

Louvain School of Management

Approvisionnement énergétique : quelles garanties offre l'énergie nucléaire, et sa production propre ?

Cas belge - étude quantitative

Auteur : Lucas Preux
Promoteur : Daniel De Wolf
Année académique 2023 -2024
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de
Master (60) en Sciences de Gestion
Horaire décalé

Résumé

La sécurité d'approvisionnement électrique est un sujet d'actualité en Belgique. La part de cette électricité provenant des centrales nucléaires fait systématiquement débat, et aucun *consensus* politique ou scientifique ne semble se dégager.

L'objectif de ce travail est d'évaluer si, oui ou non, la production d'électricité via la filière nucléaire est nécessaire à la sécurité d'approvisionnement en électricité. Et si oui, dans quelle mesure ? La présence d'un programme nucléaire civil est-elle une garantie d'éviter un blackout ?

Mots-clés : *Supply Chain, Electricity, Blackout, countertrading, load management*

Abstract

Electricity's supply chain is subject of various conversations in Belgium. Part of this electricity produced from nuclear plants is largely discussed, while no scientific or political *consensus* seems to emerge.

The aim of this TFE is to evaluate whether, yes or no, the electricity produced through nuclear plants is a guarantee to electricity supply safety? And if yes, to which extend? Is a civil nuclear program a guarantee to avoid **blackouts** for citizens ?

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Mr De Wolf, promoteur du présent travail, pour avoir accepté de m'accompagner dans ce travail, ainsi que pour sa disponibilité, son suivi rapide et efficace et ses conseils toujours pertinents. Sa connaissance du sujet a été prépondérante dans la réalisation et l'orientation de ce travail.

Merci également à l'ensemble des personnes m'ayant soutenu dans la réalisation, en particulier ma compagne, pour son écoute inconditionnelle et l'aide apportée au quotidien.

Avant-Propos

L'énergie nucléaire est le sujet de nombreux débats dans l'espace public et l'importance de celle-ci dans le cadre de la sécurité d'approvisionnement énergétique est largement discutée, particulièrement lors des hivers rudes (Marise, 2022). De manière générale, la menace de mesures de délestage électrique est souvent évoquée, et des informations sont aisément accessibles à un large public via le site web de Sibelga, gestionnaire du réseau électrique bruxellois (Sibelga, « *Pourquoi un délestage ?* » Consulté le 17/01/2024)

D'un côté, l'ensemble des citoyens belges ont pu constater lors de ces dernières années que les 7 réacteurs nucléaires belges (4 à Doel, 3 à Tihange) ont parfois – voire souvent été mis à l'arrêt (de manière planifiée ou non), et ce sans devoir procéder à des mesures de délestage.

D'autre part, le gestionnaire de réseau à haute tension (Elia), plaide également pour obtenir davantage de « flexibilité énergétique », notamment liée à l'avènement des nouvelles technologies, comme la voiture électrique pour les particuliers, ainsi que l'essor des modes de production d'électricité renouvelables, dont la production est plus variable (Elia, « *Etude sur l'adéquation et la flexibilité en Belgique (2023-2024)* » Consulté le 17/01/2024). Cette flexibilité énergétique est, par exemple, atteinte par des contrats dits « interruptibles », qui consistent à accorder des tarifs avantageux aux différents industriels grands consommateurs d'électricité, en échange d'un accord de leur part pour arrêter leur consommation – ou l'augmenter selon les cas.

Une dualité est donc observée, avec, d'un côté, un ensemble de mesures complexes et hypothétiques qui sont prêtes à être mises en œuvre et dont l'occurrence est régulièrement évoquée (délestage, interruptibles), et de l'autre, une absence quasi-totale de pénurie d'électricité pour le citoyen belge, malgré les arrêts fréquents des réacteurs nucléaires belges.

L'objectif du travail sera donc de tenter de répondre à la question suivante :

La production d'électricité nucléaire est-elle une garantie pour l'approvisionnement du consommateur en Belgique ?

Ce travail se focalisera sur le cas de la Belgique mais utilisera de manière ponctuelle des comparaisons avec des situations dans des pays étrangers et frontaliers.

Table des matières

1.	Introduction.....	1
1.1.	Un peu d’histoire & contexte	1
1.2.	Cas de la Belgique : force(s) en présence.....	1
1.3.	Différents types de production d’électricité et « mix énergétique ».	2
1.4.	Une continuité de production également variable	2
1.5.	Une particularité physique : l’absence de stockage (à grande échelle)	3
2.	Mécanismes d’équilibrage offre-demande	6
2.1.	Flexibilité de l’offre	6
2.2.	Flexibilité de la demande	6
2.3.	Stockage d’électricité.....	7
2.4.	L’interconnexion des réseaux	7
2.5.	Le délestage.....	7
3.	Source de données	9
3.1.	Production, importations et exportations d’électricité	9
3.2.	Recours aux mécanismes d’équilibrage.....	9
3.3.	Périodes d’indisponibilité des centrales nucléaires	9
4.	Liens entre production, importations et exportations	11
4.1.	Production, importation et exportation d’électricité : Belgique, 2015-2021.....	11
4.2.	Production, importation et exportation d’électricité : Portugal, 2015-2021	13
4.3.	Production, importation et exportation d’électricité : Autriche	14
5.	Liens entre les périodes d’arrêt des centrales belges et le recours aux mécanismes d’équilibrage	16
5.1.	Compilation des données : périodes d’arrêt des centrales nucléaires belges	16
5.2.	Recours aux différents mécanismes d’équilibrage	18
5.3.	Recours au mécanisme d’équilibrage : données	20

6.	Réserve stratégique : concept et analyse.....	23
6.1.	Réserve stratégique : concept et définition	23
6.2.	Données et analyse	24
7.	Comparaison : données sur l'électricité générée à partir de gaz naturel	25
7.1.	Quantités produites.....	26
8.	Conclusions.....	29
9.	Bibliographie.....	31

1. Introduction

1.1. Un peu d'histoire & contexte

Depuis son émergence, en tant que mode de production industriel d'électricité dans la fin des années 1950 (aux Etats-Unis) et la fin des années 1970 (cas de la Belgique), l'énergie nucléaire fait l'objet de débats et cristallise les opinions. La gestion des déchets radioactifs, générés par les centrales nucléaires, est notamment devenue une préoccupation majeure de la société. De plus, plusieurs accidents industriels graves aux conséquences dramatiques ont continué d'augmenter la défiance vis-à-vis de cette source d'énergie (Tchernobyl, 1986, et Fukushima en 2011).

Cette défiance est néanmoins contrebalancée par le fait que l'énergie nucléaire ne génère pas, ou peu de gaz à effet de serre (Kostková et al., 2013), alors que leurs émissions doivent être réduites afin de respecter les accords de Paris (2016). Pour ses partisans, l'énergie nucléaire est donc une réponse adéquate afin de limiter le réchauffement climatique.

L'approvisionnement en électricité est également devenu un point d'achoppement important entre les partisans de l'énergie nucléaire, qui y voient un moyen sûr et durable de produire de l'électricité, et ses détracteurs, qui arguent que cette énergie n'apporte pas suffisamment de garanties tant d'un point de vue logistique (sécurité d'approvisionnement, période d'arrêts des centrales nucléaires nombreuses et longues) que d'un côté sécuritaire (risques d'accidents nucléaires, rejets radioactifs et traitement final des déchets radioactifs).

1.2. Cas de la Belgique : force(s) en présence

Comme mentionné ci-dessus, ce travail se focalisera sur le cas de la Belgique. En Belgique 7 réacteurs nucléaires ont tous été mis en service entre 1975 et 1985. Parmi ces réacteurs, seuls 5 sont encore en activité à l'heure d'écrire ce mémoire :

- Doel 1, 2 et 4
- Tihange 1 et 3

En effet, les réacteurs de Doel 3 et Tihange 2 ont été définitivement mis à l'arrêt (respectivement en septembre 2022 et juillet 2023), et sans constater de problèmes d'approvisionnement depuis.

1.3. Différents types de production d'électricité et « mix énergétique ».

Ces dernières années, l'appellation « mix énergétique » a fait son apparition dans le champ lexical lié au domaine de l'énergie. Ce mix représente **la répartition de la consommation** d'énergie dans une zone géographique définie, en fonction de son origine (son mode de production). Concernant l'énergie électrique, celle-ci peut être produite de différentes manières :

- Via fission nucléaire
- Via les énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques, biomasse, éoliennes, barrages hydroélectriques...)
- Via combustion d'énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole...)

Certaines de ces sources sont considérées comme faiblement émettrices de gaz à effet de serre (hydroélectrique, éolien, solaire), alors que les autres (qui dépendent donc d'un processus de combustion) ne sont pas considérées comme « vertes ». L'énergie nucléaire peut être qualifiée d'hybride, car dépendant elle aussi de la combustion d'uranium, source non-renouvelable, et dont les effets néfastes sont importants. Néanmoins, l'émission moindre de gaz à effet de serre par rapport aux autres combustions d'énergie fossile lui confèrent un avantage.

1.4. Une continuité de production également variable

Au-delà des catastrophes mentionnées plus haut dans ce travail, certains « impondérables » sont indissociables des différents types d'énergie mentionnés. Il est aisé de comprendre, notamment pour les productions de type éolien ou solaire, que la production électrique dépend directement de facteurs naturels incontrôlables, comme la quantité d'ensoleillement ou la vitesse et la force du vent.

De manière générale, il est commun d'énoncer que les différents modes de production d'énergie renouvelable sont variables en termes de production, c'est-à-dire qu'en fonction du temps et de certains paramètres, la quantité d'énergie produite peut fortement varier. Il est,

par exemple, facilement imaginable qu'un panneau photovoltaïque génère moins d'électricité lors d'une journée très nuageuse que lors d'une journée de fort ensoleillement.

De la même manière, une centrale nucléaire étant un outil d'une grande complexité, les arrêts non-planifiés ne sont pas rares. Ce point sera discuté et analysé en détail dans la suite de ce travail.

