

Description et utilisation de CRYSTAL SUPER GRID

Document rédigé dans le cadre des travaux préparatoires
au chiffrage des programmes électoraux 2019

Décembre 2018

Chiffrage des programmes électoraux 2019

La loi du 22 mai 2014 confie au Bureau fédéral du Plan la tâche du chiffrage des programmes électoraux présentés par les partis politiques en vue de l'élection pour la Chambre des représentants. Dans le cadre des travaux préparatoires au chiffrage des programmes électoraux pour les élections de mai 2019, le Bureau fédéral du Plan publie une série de documents techniques à l'attention des partis politiques, des médias et du public.

La coordination du projet est assurée par Jan Verschooten (jav@plan.be), Bart Hertveldt (bh@plan.be) et Igor Lebrun (il@plan.be).

Contributions

Cette publication a été rédigée par Danielle Devogelaer (dd@plan.be).

Reproduction autorisée, sauf à des fins commerciales, moyennant mention de la source.

Éditeur responsable : Philippe Donnay

Dépôt Légal : D/2018/7433/36

Abstract

Depuis 2015, le Bureau fédéral du Plan dispose de CRYSTAL SUPER GRID, un modèle caractérisé par une résolution temporelle fine qui permet d'étudier le secteur électrique en détail. Le modèle a été développé par Artelys, un bureau français de consultance en énergie, qui élabore des projets de modélisation pour la Commission européenne dans le cadre d'un contrat-cadre de quatre ans.

Le Bureau fédéral du Plan a développé une expertise dans le modèle afin de pouvoir l'exploiter pour diverses problématiques liées à l'électricité. Un tel modèle s'avère indispensable à l'évaluation des futurs systèmes énergétiques dans lesquels l'électrification est supposée jouer un plus grand rôle pour répondre aux défis posés par le changement climatique.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Caractéristiques générales du modèle	2
2.1. Introduction	2
2.2. Le modèle	3
3. Inputs du modèle	5
4. Output du modèle	7
4.1. Indicateurs	7
4.2. Ce que le modèle ne fait pas	8
5. Mesures possibles.....	9
6. Applications.....	11
Bibliographie	12

Liste des tableaux

Tableau 1	Technologies de production disponibles dans Crystal Super Grid	5
Tableau 2	Exemple de mesure : extension des interconnexions, 2027.....	10

1. Introduction

En vertu de la loi du 22 mai 2014¹, le Bureau fédéral du Plan (BFP) est chargé de chiffrer les programmes électoraux d'un certain nombre de partis politiques lors des prochaines élections législatives fédérales. Dans ce contexte, le modèle de projection CRYSTAL SUPER GRID pourra être utilisé pour calculer les effets de mesures relatives à la problématique de l'électricité et des émissions de CO₂.

L'électricité, les émissions et le climat sont étroitement liés. Le choix du mix électrique peut en effet avoir une incidence significative sur le climat via les gaz à effet de serre émis lors de la combustion des combustibles fossiles, tandis que le climat lui-même influence la demande d'électricité (les besoins de chauffage et de refroidissement, l'éclairage, etc.). En outre, l'électrification croissante de la société à partir de sources à faible teneur en carbone devrait à l'avenir répondre (partiellement) aux défis posés par le changement climatique.

Depuis 2015, le Bureau fédéral du Plan dispose de CRYSTAL SUPER GRID, un modèle à très haute résolution temporelle qui permet d'étudier en détail le secteur de l'électricité et son impact sur les émissions de CO₂. Le modèle a été développé par Artelys, un bureau français de consultance en énergie, auquel la Commission européenne a également fait appel pour appuyer l'élaboration de politiques fondées sur des données factuelles. Le Bureau fédéral du Plan a développé une expertise dans le modèle afin de l'exploiter pour étudier diverses questions liées à l'électricité, comme les effets de la disponibilité ou non de certaines centrales nucléaires sur les prix de gros de l'électricité (Devogelaer et Laine, 2016) et l'impact d'un accroissement de la capacité belge de transport électrique transfrontalier sur le fonctionnement du parc de production thermique flexible domestique (Devogelaer, 2017).

