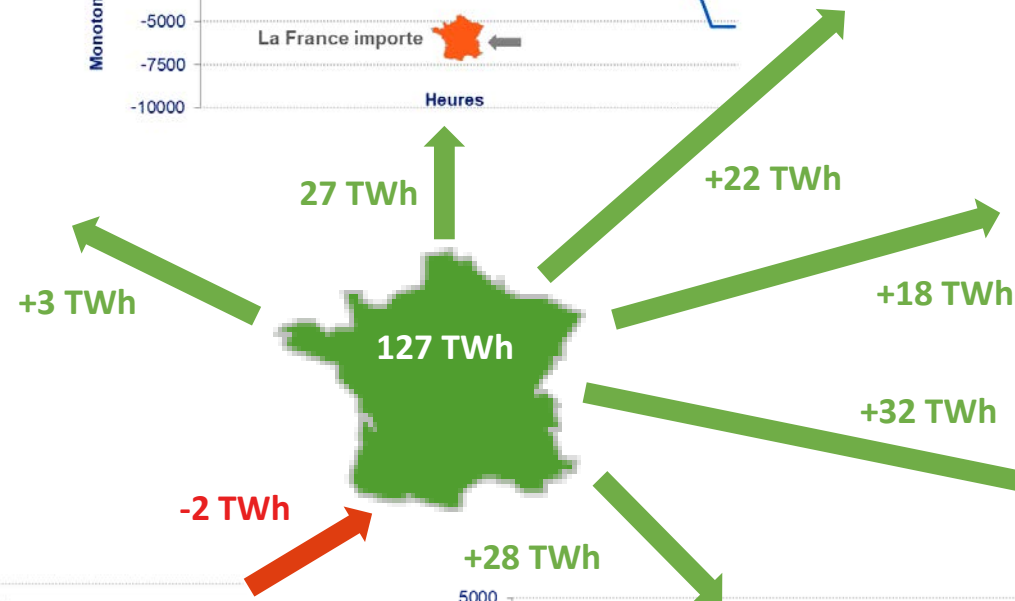
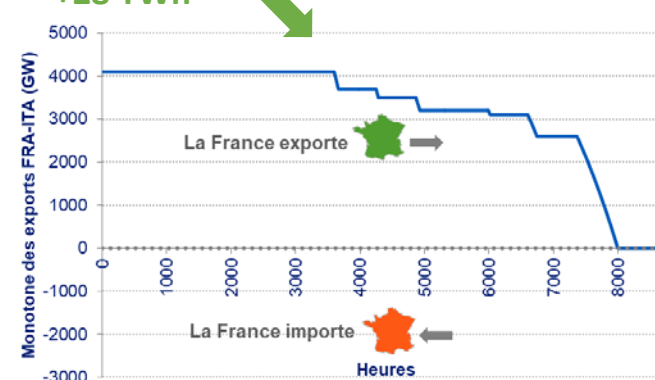
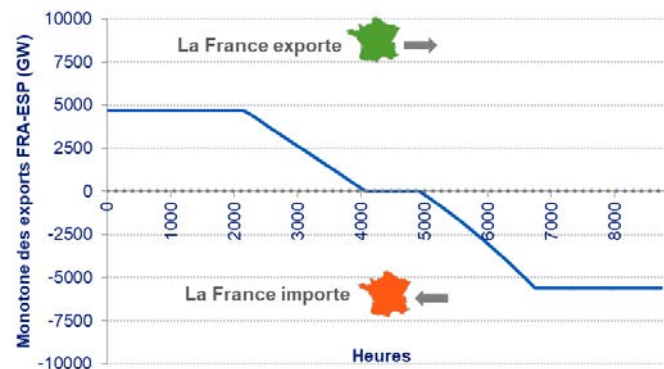
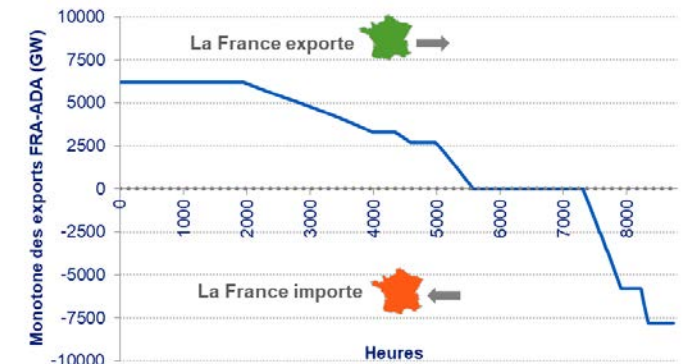
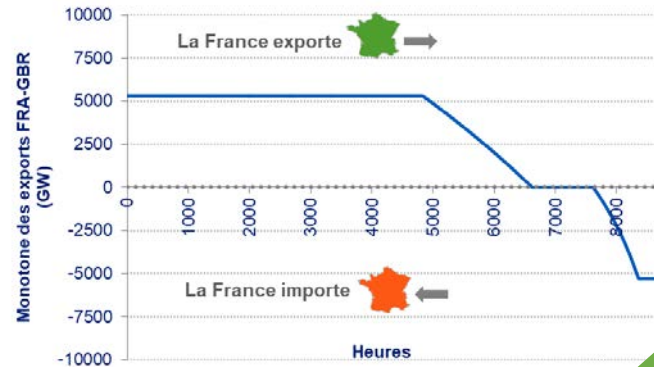
La France est importateur net
d'Espagne et d'Allemagne, mais
trouve des débouchés importants
sur l'Angleterre et l'Italie