1.5. Une particularité physique : l'absence de stockage (à grande échelle)

Bien que l'énergie électrique soit maîtrisée depuis un laps de temps important, la chaîne d'approvisionnement (*supply chain*) de cette énergie présente une particularité importante : celle-ci ne peut pas être stockée (ou du moins dans des quantités suffisantes) (Di Cosmo et al., 2020). Cette particularité génère alors une contrainte extrêmement importante : **à tout moment, la production d'électricité doit être égale à sa consommation.**

Cette contrainte dans la gestion de l'approvisionnement en électricité est importante car la demande varie fortement en fonction du temps : ainsi, la demande en électricité est maximale en début de soirée lorsque les gens rentrent chez eux, alors qu'elle est plus faible lorsqu'ils se trouvent à l'extérieur (par exemple, au travail), ceci est illustré par la figure 1, qui regroupe les données collectées pour l'Irlande et la France (AleaSoft, 2016).

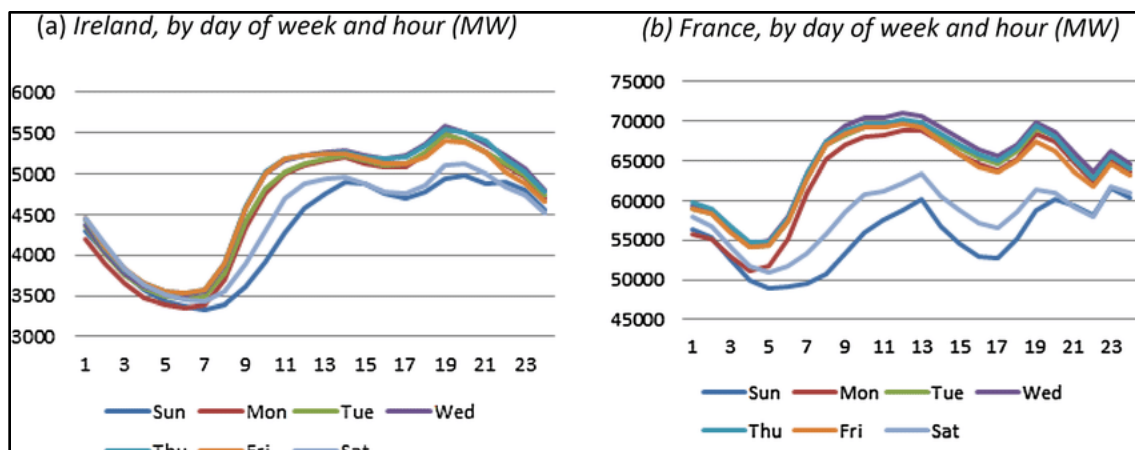


Figure 1 : Consommation d'électricité en fonction de l'heure. Source : AleaSoft, 2016.

En plus de cette variation de demande à l'échelle de la journée, on observe par ailleurs une variation à l'échelle de l'année : la demande est bien plus importante en hiver, lorsque le besoin de se chauffer est accru, qu'en été. Ceci est illustré par la figure 2 (AleaSoft, 2016).

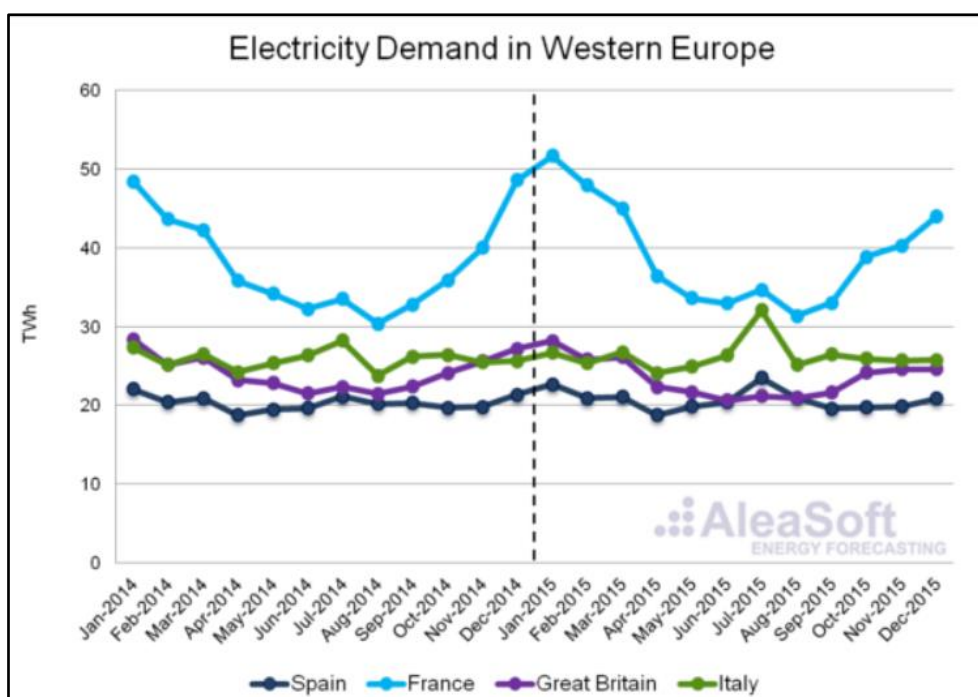


Figure 2 : Variation de la demande d'électricité - échelle annuelle. Source : AleaSoft, 2016

C'est cette contrainte d'équivalence entre la production et la consommation qui provoque craintes et débats concernant la capacité de la Belgique à répondre à la demande en énergie électrique : et plus particulièrement dans le cas d'un pic de la demande.

Ces questions concernant la capacité de réponse à la demande énergétique sont la raison qui nous amènent à traiter la problématique :

La production d'électricité via la filière nucléaire est-elle une garantie d'approvisionnement pour le consommateur ?

Le traitement de ce sujet nous amène naturellement à poser la question de recherche suivante : « Existe-t-il un lien entre la quantité d'électricité produite via la filière nucléaire et la disponibilité de celle-ci pour le consommateur ? ». Néanmoins, les données historiques

concernant la disponibilité de l'électricité pour le consommateur ne figurent pas parmi les données accessibles aux citoyens. Comme décrit plus loin dans ce travail, les mesures de délestage ne sont prises qu'en dernier recours sur ordre du ministre de l'Énergie.

En cas d'activation de cette mesure, le nombre de mégawatts (MW) non distribués, la durée de l'interruption, et autres données nécessaires à l'analyse ne sont pas disponibles.

Néanmoins, d'autres types de données sont accessibles aux citoyens, et la difficulté peut donc être contournée en posant les questions de recherche suivantes :

- Quels sont les moyens de faire face, pour un opérateur de réseau, à un déséquilibre entre l'offre et la demande, en particulier à une demande excédentaire ?
- Y a-t-il un lien entre la quantité d'électricité produite par la filière nucléaire et le recours aux mécanismes de gestion du déséquilibre entre offre et demande ?
- En particulier, y a-t-il un lien entre la quantité d'électricité produite par la filière nucléaire et les importations/exportation d'électricité d'un pays ?
- Y a-t-il un lien entre les périodes d'indisponibilité des centrales nucléaires et les importations ou avec les autres mécanismes de gestion des déséquilibres ?

2. Mécanismes d'équilibrage offre-demande

Afin de se préparer et de répondre de la manière la plus adéquate en cas de pénurie d'électricité, les gestionnaires de réseau, producteurs et le pouvoir politique ont mis en place des mesures qui permettent d'équilibrer la demande et la production. Certains de ces mécanismes sont illustrés en figure 3 (Babatunde et al., 2020).

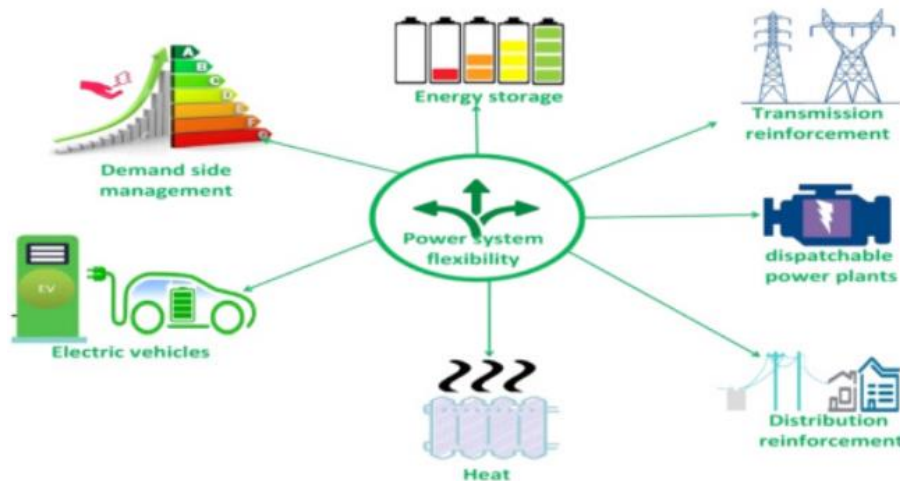


Figure 3 : mécanismes d'équilibrage offre-demande. Source : Babatunde et al., 2020

2.1. Flexibilité de l'offre

La flexibilité de l'offre consiste le plus souvent à brancher ou débrancher du réseau électrique certaines unités de production qui peuvent être aisément déconnectées ou reconnectées au réseau (Degefa et al., 2021). Citons, par exemple, la déconnexion automatique des onduleurs des panneaux solaires lorsque la tension locale du réseau excède la valeur de 253 V, afin d'éviter une surtension.

Au-delà de la simple connexion et déconnexion au réseau, la production de certaines unités peut également être modulée en cas de congestion du réseau : c'est le concept de « redispatching interne »

2.2. Flexibilité de la demande

La flexibilité de la demande est quant à elle induite via une variation des prix de l'électricité, de sorte que le consommateur final modifie son schéma de consommation. Ceci peut être illustré par les compteurs bihoraire : l'électricité étant moins chère la nuit, les ménages

s'adaptent et lancent les procédés qui consomment beaucoup d'électricité en période nocturne.

2.3. Stockage d'électricité

Comme mentionné plus tôt dans ce travail, une caractéristique principale de l'électricité est que celle-ci ne peut être stockée dans des quantités suffisantes pour répondre ensuite aux demandes du marché. Néanmoins, celle-ci peut être stockée en petites quantités, et cette énergie stockée (via les barrages hydroélectriques, par exemple).

