

Les mécanismes régissant l'évolution du facteur d'émissions de la consommation française d'électricité



SYNTHÈSE

La présente étude montre que **le niveau de consommation seul ne permet pas d'expliquer le niveau du facteur d'émissions de l'électricité consommée en France**. A l'origine de ce constat se trouve l'adéquation entre les niveaux de production et de consommation, exerçant une contrainte permanente sur le réseau et sur les équilibres que prévoient les acteurs de la chaîne de valeur de l'électricité. La consommation doit être, selon ce principe, couverte en permanence par la production nationale et par les imports que réalisent les fournisseurs auprès des producteurs étrangers.

Pour arbitrer entre le recours à la production nationale et les importations, les fournisseurs ont recours aux marchés de l'électricité. Les stratégies mises en place par les fournisseurs pour se couvrir reposent sur la notion d'ordre de préséance économique, ou ordre de mérite, à l'origine du fonctionnement des marchés de court-terme de l'électricité. Selon ce principe, les centrales sont classées par ordre de préséance économique, ou « merit order », selon leur coût marginal de production et par l'imputation du prix européen du carbone, selon le caractère émissif de chacune d'entre elles. Les fournisseurs y ont recours pour adapter leur portefeuille client, sans que toutefois les proportions exactes ne soient connues.

Le facteur d'émissions de la consommation, dépendant de cette logique d'ordre de mérite, varie selon les modes sollicités à un instant donné par les fournisseurs. Cet ordre de mérite est également très sensible aux aléas divers rencontrés dans un pays ou un autre. Par exemple, en cas d'augmentation du prix du gaz naturel (ou méthane), comme cela est observé depuis l'été 2021, il peut être plus intéressant de faire appel à des centrales au charbon qu'à des centrales à gaz, même si ce dernier combustible fossile est moins émissif dès lors que l'écart de prix entre les deux énergies compense le prix du carbone dans le système EU-ETS. Ainsi, les facteurs d'émissions de la production, des imports (car il peut en être de même dans les autres pays) et

de la consommation s'en verront affectés. **Devant autant d'aléas auxquels est soumis le marché de l'électricité, il est alors impossible de conclure que les niveaux de facteurs d'émissions évoluent de façon linéaire avec le niveau de consommation**. Il y a, entre ces deux grandeurs, une diversité de structures qui s'intercalent et qui varient selon des paramètres évoluant de façon indépendante et aléatoire.

D'une manière générale, sur les 4 années étudiées, la consommation d'électricité a **toujours** été moins émettrice de CO₂ que la consommation d'énergies fossiles. Bien que des niveaux élevés de consommation tendent à solliciter des modes de production plus carbonés, les imports et leur contenu carbone sont susceptibles d'expliquer entre 10 % et 80 % de la variation du facteur d'émission, y compris à des périodes de l'année durant lesquelles les niveaux de consommation sont peu élevés. **L'analyse conduite dans ce rapport a donc permis de prouver numériquement que la thèse selon laquelle le niveau de consommation explique le niveau du facteur d'émissions est fausse**. En étudiant le contenu de l'intersection des 5 000 données de plus forts facteurs d'émissions et de plus forts niveaux de consommation (42 % des données s'intersectent), **l'analyse montre que ce sont davantage les écarts entre les niveaux de consommation et de production, celle-ci devenant plus variable, qui tendent à expliquer l'évolution du facteur d'émissions de la consommation, davantage que ledit niveau de consommation seul**. Toutefois, il convient d'être très vigilant sur la transposabilité de cette conclusion (déduite à partir d'une analyse a posteriori de données) en prospective.