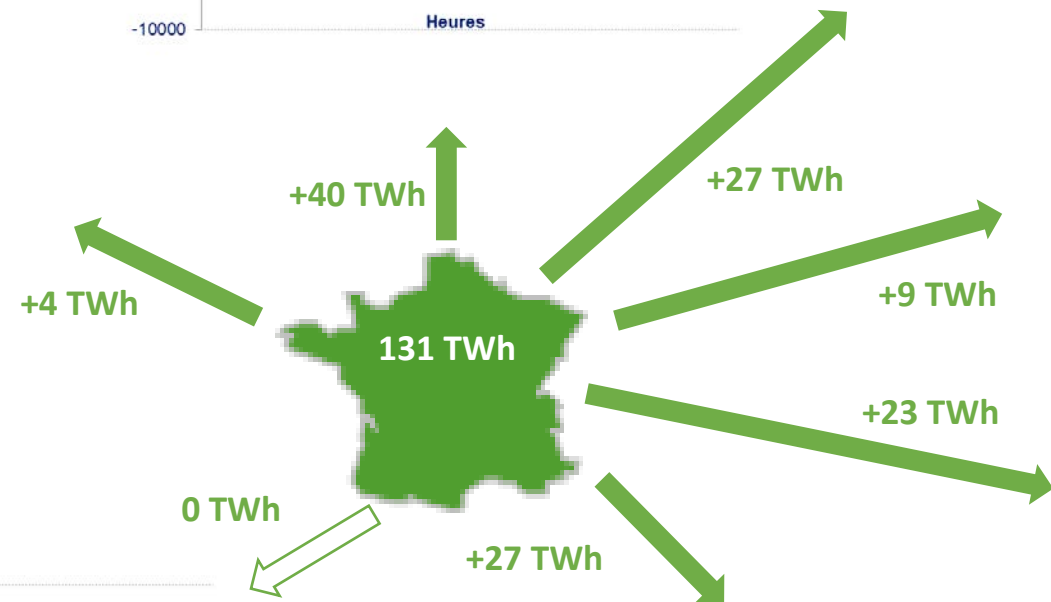
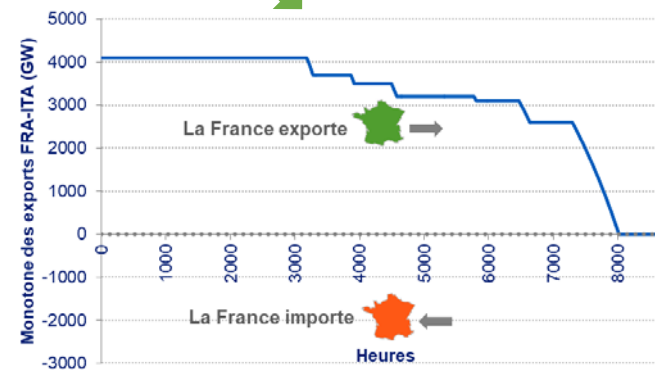
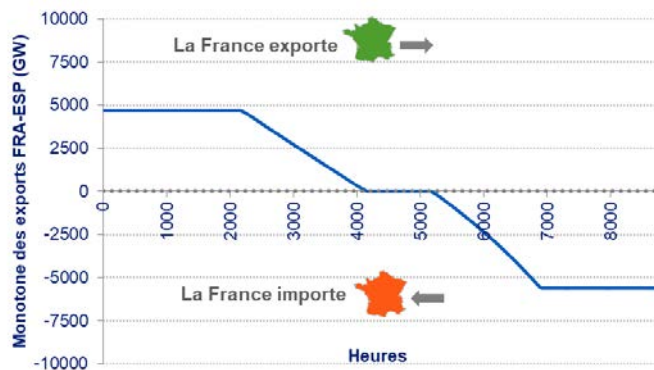
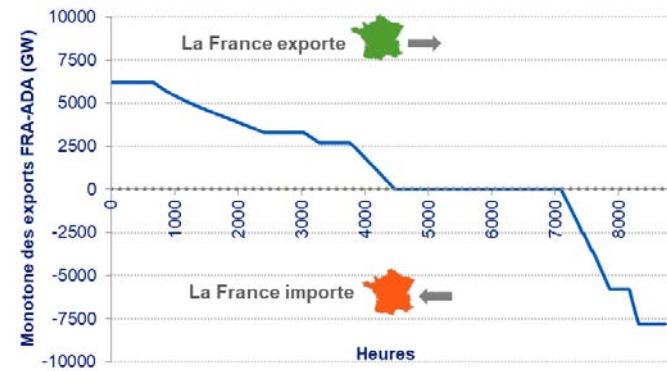
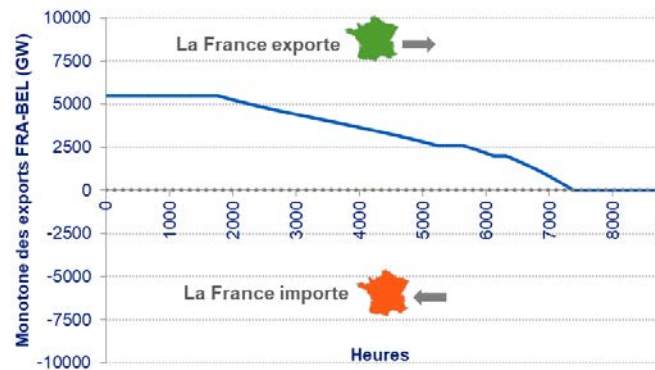
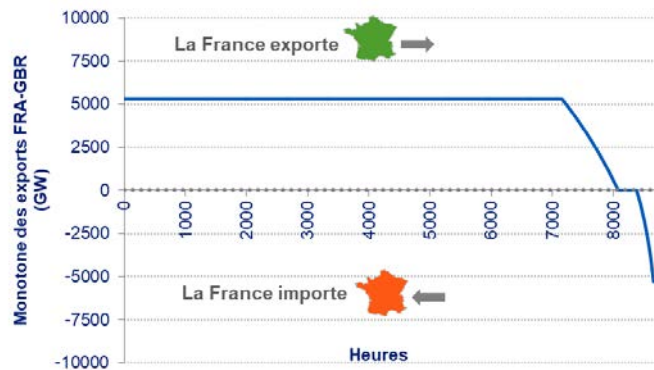
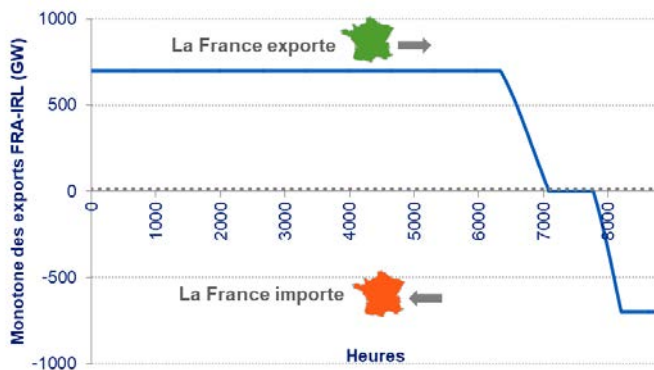
La France est importateur net d'Allemagne pendant l'hiver électrique et d'Irlande sur les premières semaines de Janvier. Elle est importateur net d'Espagne d'Octobre à Juin