Le fonctionnement et les possibilités d'exploitation de CRYSTAL SUPER GRID sont présentés ci-après, de même que certaines applications pouvant être envisagées dans le cadre du chiffrage des programmes électoraux. Plus spécifiquement, les caractéristiques générales de ce (type de) modèle sont décrites dans la partie 2. Les inputs nécessaires pour pouvoir générer des résultats sont décrits dans la partie 3. La partie 4 expose des résultats de simulation, tandis que la partie 5 aborde plus en détail les mesures qui peuvent être simulées avec le modèle. Enfin, la partie 6 clôture ce working paper en décrivant brièvement plusieurs applications du modèle.

¹ Moniteur belge du 22 juillet 2014.

2. Caractéristiques générales du modèle

2.1. Introduction

CRYSTAL SUPER GRID est ce que l'on appelle un modèle énergétique sectoriel en ce sens qu'il couvre spécifiquement le secteur de la production électrique. Certaines particularités de cette forme d'énergie méritent dès lors d'être précisées. L'électricité est une forme d'énergie indispensable à la vie quotidienne, non seulement en raison des fonctions cruciales qu'elle assure, mais compte tenu aussi de la multitude d'applications qu'elle connaît : de l'éclairage au transport, de la préparation de repas à l'exécution des processus industriels les plus complexes, du suivi de l'actualité à la ventilation des patients hospitalisés dans un état critique.

Si l'électricité connaît de multiples utilisations, elle est également produite à partir de nombreuses sources. Ainsi, l'électricité peut être générée à partir de sources d'énergie fossiles (gaz naturel, charbon, lignite, pétrole). De même, l'uranium peut produire la température nécessaire pour alimenter des turbines et, partant, générer de l'électricité. À côté des centrales thermiques nucléaires ou alimentées par des combustibles fossiles, les sources d'énergie renouvelables sont en plein essor (voir aussi tableau 1) : le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie sont à même de générer de l'électricité sur une base récurrente (sans risque d'épuisement), moyennant toutefois quelques particularités. En effet, les deux premières sources sont tributaires des conditions météorologiques, tandis que les trois dernières peuvent être sollicitées à la demande (*dispatchable*).

La spécificité de l'électricité et de sa modélisation tient au fait que, contrairement aux formes d'énergie fossiles qui peuvent être stockées, son stockage à grande échelle, sur une longue période de temps et à un coût relativement bas, constitue encore aujourd'hui un défi de taille. C'est précisément pour cette raison que l'électricité se différencie fondamentalement des autres sources d'énergie. La directive 2009/119/CE du Conseil du 14 septembre 2009 soumet par exemple tous les États membres à l'obligation de maintenir un niveau minimal de stocks de pétrole brut et/ou de produits pétroliers pour couvrir les besoins d'environ 90 jours. Il n'en va pas de même pour l'électricité et ce serait même techniquement impossible aujourd'hui.

Par conséquent, la demande d'électricité (la consommation d'électricité) doit nécessairement être satisfaite instantanément par la production : l'offre et la demande doivent donc toujours et à tout moment parfaitement s'équilibrer. Au moindre écart, la fréquence de l'ensemble du réseau européen interconnecté déviara de la norme de 50 Hertz et un effet de cascade pourrait alors affecter de grandes parties du réseau européen, voire, dans le pire des cas, entraîner une panne.

Une résolution temporelle suffisamment élevée s'avère donc nécessaire pour tenir compte de manière adéquate de cette particularité. Un modèle du système énergétique dans lequel l'électricité est modélisée comme une forme d'énergie "ordinaire" et dans lequel les volumes annuels de la demande s'équilibrent avec les volumes annuels de l'offre ne suffirait donc pas. Un degré de précision plus élevé au niveau de la temporalité étant essentiel, un modèle spécifique s'imposait.

