Etude sur la modulation

Impacts industriels, organisationnels et sociaux

Octobre 2026



Sommaire

1. La modulation : définitions

2. Le contexte et les évolutions récentes du système électrique

3. L’étude d’EDF sur la modulation de son parc de production

4. Le rôle du nucléaire dans la stabilité et l’équilibre du réseau

1.

La modulation : définitions

La modulation désigne tout fonctionnement d'un réacteur nucléaire à une puissance inférieure à sa puissance maximale disponible ou son arrêt

(en-dehors des arrêts pour rechargement du combustible, maintenance, fortuit ou encore des limitations liées aux contraintes environnementales ou réglementaires)

Une pratique historique

La modulation est encadrée par les règles générales d'exploitation, code de la route de l'exploitant nucléaire.

- Les variations de puissance peuvent se faire à raison de deux fois par jour maximum conformément aux études de sûreté, et ce jusqu'à environ 2/3 d'avancement du cycle combustible.

Par exemple, la puissance d'un réacteur de 1300 MW peut passer de 100 % à 20 %, ce qui représente une variation de 1000 MW, en 30 minutes.

- La modulation n'a pas d'impact direct sur la sûreté nucléaire. Les conditions de sa réalisation sont pleinement intégrées dans le rapport de sûreté des installations.



2

variations de puissance par jour

2.

Le contexte & les évolutions récentes du *système électrique*

Un système électrique qui évolue

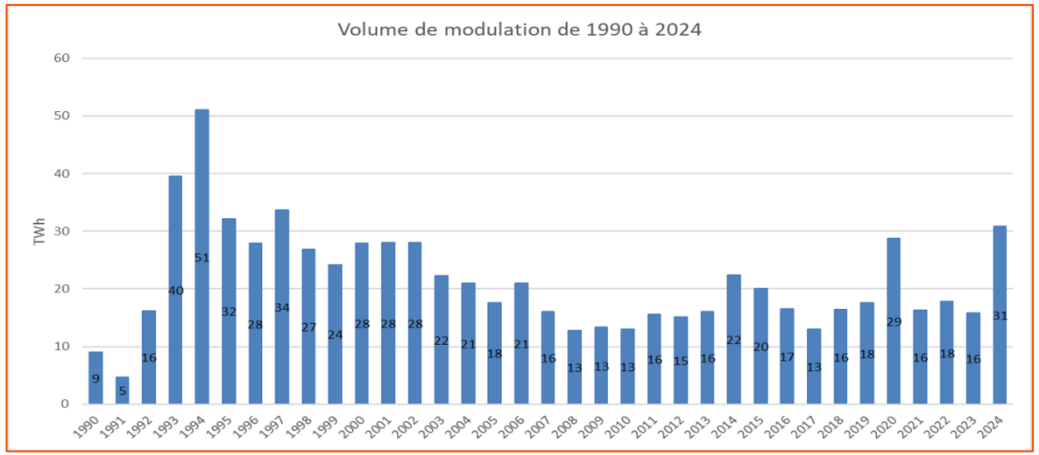
De 1993 au début des années 2000 : une surcapacité conjoncturelle

Mise en service des derniers réacteurs nucléaires, avec une consommation évoluant plus lentement et des interconnexions encore peu développées.

Début des années 2000 à 2023 : un équilibre relatif

Hausse de la consommation : système électrique français globablement équilibré et pas de manque de débouchés pour raison économique.

➔ ***Modulation*** (~15 à 20 TWh / an sauf 2020).



Le tournant de l'année 2024

Au sortir des crises successives (pandémie, conflit russo-ukrainien, crise énergétique, CSC), le système électrique devient surcapacitaire pour différentes raisons :

- Une consommation électrique atone, qui reste inférieure de 6 à 8% à son niveau moyen de la période 2017/2019.
- Un fort développement de nouveaux moyens de production renouvelables en France et en Europe.
- Une meilleure disponibilité du parc nucléaire.

➔ ***Modulation importante :*** plus de 30 TWh en 2024, soit un doublement par rapport à la moyenne 2005/2023. En 2025, le parc nucléaire a modulé à hauteur de 33 TWh, dont près de la moitié pas manque de débouchés.