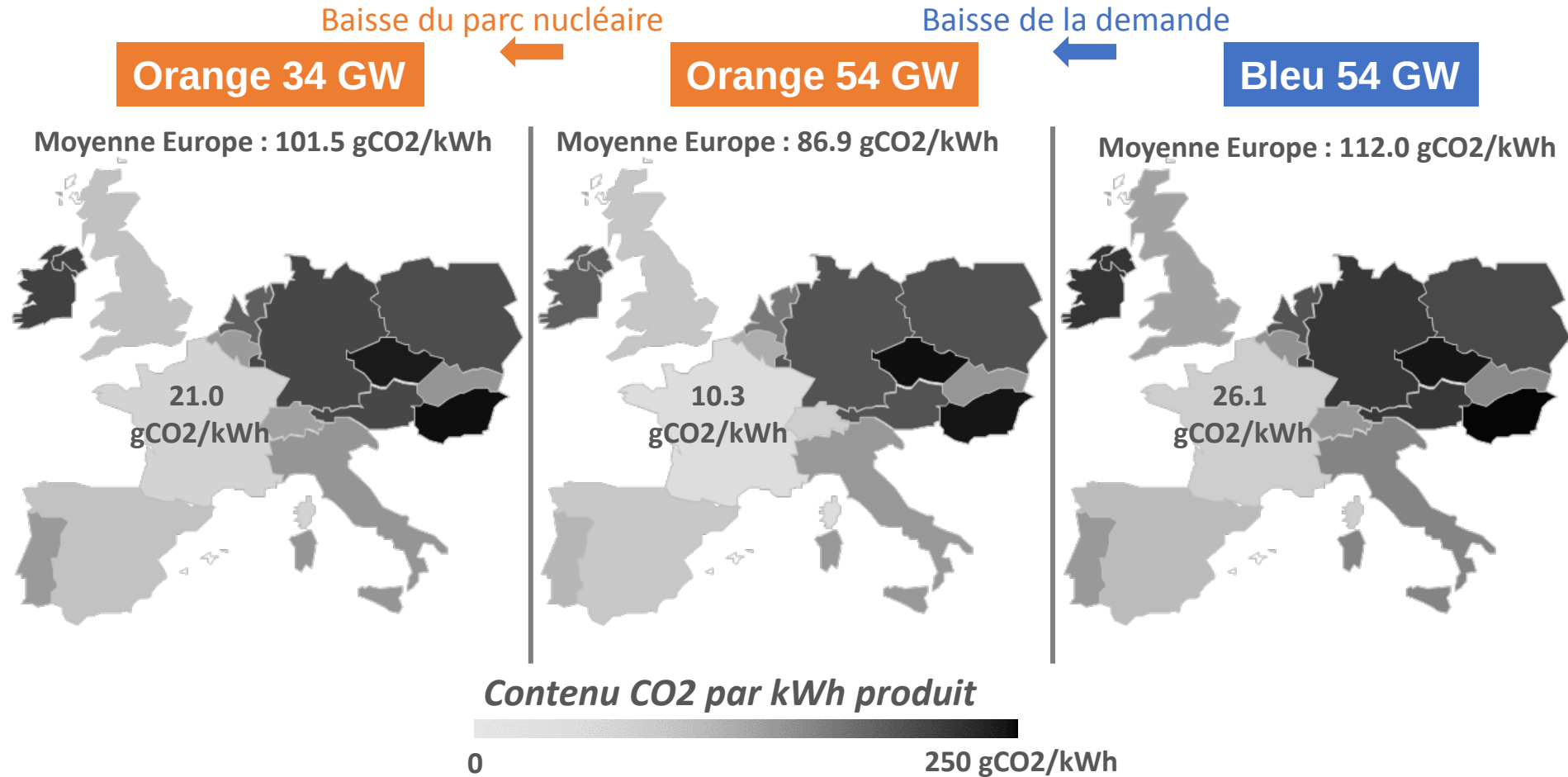
La France reste importateur net d'Espagne et exporte fortement vers les autres pays.