2.2. Le modèle

Le modèle électrique CRYSTAL SUPER GRID appartient à la famille des modèles connus en anglais sous le vocable '*unit commitment optimal dispatch models*'. Il s'agit de modèles où le mix optimal des technologies de production dans une zone donnée (pays, région, continent, etc.) est déterminé en fonction de la demande. Le mix optimal correspond à la configuration où les coûts de production totaux pour l'ensemble de la zone sont minimisés et où la demande d'électricité est, à tout moment, couverte par la production, compte tenu d'un certain nombre de limites techniques et physiques du système.

Ces limites techniques et physiques peuvent concerner les centrales (rendement maximal, possibilité et/ou rapidité de démarrage et d'adaptation de la puissance, etc.), l'interconnexion (possibilité et capacité d'échanges d'électricité avec un pays voisin), la gestion de la demande (possibilité de déplacer une partie de la demande d'électricité dans le temps, ou même de l'effacer), etc.

'*Unit commitment*' désigne le processus par lequel on détermine quelles unités sont activées à quel moment et sont alors à même de produire de l'électricité. La décision peut émaner de l'opérateur (dans le cas des centrales thermiques), mais l'activation peut également résulter d'un phénomène fortuit (pour les unités dépendantes des conditions météorologiques, telles que les éoliennes ou les panneaux solaires). Quant à l'*economic dispatch*', il se rapporte à la production réelle des différentes centrales successivement activées en fonction du critère coût-efficacité.

La Belgique n'est pas modélisée comme une île isolée : des interactions sont prévues avec les systèmes électriques des pays de la zone CWE (Europe du Centre Ouest) et de l'Europe du Sud (Portugal, Espagne et Italie), pays qui à leur tour doivent assurer à tout moment un équilibre entre l'offre et la demande, tout en tenant compte d'un certain nombre de contraintes techniques et physiques. Par conséquent, le mix optimal d'électricité n'est pas déterminé uniquement au niveau de la Belgique. S'il est plus rentable d'exploiter une centrale à l'étranger et d'en importer l'électricité excédentaire (l'électricité qui n'est pas nécessaire pour couvrir la demande dans le pays de production), cette possibilité doit également être intégrée dans les calculs.

Les *unit commitment optimal dispatch models* utilisent des algorithmes d'optimisation relativement complexes vu le nombre très élevé de combinaisons possibles d'unités de production actives ou non dans le système électrique, pour chaque unité de temps modélisée de la période étudiée. Typiquement, la période temporelle étudiée est l'année complète, heure par heure, si bien que 8 760 unités de temps sont examinées. L'horizon temporel couvert par le modèle peut varier du court terme (1 à 3 ans) au long terme (horizon 2030). Les analyses à court terme réalisées avec ces modèles visent par exemple à calculer le volume nécessaire pour la réserve stratégique en électricité. Les analyses à long terme sont généralement menées à l'horizon 2030, mais d'un point de vue technique, aucune barrière n'empêche d'exploiter le modèle à des horizons plus éloignés. La seule difficulté à cet égard est de trouver suffisamment de données fiables pour alimenter le modèle compte tenu des évolutions technologiques importantes (dont la numérisation) qui rendent hautement spéculative l'élaboration de profils de la demande future.

CRYSTAL SUPER GRID a été développé en JAVA. Les calculs sont réalisés par des algorithmes d'optimisation successifs sur un horizon mobile plutôt que sur l'ensemble de la période de projection (*perfect foresight*). Les calculs couvrent une période de 14 jours (horizon tactique), mais sont réalisés par blocs

de 7 jours (horizon mobile) à chaque itération. Par conséquent, chaque nouvel horizon tactique chevauche le précédent, prenant ainsi en compte les décisions prises antérieurement et le nouvel état du système. Ce processus permet aussi d'éviter que le système puisse anticiper, par exemple, l'arrivée d'une période sans vent et partant, exploite toutes les possibilités de stockage.