Cette quantité peut ensuite être ré-injectée dans le système électrique. Une caractéristique importante des systèmes de stockage est la vitesse à laquelle ils peuvent ré-injecter l'électricité dans le système. Il est à noter que les véhicules électriques peuvent être considérés comme des moyens de stockage. Un autre système de stockage sont les batteries domestiques, qui peuvent stocker, pour les particuliers, l'électricité générée à partir de sources renouvelables (comme les panneaux solaires). Ces batteries permettent de stocker l'énergie excédentaire générée à un instant t et de l'utiliser ultérieurement, lors d'un pic de demande par exemple.

2.4. L'interconnexion des réseaux

L'interconnexion des différents réseaux (« *transmission reinforcement* » dans la figure 3) fait référence à la connexion physique entre les différents réseaux nationaux et internationaux, ainsi qu'à la propriété de l'électricité d'être transférable à très grande vitesse. De cette manière, en cas de perturbation sur un réseau local, les autres réseaux connectés peuvent apporter leur soutien. Cette interconnexion permet ainsi de « lisser » les périodes de stress du réseau en fonction des contraintes locales.

2.5. Le délestage

Le délestage électrique consiste de manière très simple à ne plus approvisionner en électricité certaines zones géographiques en cas de surcharge du réseau (la demande est alors supérieure à la production). D'après le site web du SPF économie, cette mesure est prise sur la décision du ministre de l'Énergie sur recommandation d'Elia (gestionnaire du réseau à haute tension) afin d'éviter un *black out* total (SPF Economie, « *Le plan de délestage et vous* », consulté le 24

Janvier 2024). Cette mesure est utilisée en dernier recours, car c'est elle qui impacte directement les citoyens, ainsi que les industriels.

Ces mesures de délestage sont bien évidemment à éviter le plus possible, car des pénuries d'électricité ont des conséquences économiques très importantes – et constituent bien plus qu'un simple inconfort temporaire.

3. Source de données

Afin de répondre aux questions de recherche établies lors du premier chapitre, il est préalablement nécessaire de compiler une série de données concernant les paramètres suivants :

1. production d'électricité via la filière nucléaire,
2. importation d'électricité,
3. exportations d'électricité,
4. recours aux mécanismes d'équilibrage,
5. périodes d'indisponibilité des centrales nucléaires belges.

Le présent chapitre n'a pas pour vocation de réaliser une analyse de ces données, mais bien d'établir une liste exhaustive des sources des données utilisées lors des prochains chapitres.

3.1. Production, importations et exportations d'électricité

L'ensemble des données mentionnées ci-dessous proviennent de la plateforme *Eurostat* (*EuroStat « Base de données—Energie », consulté le 4 février 2024*), et plus particulièrement de la database « *Flux d'énergie - Données pour les diagrammes Sankey* » dont le code est « *nrg_bal_sd* ».

Eurostat est une agence européenne dépendante de l'UE qui est responsable de la compilation et l'analyse d'une grande variété d'indicateurs pour les 27 pays de l'UE.

3.2. Recours aux mécanismes d'équilibrage

Comme mentionné dans le chapitre 2, plusieurs mécanismes sont disponibles afin d'équilibrer le réseau et gérer ainsi une éventuelle congestion. Ces données sont compilées par Elia, gestionnaire du réseau à haute tension, dans sa propre database, « *OpenData* » (*Elia, « Elia Open Data Portal » consulté le 4 février 2024*).

3.3. Périodes d'indisponibilité des centrales nucléaires

Les périodes d'indisponibilité sont quant à elles compilées à partir de la plateforme « *entso* » (*ENTSO-E « Transparency Platform » consulté le 4 avril 2024*). ENTSO signifie **E**uropean **N**etwork **T**ransmission **S**ystem **O**perator, regroupe, à l'échelon européen, l'ensemble des

gestionnaires de réseau électrique, et propose des bases de données variées. La base de données « *Unavailability of production units* » a été utilisée dans le cadre du présent travail.

4. Liens entre production, importations et exportations

Source des données : Eurostat (*EuroStat « Base de données—Energie », consulté le 4 février 2024*)

Note préalable : sauf mention contraire, les unités utilisés dans ce chapitre sont des kilotonnes équivalent pétrole (KTOE). Il s'agit d'une unité de mesure d'énergie, définie comme la quantité obtenue en brûlant mille tonnes de pétrole

4.1. Production, importation et exportation d'électricité : Belgique, 2015-2021

La figure 4 illustre l'évolution de trois paramètres : la production brute d'électricité nucléaire, l'importation d'électricité et l'exportation de celle-ci.

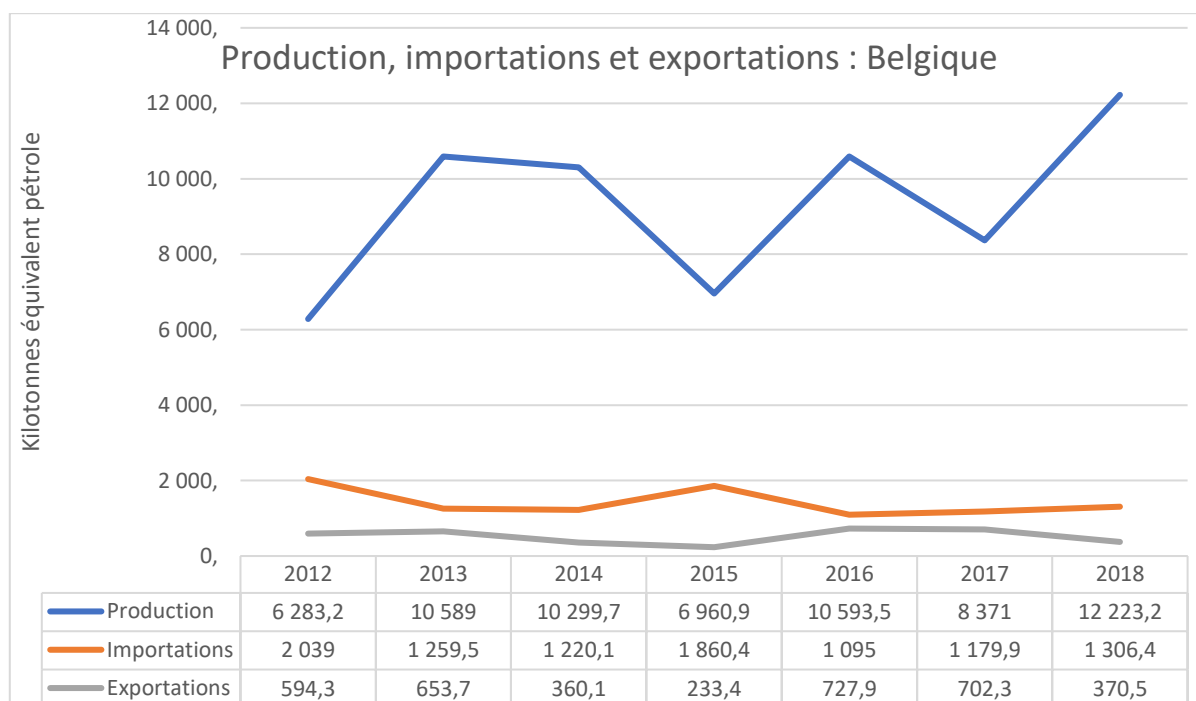


Figure 4 : Production primaire et importations – Belgique. Graphe personnel établi sur base des données Eurostat

Il est possible d'analyser ce graphe de manière visuelle, et de constater que **l'amplitude de la variation est beaucoup plus importante pour la production que pour les importations et exportations.**

Aussi, une **corrélation négative semble se dessiner** : les importations augmentent lorsque la production baisse, ce qui paraît assez logique. Cette corrélation négative est confirmée par un calcul de coefficient de corrélation :

- **-0,79** entre la production et les importations

Ceci permet de conclure qu'il existe un **lien direct et inverse entre la quantité d'électricité produite par le nucléaire et la quantité d'énergie importée** : lorsque l'une augmente, l'autre diminue et vice-versa.

Assez logiquement, le calcul du coefficient de corrélation entre les quantités totales produites et les quantités exportées est lui fortement positif : **0,97**. Ceci signifie que plus la production totale augmente, plus les exportations augmentent.

Il est néanmoins important de mentionner que les données présentées sont des quantités totales par année civile. En optant pour une échelle plus réduite (par exemple, par semaine ou par mois), les transferts pourraient se montrer plus importants. Malheureusement, les plateformes disponibles (Eurostat, Entso.eu) ne permettent pas d'obtenir une ventilation par mois ou par semaine

La Belgique, au même titre que la France, est un pays fortement nucléarisé, avec une production nucléaire importante. Il est intéressant de mettre en regard cette situation avec celle de pays dont le mix électrique est différent. Citons, par exemple :

- Le Portugal, dont la part d'électricité renouvelable est en hausse constante, pour atteindre environ 95%, et ce notamment grâce aux larges champs d'éoliennes présents dans ses eaux territoriales (Euronews, « *Renewables covered 95% of Portugal's power needs last month* »).
- L'Autriche, qui est également un pays comportant une importante production d'énergie renouvelable, principalement grâce aux générateurs hydroélectriques.