La France est exportateur net sur toutes ses frontières, à l'exception de l'Espagne. Le volume échangé avec l'Allemagne baisse alors que celui échangé avec la Grande-Bretagne augmente fortement, les autres échanges restant constants.

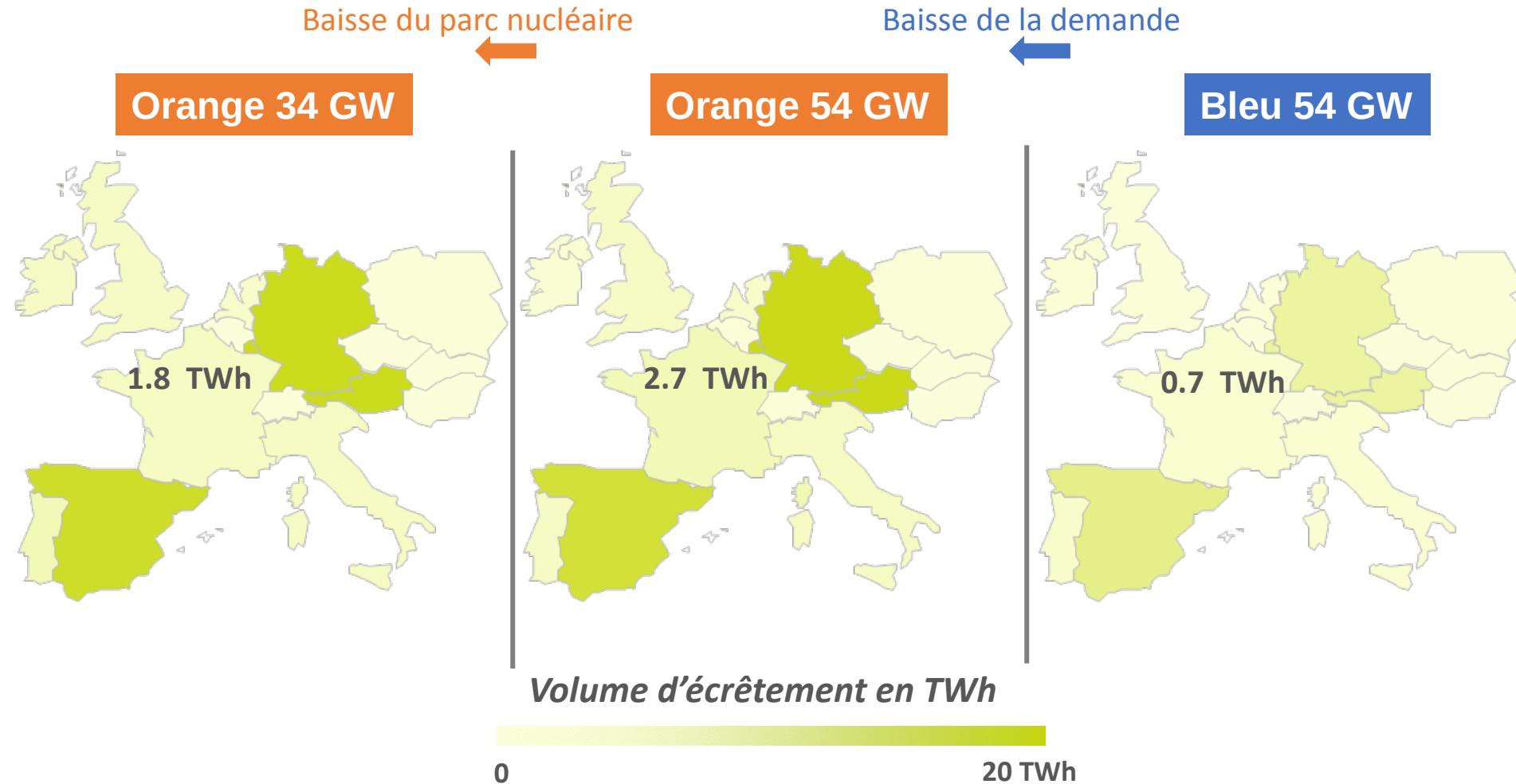


La France conserve des émissions directes par kWh produit parmi les plus faibles d'Europe



Une baisse de la capacité nucléaire installée en France augmente le contenu carbone européen.