Ce type de modèle est crucial pour mieux appréhender les différents défis (intégration à grande échelle des énergies renouvelables variables (éolien, solaire), évaluation des besoins de flexibilité, représentation précise du parc de production avec limites opérationnelles, etc.) auxquels le système électrique de demain devra faire face.

3. Inputs du modèle

CRYSTAL SUPER GRID minimise les coûts de production totaux du système électrique, tout en équilibrant l'offre et la demande. S'appuyant sur une description détaillée des caractéristiques physiques (centrales thermiques, sources d'énergie renouvelables, lignes d'interconnexion, etc.) et financières (contrats d'achat d'électricité, de gaz, de pétrole, etc.) du parc de production électrique, le modèle permet de mener des analyses très détaillées.

Les données qui l'alimentent sont majoritairement extraites de banques de données publiées notamment par ENTSO-E, le réseau européen des gestionnaires des réseaux de transport, et l'AIE, l'Agence internationale de l'énergie.

Les technologies intégrées dans le modèle sont rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1 Technologies de production disponibles dans Crystal Super Grid

Thermiques (fossiles)	Renouvelables
Nucléaire	Réservoirs d'eau
Charbon	Hydroélectricité au fil de l'eau
Lignite	Hydroélectricité : pompage - turbinage
Turbine à gaz à cycle combiné	Solaire photovoltaïque
Turbines à gaz à cycle ouvert	Éolien onshore/offshore
Pétrole	Thermique renouvelable (biomasse)

Pour les analyses historiques ou à court terme, les données relatives à la demande, à la capacité installée et au taux de disponibilité du parc proviennent d'ENTSO-E. La Statistical Factsheet d'ENTSO-E fournit par exemple de nombreuses informations intéressantes. Les descriptions détaillées des capacités et les profils de la demande sont vérifiés ou peuvent être complétés par des données provenant des différents sites internet des gestionnaires des réseaux de transport européens.

Les projections s'appuient généralement sur les capacités installées issues des scénarios du plan décennal de développement du réseau élaboré par ENTSO-E. Ce plan fournit également des estimations de la demande future et les profils de demande associés. Ces scénarios sont fournis par Artelys, le développeur du modèle CRYSTAL SUPER GRID. L'évolution du coût variable des combustibles pour le système énergétique européen est tirée du *World Energy Outlook*, la publication phare de l'AIE.

Le modélisateur a la possibilité d'intégrer ses propres hypothèses dans le modèle. Pour certains exercices réalisés avec CRYSTAL SUPER GRID, le Bureau fédéral du Plan a par exemple utilisé les résultats du modèle PRIMES², plus précisément les résultats du module d'expansion de capacité du système électrique européen ainsi que les prix des quotas d'émission de CO₂: ces exercices sont documentés dans la partie 6 du document. Les perspectives de demande peuvent également être calibrées en fonction des résultats du modèle PRIMES : le profil de la demande tiré du Plan décennal est alors maintenu, mais la demande annuelle totale est alignée sur les résultats de PRIMES.

² PRIMES est un modèle de système énergétique qui met en évidence l'interdépendance entre la production et la consommation d'énergie et rend compte des arbitrages entre les différentes sources et formes d'énergie ainsi que des liens entre les secteurs consommateurs d'énergie. La Commission européenne l'utilise pour définir son scénario de référence et estimer les effets par exemple du Cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030.

Lorsque le modèle est utilisé pour des projections, il est essentiel de tenir compte du taux de pénétration important ou non d'applications influant sur la demande. On pensera, pour le transport de voyageurs, aux motorisations électriques amenées à remplacer les moteurs à combustion interne, et pour le chauffage des bâtiments, aux pompes à chaleur électriques qui se substitueront aux combustibles fossiles. En outre, la numérisation et le déploiement des réseaux intelligents devraient faciliter la gestion de la demande : une fraction de la demande totale pourra être modulée de manière (plus) flexible. Le stockage décentralisé³ compte aussi parmi les possibilités d'avenir du système électrique. Les perspectives pour ces nouvelles applications et possibilités techniques sont étudiées au cas par cas, à partir d'une revue de la littérature et d'avis d'experts et sont intégrées dans CRYSTAL SUPER GRID. Ensuite, des algorithmes d'optimisation complexes calculent l'allocation optimale des unités de production installées dans les zones interconnectées.