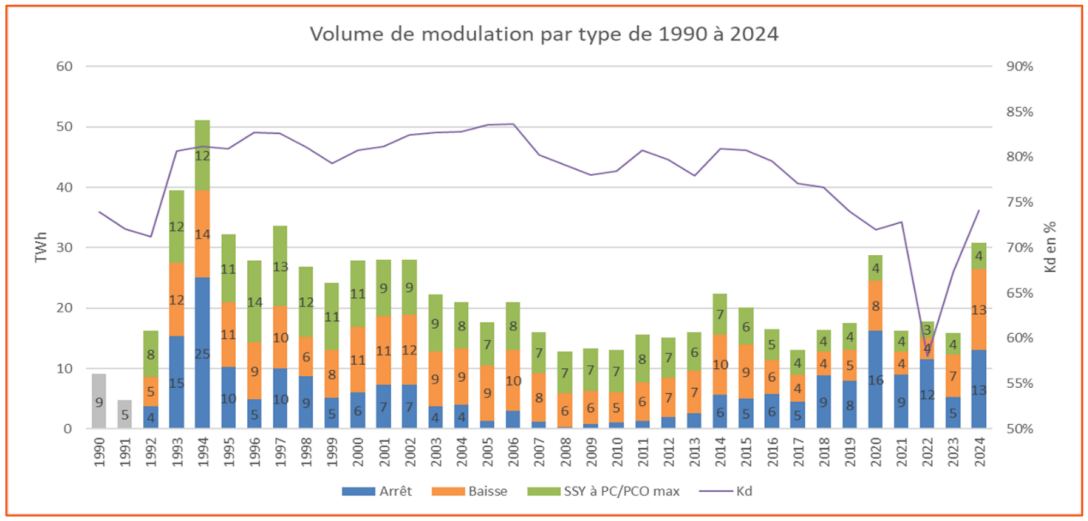
Une modulation différente dans son volume et sa nature

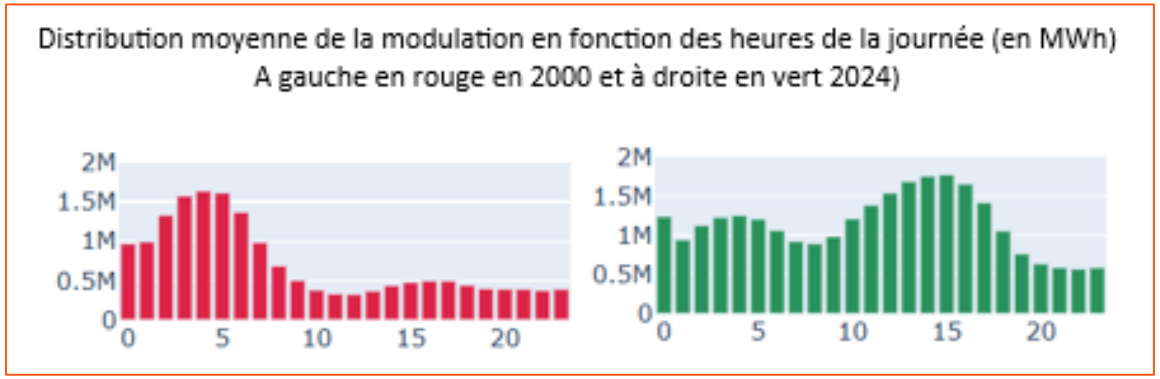
Historiquement :

- Variations de puissance lors des creux de consommation principalement la nuit et le week-end.

Aujourd'hui :

- Modulation également au cours de la journée, lors des périodes de forte production solaire.
- De manière plus fréquente, la modulation peut amener à l'arrêt de réacteurs.





3.

L’étude d’EDF sur la modulation de son parc de production

Impacts industriels, économiques et sociaux



Face à l’évolution croissante de la modulation de son parc de production d’électricité, EDF, en tant qu’exploitant responsable, a mené une étude ***afin d’en évaluer les impacts industriels, économiques et sociaux***.

Les impacts industriels

Il n'existe pas d'impossibilité technique à faire fonctionner notre parc de production dans ces conditions mais nos installations sont davantage sollicitées : variations de puissance plus fréquentes, arrêts plus nombreux, cycles d'exploitation moins linéaires. **La modulation n'a pas d'impact direct sur la sûreté nucléaire**.

Sollicitation plus importante des matériels

Les équipements concernés sont situés essentiellement en **partie non nucléaire des installations :**

- matériels tournants (pompes pour injecter de l'eau dans les générateurs de vapeur).
- matériels en lien avec la turbine et l'alternateur : organes, gros robinets qui régulent la vapeur dans la turbine pour adapter la puissance.

Dossiers de situations

A la conception des installations, un nombre maximal de « situations » (c'est-à-dire de variation des paramètres de fonctionnement de la chaudière nucléaire entraînant une sollicitation mécanique) est défini. L'augmentation de la modulation peut rapprocher certains réacteurs de leurs limites de comptabilisation.

Consommation accrue de ressources

La modulation plus importante entraîne une **hausse de la consommation de produits** comme la lithine, le bore, l'eau et les filtres, augmentant les dépenses opérationnelles.

Sollicitation des systèmes de traitement

Les **systèmes de traitement des effluents et de production d'eau** sont davantage sollicités, nécessitant une accélération et un renforcement des investissements en maintenance et en équipements.