4.2. Production, importation et exportation d'électricité : Portugal, 2015-2021

Le Portugal ne possède pas, et n'a jamais possédé de réacteur nucléaire. Le pays s'est plutôt concentré dans le développement des énergies renouvelables, telles que l'éolien et le solaire. Par conséquent, nous allons analyser les 3 paramètres suivants :

- Production d'énergie renouvelable
- Importation d'électricité
- Exportation d'électricité

Les 3 paramètres sont représentés en figure 5 :

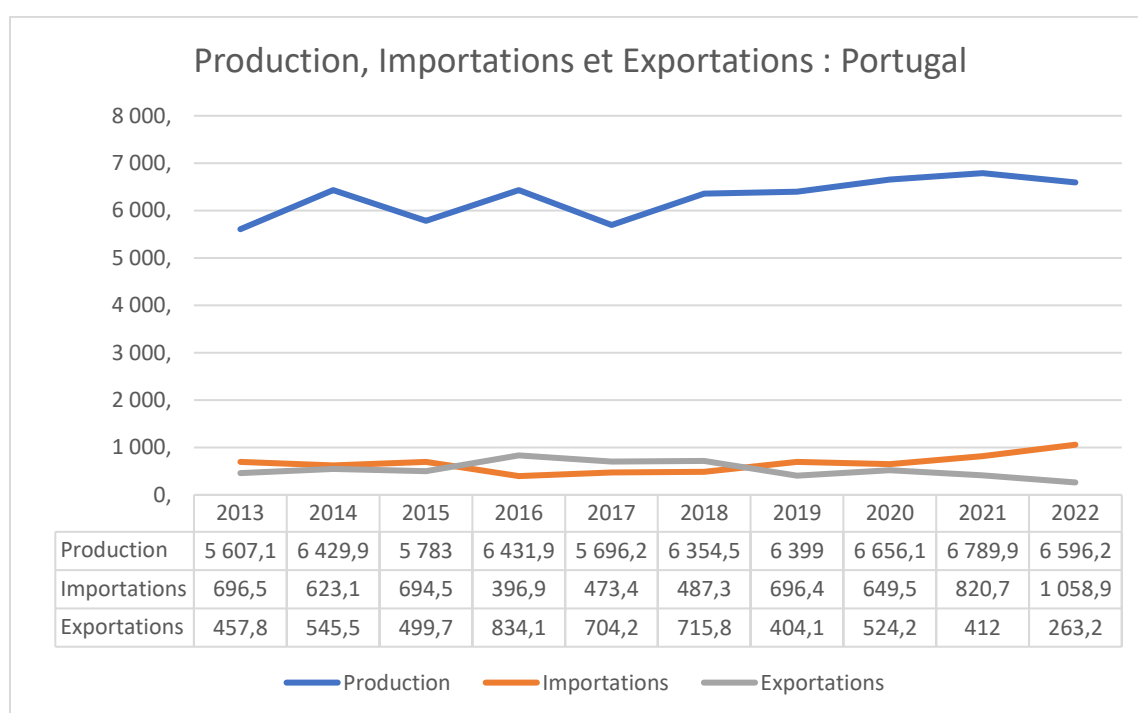


Figure 5 : Production, importations et exportations : Portugal. Graphe personnel établi à partir des données Eurostat.

Visuellement, le graphe présente des caractéristiques similaires à celui généré pour la Belgique, à savoir :

- Une amplitude plus importante pour la production que pour les importations et exportations.

Néanmoins, le calcul des coefficients de corrélation entre les quantités produites et les quantités exportées montre une tendance inverse à celle obtenue pour la Belgique :

0,30 entre les quantités produites et les quantités importées

-0,21 entre les quantités produites et les quantités exportées

Ceci peut néanmoins être dû aux quantités très faibles des importations et exportations par rapport aux quantités produites, générant un artefact.

4.3. Production, importation et exportation d'électricité : Autriche

La figure 6 analyse les mêmes paramètres que ceux étudiés au §3.2, pour l'Autriche en lieu et place du Portugal :

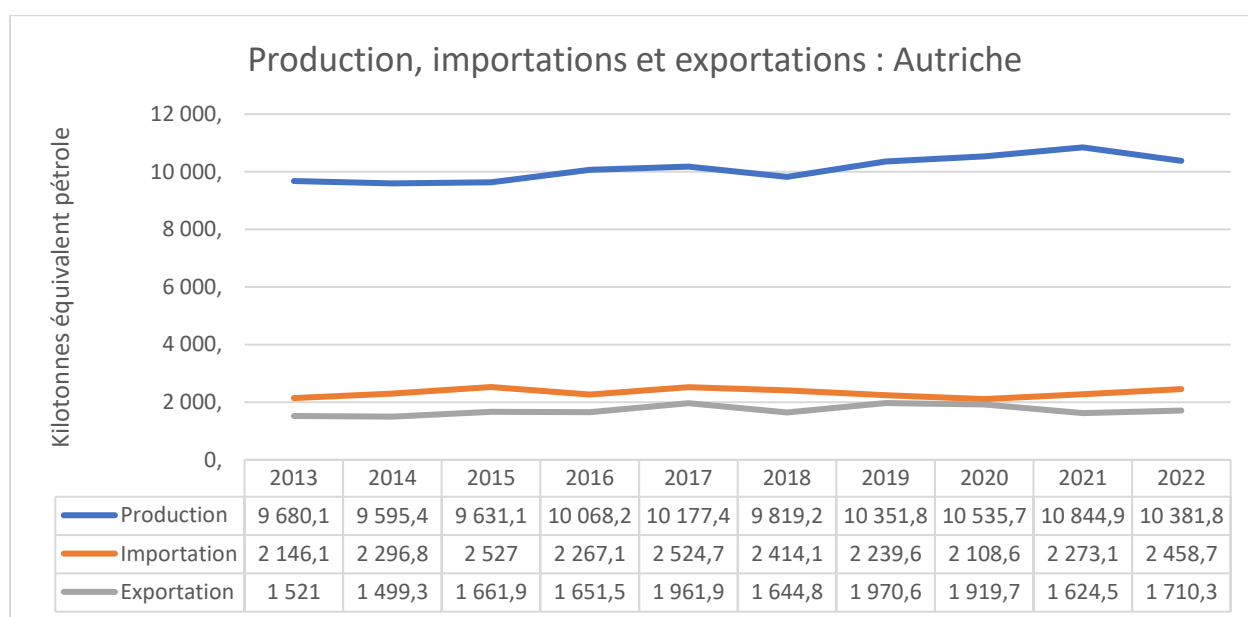


Figure 6 : Production, importations et exportations : Autriche. Graphe personnel établi à partir des données Eurostat.

Une analyse identique peut être réalisée, et les 3 caractéristiques mentionnées plus haut sont également présentes pour l'Autriche :

- Corrélation de **0,51** entre la production et les exportations
- Corrélation de **-0,22** entre la production et les importations

Notons que contrairement à la Belgique, l'Autriche et le Portugal sont deux pays totalement dépourvus de réacteurs nucléaires.

Notons également que la quantité d'électricité importée par ces 3 pays se situe dans le même ordre de grandeur : environ 500 à 2000 tonnes équivalent pétrole, alors que la population de ces pays est relativement similaire :

- Autriche : environ 8,9 M habitants
- Belgique : environ 11,5 M habitants
- Portugal : environ 10,3 M habitants

Cette observation montre que la production propre d'énergie nucléaire n'est pas une condition *sine qua non* à la garantie d'approvisionnement : en effet la comparaison avec l'Autriche et le Portugal a permis de mettre en évidence qu'**il n'existe pas de lien entre la quantité produite par la filière nucléaire et les importations et exportations d'un pays.**

5. Liens entre les périodes d'arrêt des centrales belges et le recours aux mécanismes d'équilibrage

5.1. Compilation des données : périodes d'arrêt des centrales nucléaires belges

Les différents opérateurs européens de réseau électrique à haute tension sont réunis dans un organisme européen global : ENTSO (European Network of Transmission System Operators). Elia, opérateur du réseau belge à haute tension, est le représentant belge au sein de l'ENTSO.

Dans une optique de transparence, les membres de l'ENTSO publient une variété de données relatives à la transmission et au réseau électrique, et notamment les périodes d'inactivité des unités de production électrique (*ENTSO-E « Transparency Platform »* consulté le 4 avril 2024). En réalisant un filtre sur les 7 réacteurs nucléaires belges, on peut dès lors accéder à un set de donnée précis, reprenant les différentes périodes d'inactivité (partielle ou totale) des centrales nucléaires. Ces données sont disponibles en annexe 1.

Le tableau suivant compile, par année et par centrale, le nombre de jour d'arrêts des centrales nucléaires (arrêts planifiés ou non planifiés)

Réacteur (capacité installée)	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Doel 1 (433MW)	35	35	252	168	160	30
Doel 2 (433 MW)	73	29	223	38	150	42
Doel 3 (1006 MW)	112	100	210	54	69	61
Doel 4 (1038 MW)	9	64	138	20	70	44
Tihange 1N (481 MW)	313	248	30	1	351	0
Tihange 1S (481 MW)	313	245	30	1	350	2
Tihange 2 (1008 MW)	12	148	138	230	58	68
Tihange 3 (1046 MW)	80	0	276	0	129	1
Total combiné	947	869	1297	512	1337	248

Tableau 1 : Période d'arrêt des réacteurs nucléaires Belges. Tableau personnel établi à partir des données « Entso.eu »

Notons tout d'abord que pour des facilités d'analyse, les périodes d'arrêt de moins d'un jour n'ont pas été prises en compte (la plateforme ENTSO propose une granulométrie à l'heure près).

Ces données permettent de calculer le pourcentage de disponibilité moyen de l'ensemble du parc nucléaire, par an. Ces données sont présentées en figure 7.

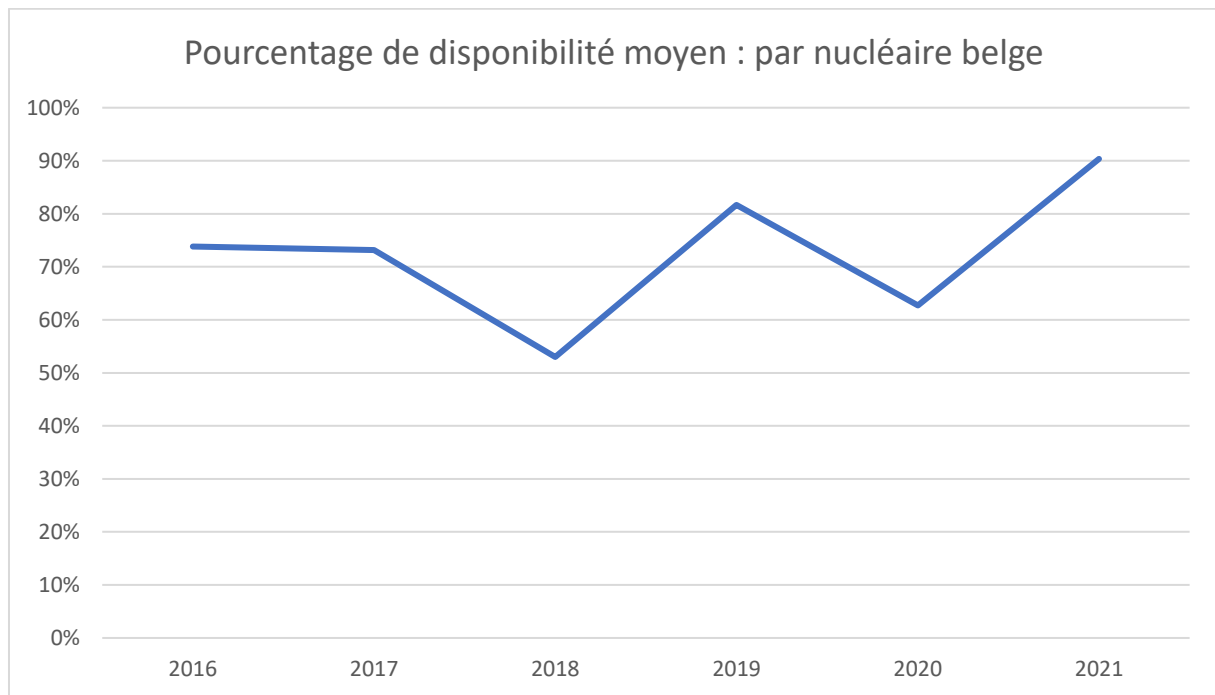


Figure 7 : Disponibilité du parc nucléaire belge. Graphe personnel établi à partir des données ENTSO.eu

Ces données sont cohérentes avec les données présentées dans un article du forum nucléaire belge Forum Nucléaire Belge (Forum Nucléaire Belge « *Mix électrique belge 2023 : Chiffres de l'année* ». Consulté le 19 mars 2024).