³ Par exemple les batteries domestiques comme Powerwall de Tesla.

4. Output du modèle

Les besoins de flexibilité sont devenus patents ces dernières années et devraient encore gagner en importance du fait de l'expansion des sources d'énergie renouvelables variables (vent, soleil). Ces dernières, en particulier, induisent de fortes variations de la demande résiduelle (la partie de la demande d'électricité qui subsiste après déduction de la demande satisfaite par la production solaire et éolienne), si bien que les profils de charge (résiduelle) diffèrent sensiblement des profils historiques. L'écart de consommation entre le jour et la nuit par exemple se réduit, la production d'énergie solaire contribuant à lisser le pic de consommation observé à la mi-journée. Une forte pénétration des panneaux photovoltaïques pourrait même faire évoluer le pic de la mi-journée en un creux pour la capacité résiduelle.

Le besoin de flexibilité pourra être satisfait par les possibilités suivantes (combinées ou pas) :

- le stockage (pompage-turbinage, batteries, etc.) ;
- la gestion de la demande (effacement ou report total ou partiel de la demande) ;
- des unités de production flexibles (ex. centrales au gaz) ;
- la déconnexion de la production variable (*curtailment*) ;
- l'interconnexion (flexibilité via les pays voisins).

Il est dès lors essentiel d'avoir une idée des besoins (futurs) de flexibilité et (de la part) des (différents) leviers disponibles pour mettre en œuvre cette flexibilité, ainsi que des coûts qui y sont associés, pour élaborer les politiques à mener.

Parmi les politiques possibles, certaines pourraient viser à développer ou étendre l'une ou l'autre des possibilités de flexibilité susmentionnées. On pourrait ainsi par exemple étudier l'impact sur les coûts marginaux du système et les émissions de CO₂ d'un accroissement de la capacité de pompage-turbinage en Belgique par la construction d'un troisième bassin à Coo (projet Coo3). Une autre possibilité serait de réaliser, à partir des résultats du modèle, une analyse coûts-bénéfices de projets de transport d'électricité.

4.1. Indicateurs

Les indicateurs fournis par le modèle peuvent être classés selon le *trias energetica*, dont les trois principes sous-jacents sont la durabilité, la sécurité d'approvisionnement et l'accessibilité financière. Quelques exemples parmi les indicateurs disponibles sont énumérés ci-dessous.

- Pour la durabilité : les émissions de CO₂ du système électrique couvertes par le système européen d'échange de quotas d'émissions (ETS). Seules les émissions de CO₂⁴ sont concernées, et non les émissions totales de gaz à effet de serre, ni les émissions de polluants locaux.
- Pour la sécurité d'approvisionnement : le *Loss of Load Expectation* (LOLE) et l'*Energy Not Supplied* (ENS). Le LOLE est un calcul statistique du nombre d'heures par an pendant lesquelles l'offre ne

⁴ Les émissions des installations de cogénération ne sont pas modélisées et doivent être ajoutées.

sera pas suffisante pour couvrir la demande (à long terme). L'ENS correspond à la quantité d'électricité non fournie en raison de l'écart entre l'offre et la demande. Les indicateurs LOLE et ENS sont intéressants pour étudier l'adéquation du système électrique.