Les impacts sociaux

Planification plus complexe

Le caractère parfois imprévisible de la modulation rend la **préparation des opérations en salle de commande** plus délicate pour les équipes d'exploitation.

Adapation des programmes de maintenance

Les variations de puissance peuvent nécessiter des ajustements dans la programmation des activités de maintenance, avec des **effets sur leur organisation.**

Mobilisation des équipes

Les équipes de **conduite, de chimie et d'automatismes** sont davantage sollicitées, parfois en-dehors des horaires habituels, ce qui peut impacter leur rythme de travail et l'attractivité de ces métiers.

Entraînement des équipes

La modulation étant un **transitoire sensible**, elle doit être **préparée avec rigueur** et nécessite des entraînements réguliers des équipes.

L'exploitation nucléaire repose sur des standards internationaux exigeants. L'imprévisibilité des variations de puissance complique la préparation et l'entraînement des équipes, imposant une révision des organisations et des modes de travail, tout en respectant les standards de sûreté.

Les impacts / Thermique et hydraulique

Impact sur les cycles combinés gaz (CCG)

Le mode de fonctionnement des cycles combiné gaz (CCG) du parc thermique a sensiblement évolué ces dernières années avec un doublement du nombre d'arrêts/démarrages (30/40 démarrages/an en 2021-2023 vs 80-100 démarrages/an en 2024 et en 2025) et une diminution sensible de leur durée de fonctionnement (de 4000 à 7000 heures/an/tranche à un fonctionnement d'environ 1500 à 3000 heures/an/tranche).
Le programme de maintenance lourde des TAC étant piloté par le nombre de démarrages, le rythme des inspections majeures s'est accéléré et suit de façon quasi-proportionnelle le nombre de démarrages.

Cette flexibilité accrue demandée aux installations du parc thermique d'EDF engendre une augmentation du nombre d'opérations de maintenance longues et précoces et donc du coût des cycles de maintenance sur les installations (de 18 à 20 %).

Impact sur les Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

L'intégration croissante de la production renouvelable dans le mix électrique national entraîne un besoin accru de flexibilité pour équilibrer le réseau. Les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) sont en première ligne pour absorber les fluctuations de production et répondre aux besoins du système électrique. Cette évolution se traduit par une hausse marquée des heures de fonctionnement et une intensification des cycles (pompage–turbinage, variations infra-horaires, séquences de modulation).

La flexibilité accrue demandée aux installations se traduit par une augmentation mécanique de l'usure des turbines, alternateurs, transformateurs et systèmes de régulation. Dans ce contexte, les projections de dépenses de maintenance des six STEP d'EDF augmentent significativement.

4.

Le rôle du nucléaire dans la stabilité et l’équilibre du réseau

Le rôle du nucléaire dans la stabilité et l'équilibre du réseau

La stabilité du réseau électrique et les capacités des machines synchrones à garantir la tension et la fréquence

Le black-out du 28 avril 2025 dans la péninsule Ibérique illustre la difficulté de maintenir la stabilité du système électrique en période de forte production renouvelable, ainsi que la nécessité de disposer de moyens pilotables capables d'assurer les services système (réglage de la tension et inertie). Les machines synchrones des parcs de production d'EDF assurent un rôle fondamental pour la robustesse du système électrique européen.

Ainsi, le 30 juillet 2025, RTE a demandé à EDF de maintenir en fonctionnement un réacteur à Civaux, deux au Blayais et un à Golfech pour garantir la tenue de la tension du réseau.

Le maintien en fonctionnement de réacteurs nucléaires contribue à l'inertie de la plaque continentale européenne, et cela nécessite un suivi particulier pour assurer durablement la stabilité du système électrique aux niveaux français et européen. Les groupes nucléaires et hydrauliques ont la capacité de maintenir leur vitesse de rotation et, par conséquent, la fréquence du réseau au plus proche de sa valeur nominale de 50 Hz, même en cas de forte perturbation.

L'équilibre du réseau

Pour assurer l'équilibre du système électrique, il est souvent nécessaire de faire fonctionner à pleine puissance l'ensemble des réacteurs disponibles sur la pointe du matin et sur la pointe du soir. Ce fut le cas durant plusieurs semaines lors de la période de grand froid de de fin 2025 / début 2026.


Merci


















ORGANISATION D'UNE BAISSE DE CHARGE DANS UNE SALLE DE COMMANDE D'UN REACTEUR NUCLEAIRE

JEAN-MARIE BOURSIER – Direteur Adjoint Technique – Division Production Nucléaire

Être un acteur de l'éthique du groupe



CHARTE ÉTHIQUE GROUPE

Chaque salarié s'engage à traiter de façon responsable les informations qu'il détient dans le cadre de son travail et à respecter les règles de sécurité et de confidentialité, en particulier pour les informations classées C=2 « restreint » ou C=3 « confidentiel »

BONS RÉFLEXES

Rester discret et vigilant dans les lieux publics
Utiliser un disque dur sécurisé par STORMSHIELD sur vos ordinateurs portables

C0 OU INFORMATION « LIBRE »

L'information de niveau C0 n'implique aucune obligation de protection particulière.