INTRODUCTION

Le facteur d'émissions de la consommation française d'électricité évolue à chaque instant, selon la nature des modes de production mobilisés par le pays pour répondre à la demande nationale. Il s'oppose en tout point aux facteurs d'émissions d'autres énergies telles que le gaz naturel, le fioul domestique ou encore l'essence sans-plomb 95 E10, dont les valeurs sont certes plus élevées, mais dont les profils d'évolutions temporelles montrent une certaine constance à court et moyen termes. Sur ce dernier point, les variations permanentes du facteur d'émissions de la consommation d'électricité, en France comme ailleurs interrogent et amènent alors à s'intéresser de plus près aux paramètres qui les conditionnent. Il fait, à ce sujet, l'objet de nombreuses idées reçues : une d'elles consiste à affirmer que, lors des périodes de forte consommation, le niveau du facteur d'émissions de la consommation serait alors plus élevé que lors des périodes de plus faible consommation. Cette thèse, sous-tendant que les niveaux de consommation permettent d'expliquer à eux-seuls les niveaux du facteur d'émissions de la consommation ne fait pourtant pas consensus au sein des énergéticiens. Les travaux menés au travers de la présente étude ont permis d'avancer des éléments de réponses à la question suivante : « **Pourquoi les seuls niveaux de consommation ne suffisent pas à expliquer l'évolution du facteur d'émissions de la consommation d'électricité ?** ».

Ces travaux mettent en œuvre une approche systémique, au premier rang de laquelle se trouvent les notions de marché de l'électricité, d'une part, et d'ordre de préséance économique d'autre part, régissant les échanges et l'appel aux modes de production sur le territoire national (1). Grâce aux données horaires de consommation, de production par mode, d'imports et d'exports disponibles en accès libre, près de quatre années d'évolution du facteur d'émissions de la consommation sont reconstituées (2), ce qui représente près de 35 060 heures de consommation. La méthode de calcul, nécessitant la réalisation d'un arbitrage entre les quantités d'électricité produites et importées à allouer

à la consommation, repose sur une clé de répartition paramétrique dénommée « pass-through », qui fixe la quantité d'électricité importée et aussitôt réexportée. A l'issue de cette reconstruction, différents niveaux d'analyses sont menés. Le premier niveau d'analyse en séries temporelles (3) est destiné à mesurer le niveau de contribution respectif de chacune des quantités précédemment évoquées (imports, production française, export) au facteur d'émissions de la consommation. Il permet d'émettre les deux postulats suivants :

- **un niveau de consommation élevé (et respectivement faible) n'implique pas nécessairement un niveau de facteur d'émissions élevé (et respectivement faible) ;**
- **un niveau de facteur d'émissions élevé (et respectivement faible) n'implique pas nécessairement un niveau de consommation élevé (et respectivement faible).**

Une seconde analyse, numérique (4), démontre ces postulats en confrontant directement les ensembles de plus forts facteurs d'émissions et de plus forts niveaux de consommation par l'étude de leur niveau d'intersection. Il y est notamment montré que le taux d'intersection entre l'ensemble des 5 000 premières valeurs de plus forts niveaux de consommation et l'ensemble des 5 000 premières valeurs de plus forts facteurs d'émissions n'est seulement que de 42 %. Grâce à la mise en œuvre de méthodes de clusterisation, l'étude du contenu de ce niveau d'intersection met en évidence des structures types de situations de production, consommation, imports, exports et facteurs d'émissions associés. L'analyse de celles-ci montre enfin que **ce sont davantage les écarts entre les niveaux de consommation et de production qui conditionnent le niveau du facteur d'émissions de la consommation, plutôt que ledit niveau de consommation seul.**

1. LE MARCHÉ DE L'ÉLECTRICITÉ

L'électricité, en tant que flux d'électrons, ne se stocke pas à grande échelle. Il faut par conséquent maintenir à chaque instant un équilibre entre la quantité d'électricité injectée sur le réseau et la quantité d'électricité qui en est soutirée. Du point de vue économique, cela se traduit par une adéquation permanente entre les niveaux de production et d'importations d'un côté (flux injectés), avec les niveaux de consommation et d'exportations de l'autre (flux soutirés). Ce nécessaire équilibre exerce une contrainte permanente sur le réseau de transport et responsabilise de fait l'ensemble des acteurs intervenant au sein de la chaîne de valeur de l'électricité. Les gestionnaires de réseau, les producteurs ainsi que les fournisseurs doivent alors veiller à ce que les quantités qu'ils injectent ou qu'ils soutirent soient respectivement conformes aux quantités qu'ils avaient prévues d'injecter ou de soutirer par ailleurs, en amont de l'échéance de livraison aux consommateurs. Le marché de l'électricité permet à ce titre à chacun de ces acteurs de communiquer et de se coordonner entre eux. Il peut s'y échanger deux types de produits :

- **Les produits de long-terme**, représentant **80 % des volumes**¹, s'échangent sur la bourse *EEX derivatives* ou bien par le biais de *contrats gré-à-gré* entre producteurs et fournisseurs (ou producteurs et gestionnaires de réseau) ;
- **Les produits de court-terme**, représentant **20 % des volumes**¹, s'échangent quant à eux sur la bourse *EPEX SPOT*.