Notons que ce graphique permet déjà de constater que le pourcentage de disponibilité du parc nucléaire belge est également très variable, alors qu'un des reproches fréquemment adressés à l'encontre des sources d'énergie renouvelables est justement le manque de constante dans l'approvisionnement.

Il est également important de noter que les périodes d'arrêt mentionnées ci-dessus peuvent être soit partielles, soit totales. L'objectif du travail étant d'obtenir une vision à large échelle, la différence entre ces deux types d'arrêt n'a pas été prise en compte.

5.2. Recours aux différents mécanismes d'équilibrage

Elia propose, de la même manière que l'ENTSO, une plateforme privée sur laquelle des données concernant le réseau à haute tension belge sont disponibles. Cette plateforme est appelée « *Open Data* » et a été consultée le 4 février 2024. Les données répertoriées sont réparties en 5 thèmes :

- Equilibrage
- Transmission
- Gestion de la congestion
- Production
- Charge

Le présent travail cherchant à mesurer les différents recours aux mécanismes d'équilibrage, qui sont eux-mêmes activés en cas de surcharge de réseau (la congestion), nous nous intéresserons aux sets de données présentés sous la bannière « gestion de la congestion » par Elia.

Parmi les sets de données disponibles se trouvent les concepts suivants :

- « *Internal redispatching* »
- « *Cross-border redispatching* »
- « *Countertrading* »
- « *Congestion management costs* »

Les définitions liées à ces concepts sont disponibles dans une directive européenne.

- Redispatching (interne ou externe, « *cross border* ») : mesure activée par un ou plusieurs opérateurs qui modifient la génération ou la consommation afin de soulager une congestion
- Countertrading : échange « trans-zonal » initié par deux opérateurs de système entre deux zones géographiques distinctes (bidding zones) pour soulager une congestion

Ces définitions aident à comprendre que les différents points mentionnés au paragraphe 3.6 de ce travail révèlent en fait des concepts d'« *internal redispatching* », « *cross border redispatching* » et « *countertrading* ».

Bien entendu, les données brutes présentées font état d'une augmentation/diminution de manière temporaire de points très précis du réseau à haute tension belge, dont voici un exemple :

Datetime	Resolution cod	Activation	Action	Reason	Overloaded element
2023-05-22T20:45:00+02:00	PT15M	102,2	Increase	Load flow overload	BRUGG - EEKLN 150.241

A titre individuel, ces données ne présentent pas d'intérêt dans cette analyse. Néanmoins, une analyse à l'échelle d'une année permet d'obtenir une vue globale du nombre relatif de ces augmentations et diminutions, et par conséquent du recours à ces différents mécanismes de protection. Ces données sont présentées ci-dessous sous la forme d'un « radar ». Par facilité d'interprétation, elles sont présentées par années civiles.

Il est également important de noter que la plateforme permet d'évaluer deux paramètres :

- Le nombre des activations, indépendamment de la quantité d'énergie en jeu
- Le volume total des activations, qui comprend alors la quantité d'énergie.

Le deuxième paramètre est évalué ci-dessous, sur la période 2019-2023, avec une granulométrie au mois près.

5.3. Recours au mécanisme d'équilibrage : données

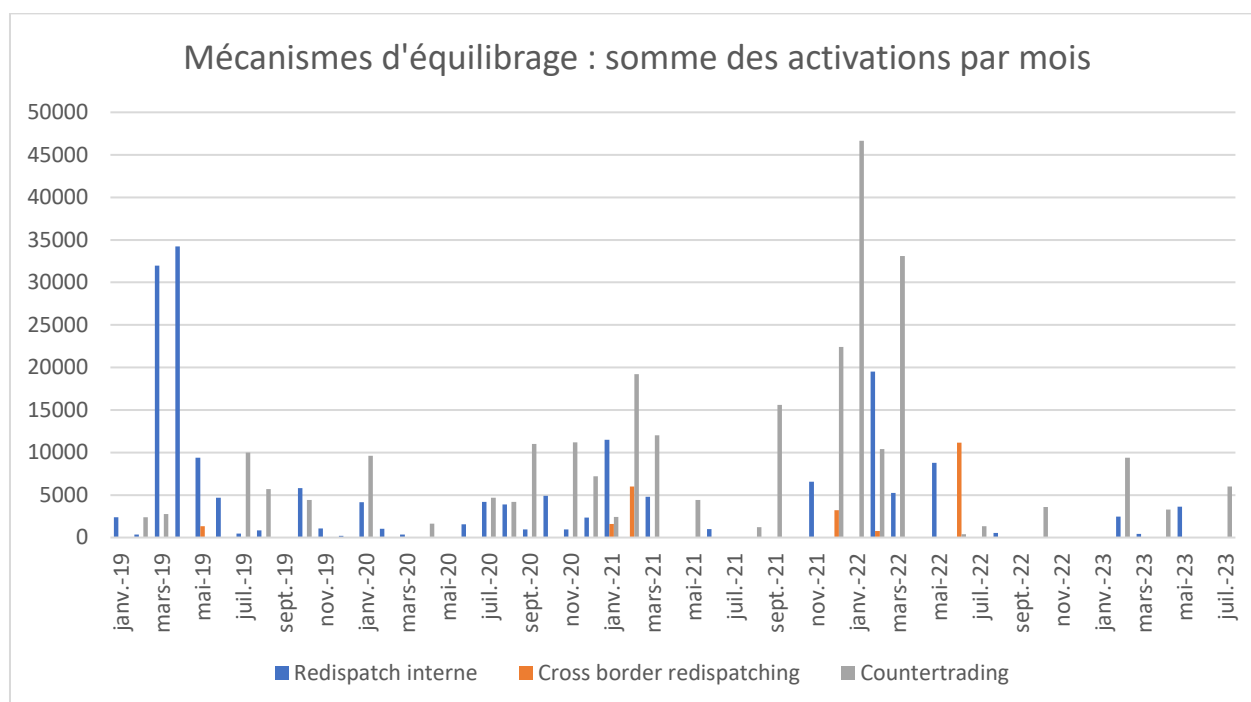


Figure 8 : Recours aux mécanismes d'équilibrage – par mois. Graphe personnel établi sur base des données de la plateforme « OpenData » d'Elia

Notons tout d'abord que les données ne sont disponibles qu'à partir de l'année 2019, et que les données de 2023 sont, lors de la rédaction de ce travail, incomplètes : les données sont disponibles jusqu'au mois de juillet 2023.

La première observation est qu'il n'existe pas de pattern saisonnier en termes de recours aux différents mécanismes qui tombent sous la définition du **redispatching interne, cross border redispatching ou countertrading**.

Par la suite, nous pouvons agréger par année, le recours à ces mécanismes d'équilibrage :

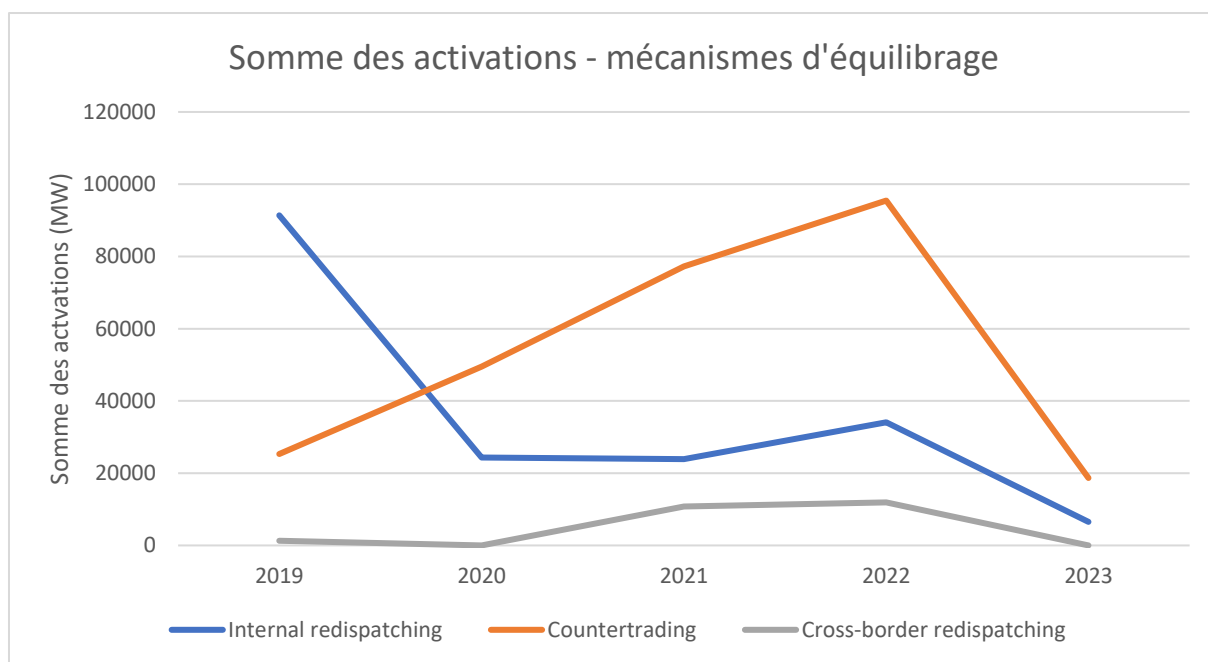


Figure 9 : Recours aux mécanismes d'équilibrage – par année. Graphe personnel établi sur base des données de la plateforme « OpenData » d'Elia

Ces données peuvent être mises en regard du pourcentage de disponibilité : graphe disponible en figure 10.