- Pour l'accessibilité financière : le coût marginal du système (CMS). Le prix de l'électricité est déterminé par la dernière centrale nécessaire dans le système pour couvrir la demande. Le coût de production variable de cette centrale marginale détermine le prix pour l'ensemble des autres technologies de production (l'éolien, le solaire, le nucléaire, etc.) qui génèrent de l'électricité au même moment selon le principe *paid as cleared*⁵. Le coût marginal du système peut être considéré comme un proxy du 'prix' dans un marché qui rémunère uniquement l'énergie produite (*energy-only market*). Ce CMS ne correspond toutefois pas au prix payé par le consommateur final. Quelques nuances à ce sujet méritent d'être apportées :
 - Le CMS concerne le prix du *produit* (électricité), qu'il ne faut pas confondre avec la facture finale envoyée périodiquement au client, laquelle englobe également, voire principalement, d'autres éléments de coût comme les taxes.
 - Le CMS est déterminé par plusieurs hypothèses qui concernent notamment le prix du combustible, le rendement de conversion, les coûts opérationnels et d'entretien variables ainsi que le prix du CO₂.
 - Il convient également de noter qu'aucun élément du CMS ne reflète les coûts fixes. Le coût du démantèlement de centrales, les investissements notamment de jeunesse et d'autres types de coûts fixes qui ne sont pas liés à l'exploitation d'une centrale, ne sont pas pris en considération.

4.2. Ce que le modèle ne fait pas

CRYSTAL SUPER GRID ne permet pas d'étudier les problématiques suivantes :

- Simuler l'équilibre entre toutes les formes d'énergie. Étant donné que le modèle est orienté sur l'électricité, les analyses des besoins futurs en gaz naturel de la Belgique ou de la place des produits pétroliers dans le futur système de transport ne peuvent pas être envisagées.
- Déterminer un portefeuille d'investissements optimal pour la Belgique : l'extension de capacité optimale pour la Belgique ou, plus largement, pour la zone CWE, ne peut être déterminée avec cette version du modèle. En d'autres termes, la composition du parc de production et la demande d'électricité sont exogènes.
- Réaliser des études physiques du réseau : le modèle n'est pas un modèle de réseau pouvant calculer et résoudre les congestions internes : la seule finalité du modèle est de réaliser des études du marché. D'un point de vue technique, cela se traduit par la prise en compte de capacités de transfert nettes pour représenter les échanges transfrontaliers d'électricité.

⁵ L'électricité est un produit uniforme qui peut être généré par différentes technologies. Les coûts de production varient selon la technologie en raison de différences au niveau du coût des combustibles, de l'achat de quotas d'émission, de l'entretien, etc. Lorsque l'électricité est mise aux enchères, les différents producteurs offrent leur électricité à des prix différents (qui couvriront tout au moins leurs coûts variables). Selon le principe *Paid as cleared*, une fois que le prix d'équilibre du marché (l'intersection de l'offre et de la demande) a été déterminé, tous les producteurs retenus reçoivent ce prix d'équilibre, indépendamment de leurs coûts de production réels. Il peut en résulter des rentes inframarginales. *Paid as bid* est un principe alternatif selon lequel le producteur, s'il est sélectionné, reçoit le prix qu'il a proposé.

5. Mesures possibles

L'encouragement des investissements supplémentaires dans l'éolien offshore est un exemple de mesure se prêtant bien au chiffrage, tout au moins partiel, au moyen de CRYSTAL SUPER GRID. Ces investissements pourraient viser par exemple la construction d'un nouveau parc éolien offshore (300 MW) dans les eaux belges de la mer du Nord. Deux scénarios pourraient être simulés avec CRYSTAL SUPER GRID : l'un inclurait la construction du nouveau parc en Belgique, l'autre pas. La comparaison de ces deux scénarios sur un même horizon temporel permettra de formuler des observations sur la durabilité, la sécurité d'approvisionnement et l'accessibilité financière.