Les volumes d'écêtement en France restent modérés par rapport aux pays voisins



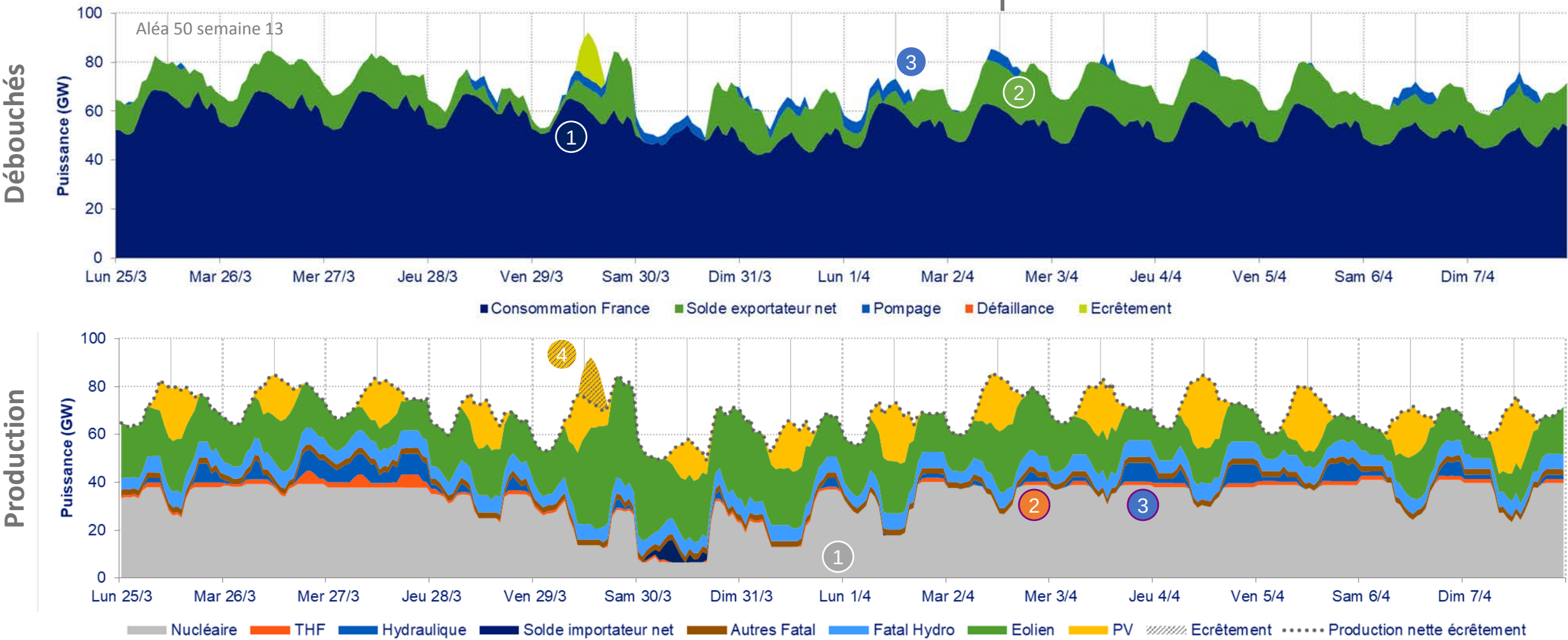
Différents leviers de flexibilité sont mobilisés dans la simulation

Périodes de creux de demande résiduelle

Périodes de pointe

- 1 Profil demande électrique
- 2 Exports
- 3 Stockage hydraulique
- 4 Ecrêtements