Les prix des produits de court-terme, bien que ne représentant qu'un cinquième des volumes échangés, constituent, par « anticipation naïve », les principaux indicateurs des prix des produits de long-terme. Ils disposent en ce sens d'une importance toute particulière dans la stratégie de couverture des fournisseurs.

Chaque heure, sur la bourse *EPEX SPOT*, une enchère est réalisée sur la base d'un mécanisme de préséance économique permettant de répondre à la demande à moindre coût : c'est le « *merit-order* ». Sur celui-ci, les centrales sont classées par ordre croissant de coût marginal de production, tel qu'exposé en figure 1 ci-dessous.

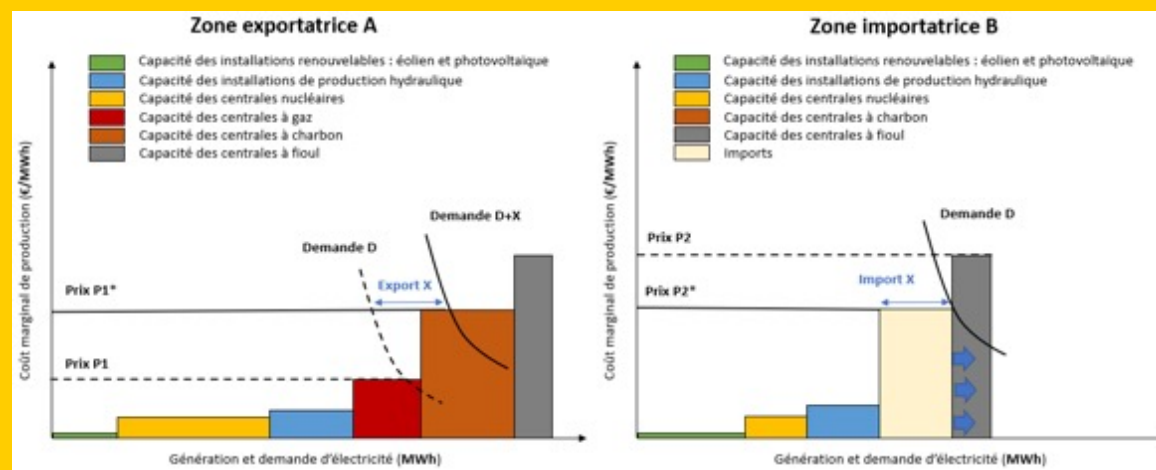


Figure 1 : Illustration de l'ordre de préséance économique et d'une activité d'import-export entre deux pays
Source : Union Française de l'Electricité

¹ Edition 2020 du rapport de surveillance des marchés de gros de l'électricité - CRE

- **La variation de la demande**, qui se résume à une translation de la courbe sur l'axe des abscisses ;
- **La météo** ayant une influence sur le niveau de consommation et sur les modes de production renouvelables variables, lesquels « décalent » l'ensemble des modes de production dans l'ordre de mérite ;
- **La disponibilité des modes de production français et étrangers** ;
- **Les prix des combustibles (et/ou le prix du CO₂)**. A titre d'illustration, la forte hausse du prix du méthane, bien que moins émissif que le charbon, a engendré une inversion à la fin de l'année 2021 de l'ordre d'appel des centrales à gaz par rapport aux centrales à charbon et ce en dépit d'un niveau de la taxe carbone historiquement élevé.

2. DONNÉES ET HYPOTHÈSES DU CALCUL DU FACTEUR D'ÉMISSIONS DE LA CONSOMMATION

2.1. LES DONNÉES DISPONIBLES

Le facteur d'émissions de la consommation est calculé à partir des données figurant dans le tableau 1 ci-dessous.