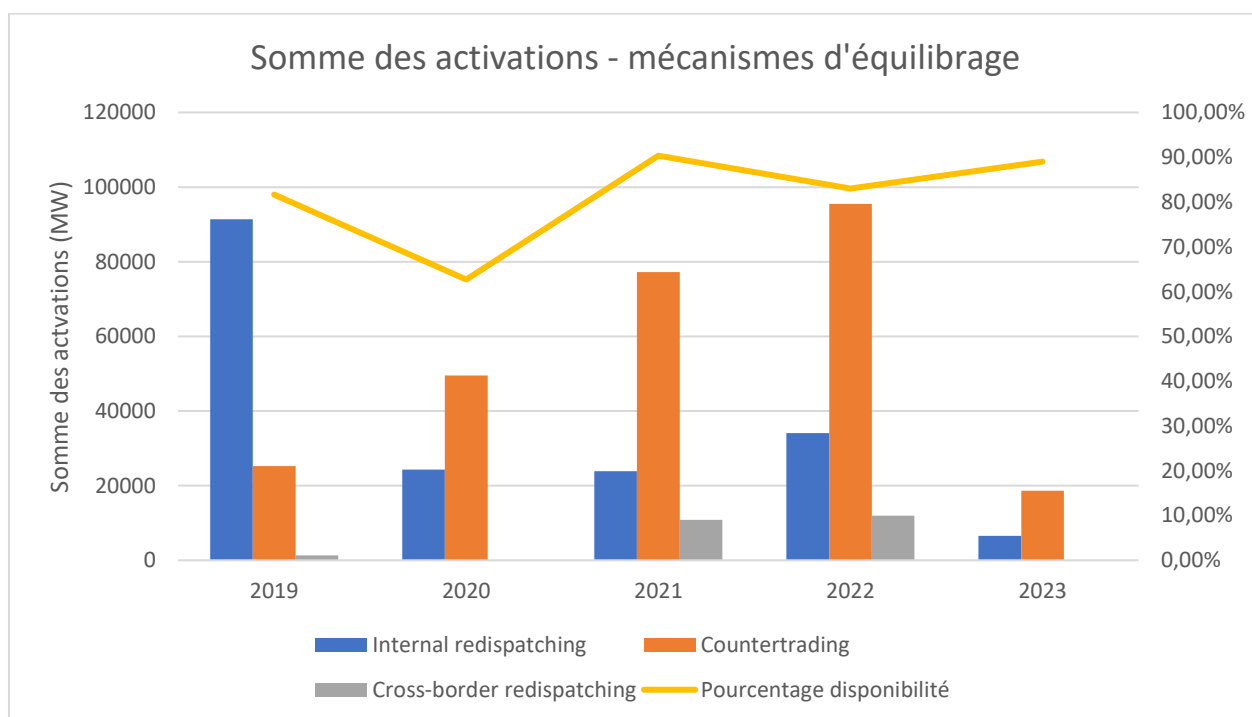


Figure 10 : Recours aux mécanismes d'équilibrage et disponibilité du parc nucléaire. Graphe personnel établi sur base des données de la plateforme « OpenData » d'Elia

Note importante : les données utilisées concernant la disponibilité du parc nucléaire proviennent de la plateforme « ENTSO » (*ENTSO-E « Transparency Platform »* consulté le 4 avril 2024) pour les années 2019 à 2021. Au vu du fait que les données 2022 et 2023 ne sont pas encore disponibles via cette plateforme, les chiffres utilisés pour ces années proviennent du forum nucléaire belge (Forum Nucléaire Belge « *Mix électrique belge 2023 : Chiffres de l'année* ». Consulté le 19 mars 2024).

Les calculs des coefficients de corrélation entre ces paramètres donnent les valeurs suivantes :

- Entre le redispatching interne et la disponibilité : - **0,07**
- Entre le countertrading et la disponibilité : **0,06**
- Entre le cross-border redispatching et la disponibilité : **0,44**

Ces données permettent de tirer une conclusion préliminaire sur le fait qu'il n'existe pas de corrélation ou de lien entre la disponibilité des réacteurs nucléaires utilisés pour la production d'électricité et les mesures de gestion du déséquilibre (de la congestion) appliquées par Elia, excepté pour le cross-border redispatching. Rappelons (voir figure 10), que ce dernier mode de gestion est le moins souvent utilisé.

De la même manière, il n'existe aucun pattern saisonnier dans l'utilisation des mesures de gestion de la congestion.

Les analyses menées dans les chapitres 4 et 5 du présent travail n'ont pas permis de mettre en évidence d'association entre les quantités d'électricité produite par la filière nucléaire et d'autres variables telles que les importations, les exportations ou l'utilisation de mécanismes d'équilibrage du réseau.

Nous allons maintenant analyser l'influence d'autres variables, telles que

- L'utilisation de la réserve stratégique (chapitre 6).
- Les variables liées à l'utilisation de gaz naturel afin de produire l'électricité : le gaz naturel étant la deuxième source d'électricité en Belgique, derrière le nucléaire et devant les énergies renouvelables (Chapitre 7).

6. Réserve stratégique : concept et analyse

Une fois que les données concernant la production d'électricité ainsi que le recours aux mécanismes d'équilibrage sont compilées, il paraît pertinent de les mettre en regard de la composition de la **réserve stratégique**.

6.1. Réserve stratégique : concept et définition

La réserve stratégique constitue un mécanisme qui permet au gestionnaire de réseau « d'activer de la capacité d'électricité dans le cas où un risque non négligeable de pénurie d'électricité est identifié à court terme » (SPF Economie « *Réserve stratégique en électricité*. ». Consulté 15 mai 2024).

Concrètement, le ministre de l'énergie peut donner l'instruction à Elia de constituer une réserve « stratégique » d'électricité : c'est-à-dire de réserver un **moyen** de produire une **quantité définie d'électricité**.

La quantité d'électricité à engager dans cette réserve stratégique est définie suivant une analyse statistique de la sécurité d'approvisionnement réalisée par Elia et la direction générale de l'énergie (dépendant directement du SPF économie).

Ces définitions permettent tout d'abord de classer cette réserve énergétique **comme un moyen à part entière de gérer un éventuel déséquilibre** entre l'offre (la production) et la demande.

6.2.Données et analyse

Les données concernant la quantité d'électricité allouée à la réserve stratégique sont disponibles via le site web du SPF économie (« *Réserve stratégique en électricité*. ». Consulté 15 mai 2024) et compilées à la figure 11.

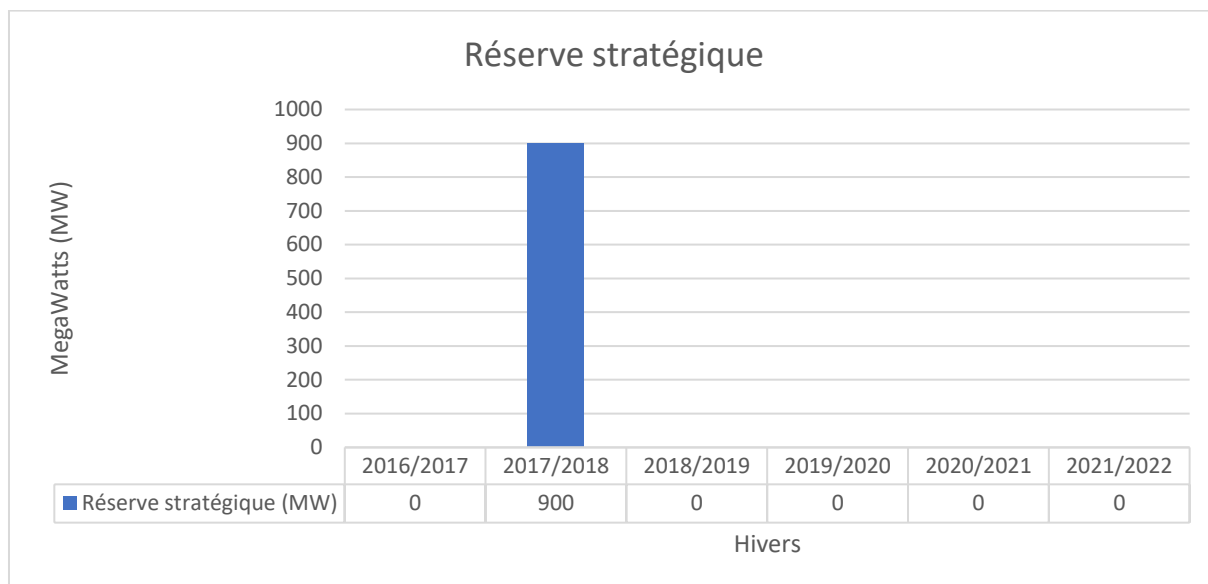


Figure 11 : Réserve stratégique contractée par période hivernale. Graphe personnel établi sur base des données du SPF Economie

Il est aisé de constater que sur les 6 dernières années pour lesquelles les données sont disponibles, le ministre a décidé 5 fois de ne pas constituer de réserve stratégique supplémentaire.

Cette analyse nous donne alors les indications suivantes :

- La capacité totale de génération d'électricité en Belgique semble être en adéquation avec ses besoins en électricité.
- Au vu des capacités de production d'électricité renouvelable qui sont en constante augmentation (Meinke-Hubeny et al., 2017) et au vu du réchauffement climatique, qui provoquera des hivers de moins en moins rudes, il ne paraît pas nécessaire d'investir dans des capacités de production additionnelles, dans le cas où la demande reste constante.