- 1 Nucléaire
- 2 THF
- 3 Hydraulique
- 4 Achats

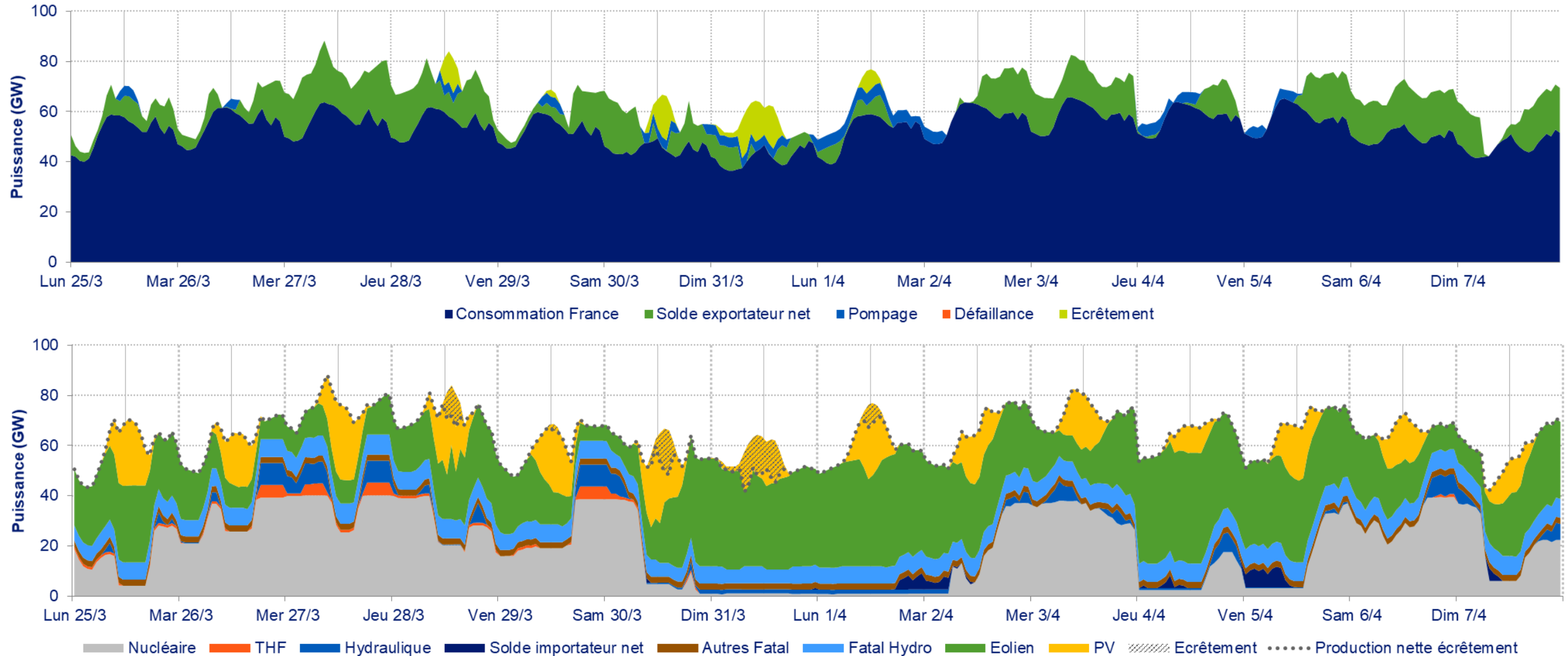


Eclairage sur les études de scénarios menées

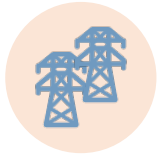
Orange 54 GW

Semaine difficile sur scénario difficile : arrêt presque total de la production nucléaire sur 3 jours et besoin de puissance sur les heures nocturnes

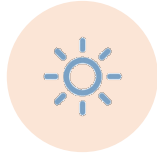
Scénario 36 semaine13



Messages de la présentation



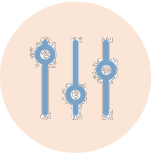
- La **production décarbonée française** trouve des **débouchés** à l'**export** malgré les volumes **EnR** relativement **importants installés** dans les **pays voisins**



- La **production solaire européenne** a un impact majeur sur la **modulation** du parc **nucléaire français**
 - Les **heures méridiennes** deviennent des heures sur lesquelles la **modulation** du parc **nucléaire** est **maximale** sur toute l'année. En **hiver**, le parc nucléaire **module également** mais **plus faiblement**.



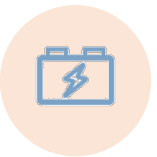
- Assurer l'**équilibre dynamique** du **système** conduit à **écrêter** une **faible proportion** d'**EnR**
 - L'**écrêtement** pour **sécurité** du **réseau** qui pourra être important avec les volumes EnR considérés n'est **pas modélisé**



- Un **empilement** des moyens de production par **coûts croissants** ne garantit **pas** la **stabilité** du **système** sur les **situations extrêmes**



- Le **niveau** et le **profil** de la **demande** ont un **impact** majeur sur le **fonctionnement** des **tranches nucléaires**
 - sur les **tranches en marche**, les **arrêts de tranches**, le **fonctionnement** du parc, la **modulation**, et les **butées de baisse**



- Le **stockage** par **batterie** permet de **lisser** la **production solaire européenne** et **augmente** la **valeur captée** par le **PV**



- Une **part importante** du parc **nucléaire démarré** peut être amenée à **assurer** de la **fourniture de Services Système électrique**.