C1 OU INFORMATION « INTERNE »

L'information est destinée à être traitée dans un périmètre défini (DPNT, …). Elle peut être partagée avec des externes si l'accès à cette information leur est nécessaire.

C2 OU INFORMATION « RESTREINT »

L'accès de l'information est limité à des personnes ou à un périmètre restreint lié à une activité. Elle peut être partagée avec des externes dès lors que l'accès à cette information leur est nécessaire. Ce partage avec des externes est encadré par une clause de confidentialité et de protection des informations, permettant de garantir l'accès aux données aux seules personnes autorisées. La liste des personnes, ou groupes de personnes autorisées, est mentionnée sur le document. Le C2 est à envoyer par mail « chiffré ». La mention « restreint » est à inscrire sur toutes les pages.

C3 OU INFORMATION « CONFIDENTIEL »

L'accès à l'information est limité à des personnes nominatives en fonction du « besoin d'en connaître ». La rediffusion d'un document confidentiel est soumise à l'accord du rédacteur. Le C3 est à envoyer par mail « chiffré » et le document doit être chiffré par STORMSHIELD permettant de garantir l'accès aux données aux seules personnes autorisées. La mention « confidentiel» est à inscrire sur toutes les pages.

ACCESSIBILITE : INTERNE
Copyright EDF SA – 2025. Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite

BAISSE DE CHARGE – PREPARATION EN SALLE DE COMMANDE

Décision de baisse de puissance (demande réseau pour maintien de l'équilibre offre demande, contrainte technique, essais). Deux types de baisse existent :

- **Baisse profonde** : ajustement de la production en fonction de la consommation *(ex : cloche solaire, pic éolien)* < 80% de sa puissance maximale
- **Baisse modérée**: quelques % de la puissance maximale permettant ainsi au réseau par régulation d'assurer du réglage de fréquence, le 50 Hz.

Analyse de l'état de la tranche – préparation du transitoire :

- **Appropriation des procédures**
- **Réacteur : calcul des débits d'eau et de bore pour maintenir le point de fonctionnement dans le diagramme de pilotage établi par les études de sûreté.**
- **Les circuits : disponibilité des systèmes support tels que les circuits de traitement des effluents, réserve d'eau et de bore, du circuit secondaire (ex: régulation des niveaux des générateurs de vapeur)**
- **Sûreté : pas d'indisponibilité sur l'installation interdisant le suivi de charge, point de fonctionnement du cœur permettant la baisse de charge.**

Coordination entre opérateurs réacteur, secondaire pour assurer toujours l'équilibre P1/P2 pendant le transitoire. La maitrise de la puissance primaire dite P1 est prioritaire.

Application des procédures d'exploitation en vigueur

ACCESSIBILITE : INTERNE
Copyright EDF SA – 2025. Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite

BAISSE DE CHARGE – EXECUTION ET SURVEILLANCE

Réduction de la baisse de charge dans le respect d'un diagramme de pilotage défini par les études de sûreté:

Application d'une pente de baisse de charge sur la régulation turbine (40MW/minute) qui est la pente contractuelle avec RTE. D'autres pentes sont possibles: 5, 15, 30 MW/minute et peuvent être employées lors d'impositions de limitations sur le réacteur.

Ajustement des systèmes de contrôle (réacteur et turbine) – Enjeu de l'équilibre primaire-secondaire :

Les groupes de compensation de puissance (grappes) asservis au secondaire s'insèrent dans le cœur à une côte définie lors des essais neutroniques (X MW = X puissance electrique). Un autre groupe de régulation dit « groupe R » vient lui corriger les écarts de température dans le cœur et permettre de positionner le point de fonctionnement du cœur dans le digramme de pilotage.

Surveillance continue des paramètres clés et marges de sûreté

Sérénité de la salle de commande, surveillance des paramètres sensibles (point de fonctionnement du cœur, comportement des régulations secondaire niveau des générateurs de vapeur notamment et des matériels).

Stabilisation de la tranche au nouveau palier.

Une surveillance du cœur est à assurer au palier atteint car le Xenon, produit de la fission neutrophage, va croitre. Des actions de dilution puis de boration par l'opérateur primaire vont alors être nécessaire selon la durée du palier pour maintenir le point de fonctionnement dans le diagramme de pilotage

ACCESSIBILITE : INTERNE
Copyright EDF SA – 2025. Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite


















eDF

MERCI DE VOTRE ATTENTION