Les données de production par mode, de consommation, d'imports et d'exports français sont disponibles au pas de temps horaire, pour les quatre années étudiées, ce qui représentent près de 35 060 heures de production – consommation – imports – exports. Elles proviennent de la plateforme en accès libre d'ENTSO-E. Par soucis de compatibilité avec ces précédentes données et pour les convertir en données d'émissions de $\text{CO}_{2\text{éq}}$, les facteurs d'émissions directes des modes utilisés proviennent de la même plateforme en accès libre d'ENTSO-E et sont également utilisés par la plateforme Eco2Mix de RTE². La biomasse a été comptabilisée avec un facteur d'émissions nul, ce qui est certes conforme aux standards EU-ETS et à la Base Carbone® de l'Ademe, mais qui néanmoins suppose une gestion durable de la ressource.

Données	Pas de temps	Nombre d'échantillon annuel	Source
Consommation (MW)	Horaire	2016 – 2017 – 2018 – 2019	ENTSO-E data
Production par mode ³ (MW)			
Imports français ⁴ (MW)			
Exports français ⁴ (MW)			
Facteurs d'émissions directes des modes ($\text{gCO}_{2\text{éq}}/\text{MW}$)		2021	ENTSO-E – RTE – Eco2mix

Tableau 1 : Données de calcul à disposition

² <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-emissions-de-co2-par-kwh-produit-en-france>

³ France, CWE (Allemagne + Belgique + Pays-Bas), Suisse, Grande-Bretagne, Italie du Nord, Espagne

⁴ Au près des CWE (Allemagne + Belgique + Pays-Bas), Suisse, Grande-Bretagne, Italie du Nord, Espagne – Flux commerciaux

2.2. LES HYPOTHÈSES FIXÉES

La méthode de reconstitution employée respecte la nécessité d'assurer l'équilibre entre les niveaux de production, de consommation, d'imports et d'exports. Cette égalité induit la réalisation d'un arbitrage entre les quantités d'électricité produites et importées à allouer à la consommation. Pour ce faire, trois méthodes, relevées dans la littérature, existent :

- **La méthode de priorisation de la production d'électricité nationale** sur les importations, visant à comptabiliser d'abord toute la production française puis de la compléter par les imports ;
- **La méthode de priorisation des imports d'électricité** sur la production nationale, visant de façon antithétique à comptabiliser d'abord toutes les importations puis de compléter par la production ;
- **La méthode « bouquet d'électricité »**, visant à faire le bilan des quantités produites et importées à chaque heure, puis à calculer les émissions induites de ces deux quantités d'électricité, pour enfin établir le facteur d'émissions résultant et, de fait, commun à la consommation et aux exports ;

Les deux approches de priorisation conduisent à s'affranchir du principe physique de la circulation des électrons, selon lequel ces derniers sont consommés au lieu le plus proche de leur centre de production. Elles n'ont pas été retenues dans le cadre de ce travail. **La troisième approche « bouquet »** considère qu'une fois que l'électron transite sur le réseau français, il ne dispose plus d'empreinte carbone propre, dès lors qu'il contribue à enrichir l'empreinte carbone moyenne nationale. Ce mode de calcul conduit ainsi à s'affranchir des principes de circulation des électrons dans d'autres mesures.

Puisqu'il est de fait complexe d'apprécier la physique des flux, l'UFE a opté dans le cadre de ce travail pour une méthode qui permettait de pondérer la quantité d'imports réalisés selon des considérations purement économiques, tout en respectant le fait que les quantités d'électricité produites et importées peuvent être simultanément consommées sur le territoire français. Elle repose sur un coefficient, dénommé « pass-through », permettant de définir la quantité d'électricité importée et aussitôt réexportée. **L'approche pass-through**, contrairement aux trois autres, permet à l'UFE de tester une méthode d'arbitrage basée sur le critère économique : il s'agit de faire évoluer le coefficient du pass-through selon les prix de marché. **Par la mise en œuvre du coefficient pass-through, la procédure de calcul dispose alors de la structure permettant la mise en œuvre d'une règle de variation du coefficient** et donc de la quantité d'import prise en compte dans la consommation, **selon que les fournisseurs français importent à l'étranger par contrainte ou par arbitrage économique**. Il convient cependant de souligner que l'établissement des règles de variation du pass-through selon les prix de marché relève d'une certaine complexité. La valeur de celui-ci étant incertaine, il a été fait le choix dans ce travail d'adopter une approche conservative, selon laquelle le facteur d'émissions de la consommation est maximisé. Ainsi, puisque les imports réalisés auprès des zones de marché frontalières sont plus carbonés que la production française, la valeur du pass-through choisie dans le cadre de cette étude est de 10 %. Autrement dit, pour chaque heure analysée, 10 % de la quantité d'électricité importée est immédiatement réexportée tandis que 90 % de l'électricité est consommée en France⁵.