L'impact⁶ de la mise en œuvre de cette mesure sur le budget de l'État peut également être quantifié. L'exploitant d'éoliennes offshore reçoit des certificats verts par unité d'électricité produite (exprimée en MWh). La CREG, l'organisme fédéral de régulation des marchés de l'électricité et du gaz naturel, octroie ces certificats verts aux producteurs d'énergie éolienne titulaires d'une concession domaniale pour produire de l'électricité renouvelable dans les eaux territoriales belges. Elia, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité, est tenu, dans le cadre de ses missions de service public, d'acheter les certificats verts aux producteurs d'énergie verte lorsque ceux-ci en font la demande. Le coût des certificats achetés par Elia est répercuté (supplément) dans les tarifs d'électricité facturés, proportionnellement à la consommation. Toutefois, des règles de dégressivité sont prévues pour les clients qui consomment plus de 20 MWh⁷ par an. Ces clients ont droit, par tranche prédéfinie au-delà des 20 MWh, à un remboursement (partiel) du supplément qu'ils paient en soutien à l'éolien offshore. Ce montant remboursé aux grands consommateurs provient des caisses de l'État et a donc un impact direct sur le budget de l'État. Ce montant est estimé à quelque 82 millions d'euros en 2017 et à 98 millions d'euros en 2018.

Une autre mesure pourrait consister à développer de nouvelles interconnexions avec les pays voisins pour donner plus de latitude au gestionnaire du réseau de transport Elia. Le plan fédéral de développement du réseau de transport d'électricité, établi tous les quatre ans par le gestionnaire du réseau de transport, doit en effet être approuvé par le ministre fédéral de l'Énergie. Ce plan présente les investissements à réaliser dans le réseau et explique pourquoi ils sont nécessaires.

Un tel exercice a déjà été réalisé avec CRYSTAL SUPER GRID : on a calculé quel serait l'impact en 2027 de la construction d'Alegro II (connexion additionnelle entre la Belgique et l'Allemagne) et de Nautilus (connexion supplémentaire entre la Belgique et le Royaume-Uni) sur différents indicateurs qui caractérisent le système électrique belge (et européen), dont les émissions de CO₂. Certains résultats sont présentés dans le tableau 2.

Pour une demande d'électricité identique, la construction de nouvelles interconnexions entraîne une modification des profils de production des centrales (belges). En effet, ces interconnexions supplémentaires donnent accès, à certains moments, à une électricité meilleur marché produite à l'étranger. Étant donné que CRYSTAL SUPER GRID est un modèle d'optimisation qui réduit le coût total de production

⁶ Cet impact est partiel étant donné que les effets indirects (revenus, emploi) ne sont pas pris en compte.

⁷ À titre de comparaison : un ménage belge moyen, composé de 4 personnes, consomme quelque 4 MWh par an.

du système, il optera pour une hausse de la production dans le pays où celle-ci est la moins coûteuse (coût de transport y compris) à ce moment-là.

Dans de tels exercices, les hypothèses relatives au contexte international ont naturellement une importance essentielle. Les hypothèses relatives au parc de production des pays voisins, aux prix des combustibles, au prix du carbone, etc. influencent sensiblement les résultats finaux. Prenons la situation où le prix du carbone⁸ en 2027 est supposé ne pas être très élevé, du moins pas assez élevé pour entraîner un changement dans la courbe d'offre (*merit order curve*). Nous constatons qu'une extension des interconnexions⁹ fait baisser les émissions de CO₂ de la Belgique. Des prix du carbone trop bas favorisent l'utilisation du charbon et du lignite au détriment des centrales au gaz. La Belgique n'est plus équipée de centrales au charbon, mais bien de centrales au gaz. Cependant, le faible prix du carbone rend les centrales au gaz moins compétitives. Les centrales au charbon installées à l'étranger seront alors sollicitées et l'électricité résiduelle sera importée dans notre pays.