7. Comparaison : données sur l'électricité générée à partir de gaz naturel

Hormis la filière nucléaire ainsi que les énergies renouvelables parfois qualifiées d'intermittentes, une partie importante du mix électrique belge provient des centrales au gaz, comme le montrent les chiffres d'Elia pour les années 2022 et 2023 (Elia, «*Electricity mix 2023 : Belgian renewable generation reaches all-time high while consumption and prices fall compared to 2022*». Consulté 18 mai 2024) :

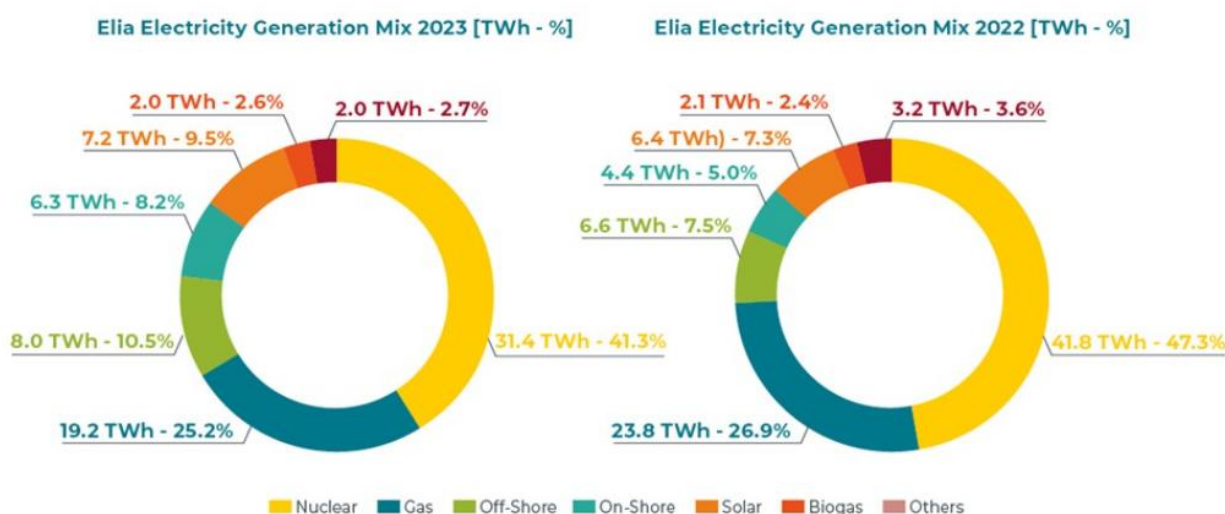


Figure 12 : Mix électrique Belge 2022 et 2023. Source : Elia

Il paraît donc intéressant d'étudier si des liens peuvent être établis entre les données liées à précédemment récoltées et les données liées à l'importation de gaz en Belgique.

Il est à noter que la Belgique ne produit pas de manière significative de gaz naturel. Par conséquent, une écrasante majorité du gaz naturel utilisé en Belgique est importé. Ce gaz a néanmoins des utilisations diverses et n'est pas destiné uniquement à la production d'électricité : celui-ci peut être directement utilisé :

- Par les ménages (pour des utilisations de chauffage, de cuisine, afin de chauffer l'eau...)
- Par les industriels (en tant que source d'énergie pour les procédés thermiques ou en tant que matière première)
- Pour produire de l'électricité via les centrales au gaz.

Comme le présent travail se focalise sur l'électricité, les deux premières utilisations ne doivent pas entrer en compte dans l'analyse.

7.1. Quantités produites

Collectons tout d'abord les données historiques sur la période 2019 – 2023 de la quantité d'électricité produite à partir de gaz naturel. Ces données sont fournies via un rapport d'Elia :

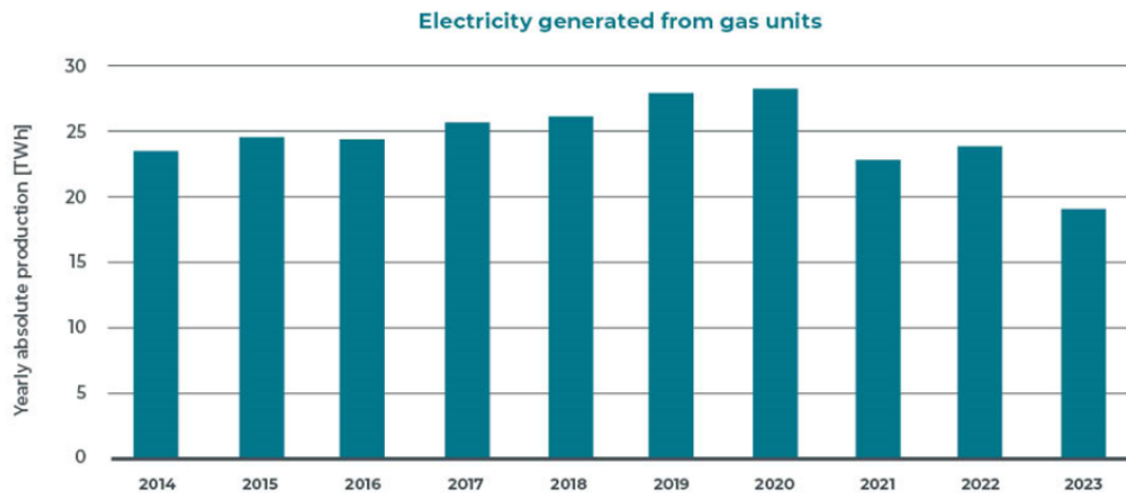


Figure 13 : Quantité d'électricité produite à partir du gaz naturel. Source : Elia.

Nous pourrions, à l'aide de deux constantes, calculer le volume de gaz nécessaire à la production de cette électricité :

1. Le rendement des centrales au gaz : celui-ci est d'environ 55% (Colmenar-Santos et al., 2018).
2. La valeur calorifique du gaz naturel : la quantité d'énergie qui peut être obtenue en brûlant une certaine quantité de gaz.

Ces deux valeurs étant constantes lors du laps de temps 2019 – 2023, nous arriverions néanmoins à un graphique **à l'allure identique que l'allure présentée en figure 13** : avec la valeur la plus élevée pour l'année 2019, et la plus faible pour l'année 2023.

La figure 14 met en parallèle le pourcentage de disponibilité du parc nucléaire, déjà abordé lors du chapitre 5 du présent travail, et la part de gaz dans le mix électrique belge :

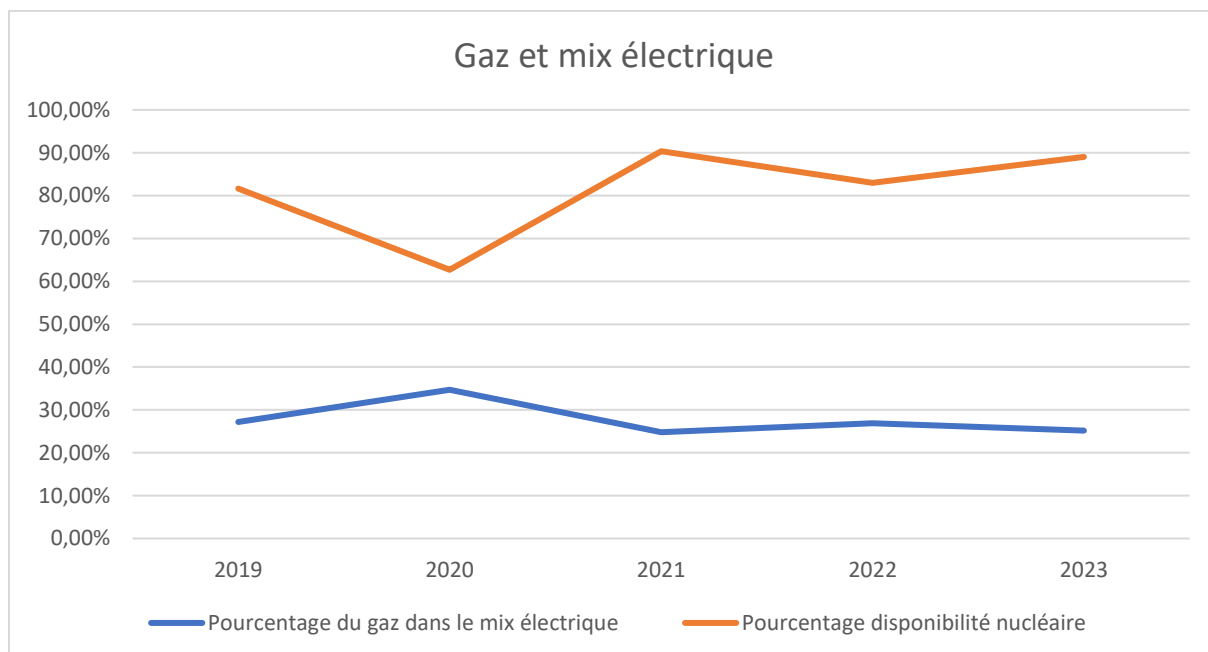


Figure 14 : Part du gaz dans le mix électrique et disponibilité du parc nucléaire. Graphe personnel établi sur base des données ENTSO.eu et d'Elia

La relation inverse entre les deux variables est très visible : lorsque la capacité du nucléaire décroît, le pourcentage du gaz dans le mix électrique croît, et inversement. Ceci est confirmé par le calcul du coefficient de corrélation : il est de **-0,99**.