Une fois que les données et hypothèses sont posées, il ne reste qu'à calculer le facteur d'émissions de la consommation d'électricité⁶.

⁵ Dans le cadre de ce travail, l'interdépendance des flux, selon laquelle les exports d'un pays ont un impact sur l'empreinte carbone de leurs propres importations, n'a pas été considérée. Ainsi, le facteur d'émissions des imports n'est calculé qu'à partir des seuls mix de production des pays exportateurs vers la France. Voir le rapport complet pour plus de détails.

⁶ Voir le rapport complet pour plus de détails.

3. ANALYSE EN SÉRIES TEMPORELLES

Les séries temporelles des niveaux de production, consommation, imports et exports et leurs confrontations aux séries temporelles des facteurs d'émissions de la consommation et de la production permettent de mesurer les évolutions relatives de chacune des quantités les unes par rapport aux autres.

Sur la figure 2, les profils d'évolution horaire des niveaux de production et de consommation montrent des saisonnalités. Les maxima sont chaque année atteints entre janvier et mars, tandis que les minima sont atteints lors de la semaine du 15 août. Ces faits s'expliquent par la thermo-sensibilité de la demande. Le gestionnaire du réseau de transport RTE estime en effet que pour une température inférieure ou égale à 15 °C, chaque degré en moins est responsable d'un appel d'environ 2,4 GW sur le réseau⁷. Sur les quatre années étudiées, les extrema sont les suivants (tableau 2).

	Production	Consommation	Imports	Exports
Minimum	36 213 MW	31 453 MW	0 MW	0 MW
Date d'atteinte du minimum	26 août 2018 : 06h	12 août 2018 : 08h	Plus d'une date lors des périodes hors chauffe	Plus d'une date lors de la période de chauffe 2016-2017
Maximum	91 074 MW	94 565 MW ^a	22 312 MW	-31 749 MW
Date d'atteinte du maximum	18 janvier 2017 : 10h	28 février 2018 : 19h	24 avril 2019 : 20h	24 avril 2019 : 20h

Tableau 2 : Dates et valeurs d'atteinte des extrema des niveaux de production, consommation, imports et exports
Source : Union Française de l'Electricité, à partir des données en accès libre d'ENTSO-E