En conséquence, par rapport à un scénario où Alegro II et Nautilus ne sont pas construits¹⁰, les émissions belges de CO₂ diminuent de 0,3 Mt équivalent CO₂, tandis que les émissions de CO₂ augmentent de 0,8 Mt équivalent CO₂ à l'échelle européenne. Cette évolution est due à une hausse de la production d'électricité des centrales au charbon et au lignite en Europe (principalement en Allemagne et en Pologne), la production à partir du charbon (resp. lignite) augmentant de 1,7 TWh (resp. 0,1 TWh). Les émissions de CO₂ de ces centrales au charbon ne sont que très partiellement compensées par une réduction de la production dans les centrales au gaz européennes¹¹: baisse de la production de 1,3 TWh des turbines gaz-vapeur à cycle combiné et de 0,5 TWh des turbines à gaz à cycle ouvert.

Tableau 2 Exemple de mesure : extension des interconnexions, 2027

	Référence	Addinterco vs Référence
CMS (€/MWh)	71,1	-0,6%
Emissions CO ₂ (Mt CO ₂)	3,6	-3%
LOLE (h)	<3h	PA

Source : Crystal Super Grid

Note : PA est l'abréviation de 'pas d'application'. Si les deux systèmes sont adéquats selon la norme légale (LOLE < 3h et LOLE95 < 20h), une modification de LOLE n'est pas rapportée.

⁸ Le prix des quotas d'émission fixé au niveau européen et qui est une composante du coût de production de l'électricité.

⁹ Soit le scénario 'Addinterco' dans le tableau 2.

¹⁰ Soit le scénario de référence dans le tableau 2.

¹¹ Les émissions de CO₂ par MWh d'électricité produite par une centrale au charbon sont environ deux fois plus élevées que celles générées par une centrale au gaz.

6. Applications

Le Bureau fédéral du Plan a déjà utilisé le modèle CRYSTAL SUPER GRID à plusieurs reprises, plus précisément pour répondre à des questions de politique spécifiques ayant trait au système électrique. L'étude de l'impact socioéconomique du Pacte énergétique en est un exemple récent. Cette étude, demandée le 22 décembre 2017 par la cellule stratégique de la ministre fédérale de l'Énergie, Mme Marghem, visait à répondre à une demande de chiffres additionnels, formulée après la publication de la note de vision commune par les quatre ministres de l'Énergie. Cette nouvelle étude avait pour objectif d'analyser, à l'horizon 2030, l'impact sur certains indicateurs socioéconomiques de quatre scénarios électriques. La cellule stratégique avait défini les scénarios et les indicateurs à calculer.

D'autres études récentes du BFP, réalisées au moyen de CRYSTAL SUPER GRID, sont mentionnées dans la bibliographie.

Bibliographie

Artelys (2015), Artelys Crystal Super Grid, Documentation

Artelys (2016), European electricity system 2015 (historical), Release note, Artelys Crystal Super Grid

Devogelaer D. et B. Laine (2016), *Marché de l'électricité : facteurs influençant la formation des prix de gros dans une petite économie ouverte - Enseignements tirés de la relance du nucléaire en Belgique*, Bureau fédéral du Plan, WP 9-16, Octobre.

Devogelaer D. et D. Gusbin (2017), *Cost-benefit analysis of a selection of policy scenarios on an adequate future Belgian power system - Economic insights on different capacity portfolio and import scenarios*, Bureau fédéral du Plan, Rapport, Février.

Devogelaer D. (2017), *Increasing interconnections: to build or not to build, that is (one of) the question(s) - Addendum to the cost-benefit analysis of adequate future power policy scenarios*, Bureau fédéral du Plan, Rapport, Septembre.

Devogelaer D. and D. Gusbin (2018), *Insights in a clean energy future for Belgium - Impact assessment of the 2030 Climate & Energy Framework*, Bureau fédéral du Plan, WP 5-18, Mai.

ENTSO-E (2017), Ten-Year Network Development Plan 2016, <http://tyndp.entsoe.eu/2016/>.

ENTSO-E (2018), Statistical Factsheet 2017, https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/Statistics/Factsheet/entsoe_sfs_2017.pdf.

International Energy Agency (2017), World Energy Outlook 2017, Paris.