On peut également analyser que l'amplitude de la variation est plus importante pour le pourcentage de disponibilité du parc nucléaire que pour le pourcentage de gaz dans le mix électrique belge. Une analyse basée sur les quantités réelles plutôt que sur les pourcentages est présentée à la figure 15 :

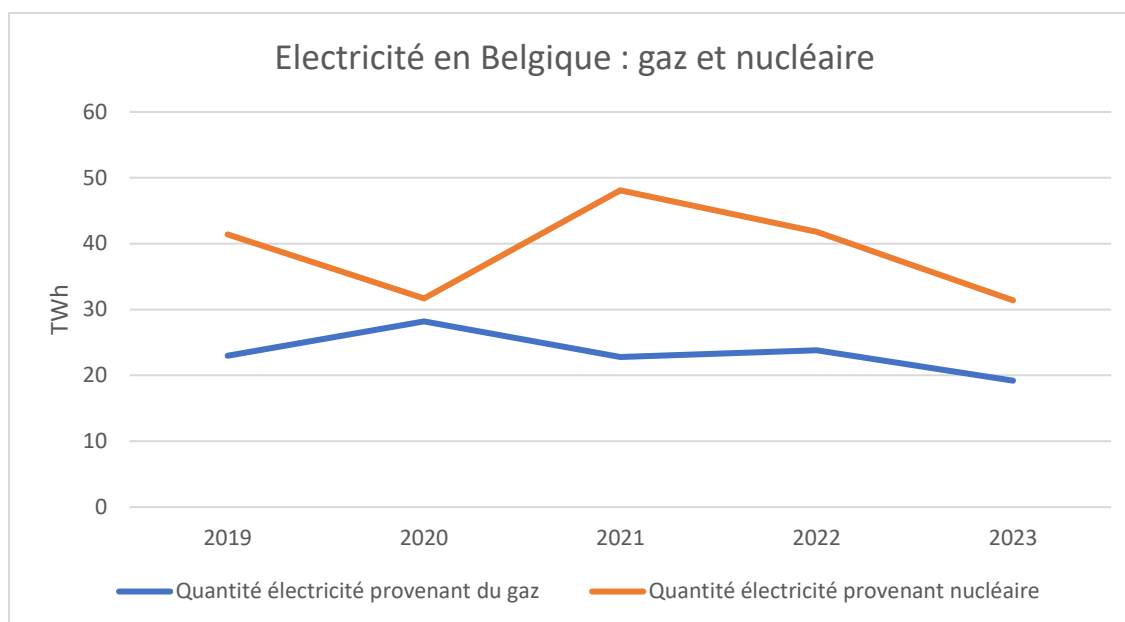


Figure 15 : Quantités totales d'électricité en fonction de leur provenance. Graphe personnel établi sur base des données ENTSO.eu et d'Elia

Cette figure 15 corrobore l'analyse réalisée pour la figure 14 : l'amplitude est bien plus importante pour la quantité d'électricité produite via la filière nucléaire que pour cette même quantité produite via combustion de gaz. Ceci démontre que la production d'électricité via la combustion de gaz naturel ne contrebalance pas à 100% une diminution de la production via la filière nucléaire. Comme l'a montré la figure 10, le cross-border dispatching est corrélé avec la disponibilité des centrales à 0,44. Par conséquent, un excès de production nucléaire va être nivelé en envoyant aux pays limitrophes en manque. Ceci explique que les pays limitrophes en manque d'électricité ne doivent pas entièrement compenser leur manque en démarrant des centrales au gaz.

8. Conclusions

L'objectif du présent travail consistait à évaluer si la production d'électricité via la filière nucléaire en Belgique constituait une garantie d'approvisionnement en électricité pour le consommateur final, qu'il soit citoyen ou industriel.

Cette question d'actualité se pose principalement dû à l'absence de solution de stockage à une échelle significative d'électricité, et fait l'objet de nombreux débats, mêlant plusieurs disciplines (écologie, ingénierie, stratégie, planification...). Ce travail a tout d'abord tenté de dresser une liste (non exhaustive) des différentes solutions disponibles à l'échelon politique afin de limiter les impacts sur le citoyen : ces solutions sont des mécanismes qui tendent à équilibrer l'offre et la demande en électricité, et peuvent devenir particulièrement techniques.

Au vu de l'absence de données concernant des mesures de délestage – principalement car aucune évidence d'activation de cette mesure de dernier recours n'est reportée depuis quelques années – et par le fait qu'aucune base de données ne compile ces événements inattendus, ce travail a tenté de répondre à la question principale, via des analyses réalisées sur des données connexes. Citons par exemple :

- Les quantités d'électricité importées et exportées
- La comparaison de ces quantités à d'autres pays membres de l'UE
- Le calcul d'un pourcentage de disponibilité du parc nucléaire belge
- Le recours aux différents mécanismes d'équilibrage de l'offre et de la demande

Bien entendu, il n'existe pas de réponse simple à des problématiques complexes, et ce travail s'inscrit dans un champ de recherche très large des sciences « opérationnelles ».

Ce travail a néanmoins pu, via l'analyse de données disponibles sur des plateformes comme celle d'Elia ou d'Eurostat, démontrer que :

- L'importation nette d'électricité ne contrebalance pas à 100% une baisse de production des centrales nucléaire belges. On a alors aussi recours à la production via des centrales au gaz.

- Il n'existe aucun lien direct entre la quantité d'électricité produite via les centrales nucléaires et le recours aux différents mécanismes d'équilibrage, mis à part la revente d'électricité excédentaire aux pays voisins.
- Le pourcentage de disponibilité des centrales nucléaires n'est pas stable au cours du temps, alors qu'il s'agit d'un reproche adressé exclusivement aux énergies renouvelables.
- Que sur les 6 dernières années, le recours au mécanisme de la « réserve stratégique » n'a été activé qu'une seule fois
- Que la comparaison avec des pays d'Europe, similaire en termes de population, comme l'Autriche ou le Portugal, permet de mettre en évidence qu'il est tout à fait **possible de développer une capacité de production renouvelable (éolien offshore, barrages hydroélectriques)** et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles **et se passer de tout programme nucléaire civil**, si tant est que les investissements dans les capacités de production d'énergie renouvelables sont à la hauteur.

Ces différents éléments tendent à démontrer qu'un programme nucléaire civil n'est pas une condition *sine qua non* à une garantie d'approvisionnement en électricité. Néanmoins, la question est complexe et doit être mise en regard d'autres variables, notamment :

- La possibilité intrinsèque d'installation de générateurs d'électricité basés sur l'énergie renouvelable dans le territoire belge.
- La dépendance aux importations d'un produit précurseur important : le gaz naturel.

9. Bibliographie

- AleaSoft. (2016). *Assessment of Electricity Consumption in Europe for the year 2015*. AleaSoft Energy Forecasting. <https://aleasoft.com/assessment-of-electricity-consumption-in-europe-for-the-year-2015/>
- Babatunde, O. M., Munda, J. L., & Hamam, Y. (2020). Power system flexibility : A review. *Energy Reports*, 6, 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.048>
- Colmenar-Santos, A., Gómez-Camazón, D., Rosales-Asensio, E., & Blanes-Peiró, J.-J. (2018). Technological improvements in energetic efficiency and sustainability in existing combined-cycle gas turbine (CCGT) power plants. *Applied Energy*, 223, 30-51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.191>
- Degefa, M. Z., Sperstad, I. B., & Sæle, H. (2021). Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources. *Electric Power Systems Research*, 194, 107022. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107022>
- Di Cosmo, V., Collins, S., & Deane, P. (2020). Welfare analysis of increased interconnection between France and Ireland. *Energy Systems*, 11. <https://doi.org/10.1007/s12667-019-00335-1>
- Electric Utility Resource Planning “Variable Renewable Energy—An overview”. Consulté 24 janvier 2024, à l’adresse <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/variable-renewable-energy>
- Elia « Étude sur l’adéquation et la flexibilité en Belgique (2024 2034) ». Consulté 17 janvier 2024, à l’adresse https://issuu.com/eliagroup/docs/étude_sur_l_adéquation_et_la_flexibilité_en_belgique
- Elia « Elia Open Data Portal ». Consulté 4 février 2024, à l’adresse https://opendata.elia.be/explore/?refine.theme=Gestion%20de%20congestion&refine.publisher=Customers,%20Market%20and%20System&disjunctive.theme&disjunctive.dcat.granularity&disjunctive.dcat.accrualperiodicity&disjunctive.keyword&sort=explore.popularity_score
- Elia «Electricity mix 2023 : Belgian renewable generation reaches all-time high while consumption and prices fall compared to 2022». Consulté 18 mai 2024, à l’adresse https://www.elia.be/en/news/press-releases/2024/01/20240108_electricity-mix-2023-belgian-renewable-generation-reaches-all-time-high-while-consumption
- Energuides « Qu’est-ce que le marché de flexibilité et qui peut y participer ? ». Consulté 15 janvier 2024, à l’adresse <https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/quest-ce-que-le-marche-de-flexibilite-et-qui-peut-y-participer/2183/>
- ENTSO-E « Transparency Platform ». Consulté 4 avril 2024, à l’adresse <https://transparency.entsoe.eu/>

- Euronews, “Renewables covered 95% of Portugal’s power needs last month”. (2024, mai 11).
<https://www.euronews.com/green/2024/05/10/renewables-are-meeting-95-of-portugals-electricity-needs-how-did-it-become-a-european-lead>
- EuroStat « Base de données—Energie » Consulté 4 février 2024, à l’adresse
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database>
- Forum Nucléaire Belge « Mix électrique belge 2023 : Chiffres de l’année ». (2024, mars 19).
<https://www.forumnucleaire.be/actus/mix-electrique-belge-2023-chiffres-de-lannee>
- Fuchs, G., Lunz, B., Leuthold, M., & Sauer, D. U. (2012). Technology overview on electricity storage. ISEA, Aachen, Juni, 26. https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Uwe-Sauer/publication/299425278_Technology_Overview_on_Electricity_Storage_-_Overview_on_the_potential_and_on_the_deployment_perspectives_of_electricity_storage_technologies/links/56f5bdca08ae81582bf21724/Technology-Overview-on-Electricity-Storage-Overview-on-the-potential-and-on-the-deployment-perspectives-of-electricity-storage-technologies.pdf
- Kostková, K., Omelina, L., Kyčina, P., & Jamrich, P. (2013). An introduction to load management. *Electric Power Systems Research*, 95, 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.09.006>
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2178-2199.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.033>
- Marise. (2022, décembre 21). *Énergie : Risque-t-on vraiment des black-outs en Belgique ? Ces experts tirent la sonnette d’alarme*. Moustique.
<https://moustique.lalibre.be/actu/belgique/2022/12/21/energie-risque-t-on-vraiment-des-black-out-en-belgique-ces-experts-tirent-la-sonnette-dalarme-253275>
- Meinke-Hubeny, F., de Oliveira, L. P., Duerinck, J., Lodewijks, P., & Belmans, R. (2017). Energy transition in Belgium—choices and costs. *EnergyVille in Opdracht van Febeliec: Genk, Belgium*.
- Sibelga, « Pourquoi un délestage ? ». Consulté 17 janvier 2024, à l’adresse
<https://www.sibelga.be/fr/pannes-chantiers/penurie-energie/plan-de-delestage-electricite/pourquoi-un-delestage>
- SPF Economie « Le plan de délestage et vous ». Consulté 24 janvier 2024, à l’adresse
<https://economie.fgov.be/fr/themes/energie/securite-dapprovisionnement/electricite/penurie-delectricite/le-plan-de-delestage-et-vous>
- SPF Economie « Réserve stratégique en électricité. ». Consulté 15 mai 2024, à l’adresse
<https://economie.fgov.be/fr/themes/energie/securite-dapprovisionnement/electricite/mecanismes-de-capacite/reserve-strategique-en>