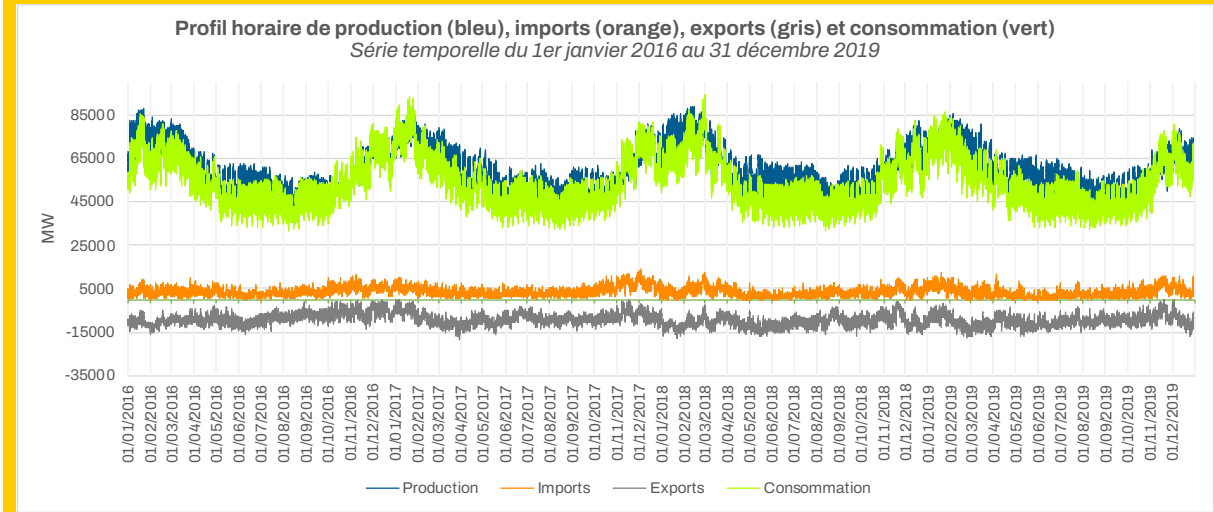


Figure 2 : Séries temporelles des niveaux de production (bleu), imports (orange), exports (gris) et consommation (vert) au pas de temps horaire pour les années 2016 à 2019
Source : Union Française de l'Electricité, à partir des données en accès libre d'ENTSO-E

7 Bilan électrique 2016 - RTE
8 La valeur de la pointe historique de 2012 est égale à 102 GW.

Il peut également être constaté sur cette même figure que les niveaux de production sont régulièrement supérieurs aux niveaux de consommation, témoignant de la bonne capacité dont dispose le parc français à pouvoir répondre à la demande de son propre territoire. Certaines situations de dépassement des niveaux de consommation sur les niveaux de production sont toutefois observées. La figure 3 fait état de ces dernières.

Les mois des périodes froides font l'objet de dépassements réguliers de la consommation par rapport à la production. Il est également intéressant de constater que ces dépassements se concentrent davantage entre les mois d'octobre et de décembre pour l'année 2016, lorsqu'ils se concentrent entre les mois de novembre, décembre et janvier pour l'année 2017. Cette situation a donc majoritairement lieu en automne plutôt qu'en hiver, pourtant synonyme de températures plus froides : c'est donc le signe que **le parc de production français est globalement en mesure de faire face à la hausse de la consommation hivernale**. Ce résultat est à croiser avec les imports réalisés sur les mêmes périodes. En effet, à supposer que le parc français puisse produire plus, ces dépassements peuvent s'expliquer par le fait qu'il peut être plus avantageux économiquement pour les fournisseurs d'importer de l'électricité auprès des zones de marché voisines que d'avoir recours à de l'électricité produite en France. Ce point sera concrètement analysé en partie 4.

La figure 4 montre ci-dessous les profils d'évolution temporelle des niveaux de facteurs d'émissions de la consommation et de la production.

Deux périodes sont particulièrement illustratives du caractère non-linéaire de la relation qui unie le niveau de consommation et de son facteur d'émissions :

- **Entre décembre 2017 et janvier 2018, le facteur d'émissions de la consommation française chute de près de 90 %, tandis que le niveau de**

consommation, culminant en décembre 2017 à près de 80 000 MW, **chute en janvier 2018 de près de 30 %** par rapport à ce précédent niveau, l'abaissant ainsi à 55 000 MW ;

- **Le mois de juillet 2017** montre un profil d'évolution du niveau de consommation constant, dont la moyenne se situe aux alentours de 45 000 MW, tandis que le niveau du facteur d'émissions y étant associé atteint un pic à 100 gCO₂_{éq}/kW sur cette même période.

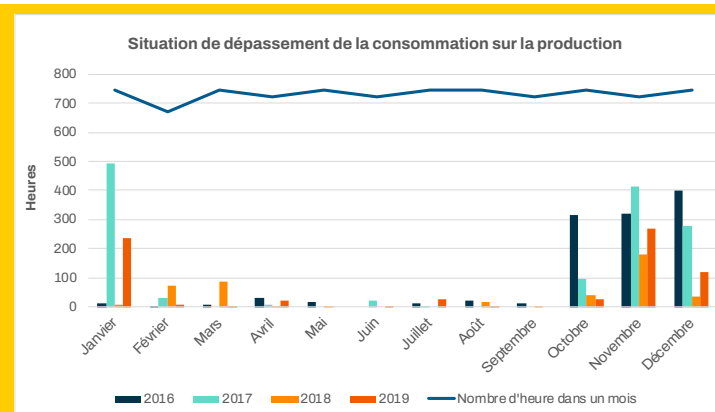


Figure 3 : Nombre de dépassements des niveaux de consommation sur les niveaux de production par mois et par année
Source : Union Française de l'Electricité, à partir des données en accès libre d'ENTSO-E

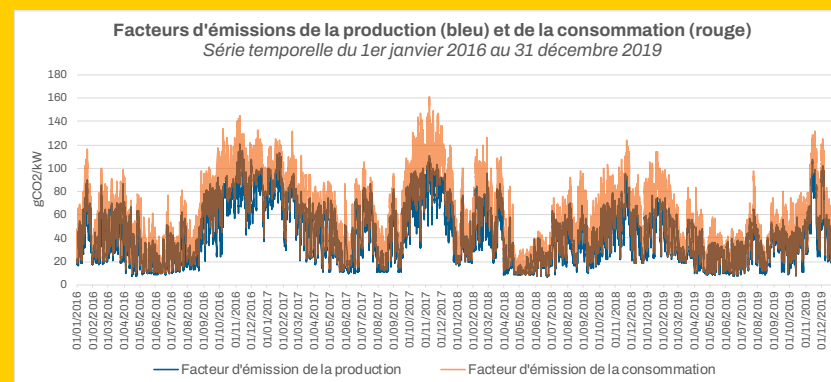


Figure 4 : Séries temporelles des facteurs d'émissions de la production (en bleu) et de la consommation (en rouge)
Source : Union Française de l'Electricité, à partir des données en accès libre d'ENTSO-E

Il reste enfin à mesurer le niveau de contribution des activités d'importations. Pour ce faire, il est opéré la différence entre les facteurs d'émissions de la consommation et de la production, laquelle est étudiée relativement au facteur d'émissions de la consommation. Les écarts relatifs ainsi constatés entre les deux quantités peuvent être donc directement imputés aux activités d'importation. La figure 5 permet de visualiser la série temporelle de ce taux.

Le « signal » temporel obtenu montre une évolution aléatoire pouvant être qualifiée de « bruit blanc ». Selon celui-ci, les activités d'importations expliquent entre 0 % à 70 % de la valeur du facteur d'émissions de la consommation. Ces variations aléatoires peuvent s'expliquer par différents facteurs.

Si le facteur d'émissions de la production est élevé et que la production nationale est forte, alors une faible activité d'importation au facteur d'émissions faible (imports depuis la Suisse par exemple) pourrait expliquer une moindre contribution relative des imports au facteur d'émissions de la consommation. En revanche, plus les imports sont importants et carbonés, plus ils sont susceptibles de porter une partie du facteur d'émissions de la consommation. Par exemple, si le facteur d'émissions des imports est élevé et que la production nationale présente une bonne disponibilité des modes de production renouvelables, alors la contribution des imports au niveau du facteur d'émissions de la consommation pourra être relativement importante car ils porteront une large part du poids de l'impact carbone (pouvant être globalement faible en valeur absolue).

Enfin, selon que les fournisseurs aient plus au moins recours au marché SPOT pour leur approvisionnement, ils peuvent s'exposer dans des proportions plus au moins importantes à la mobilisation de centrales carbonées et

donc à des imports carbonés, ce qui, sur la base des scénarios précédents, peut ajouter du bruit au signal. Ce signal permet ainsi de voir que la contribution des imports au facteur d'émissions est fortement aléatoire.

A l'issue de cette troisième partie, il peut être émis deux postulats, qu'il reste à démontrer au moyen d'une analyse numérique, objet de la quatrième et dernière partie :

- *un niveau de consommation élevé (et respectivement faible) n'implique pas nécessairement un niveau de facteur d'émissions élevé (et respectivement faible) (1) ;*
- *un niveau de facteur d'émissions élevé (et respectivement faible) n'implique pas nécessairement un niveau de consommation élevé (et respectivement faible) (2).*

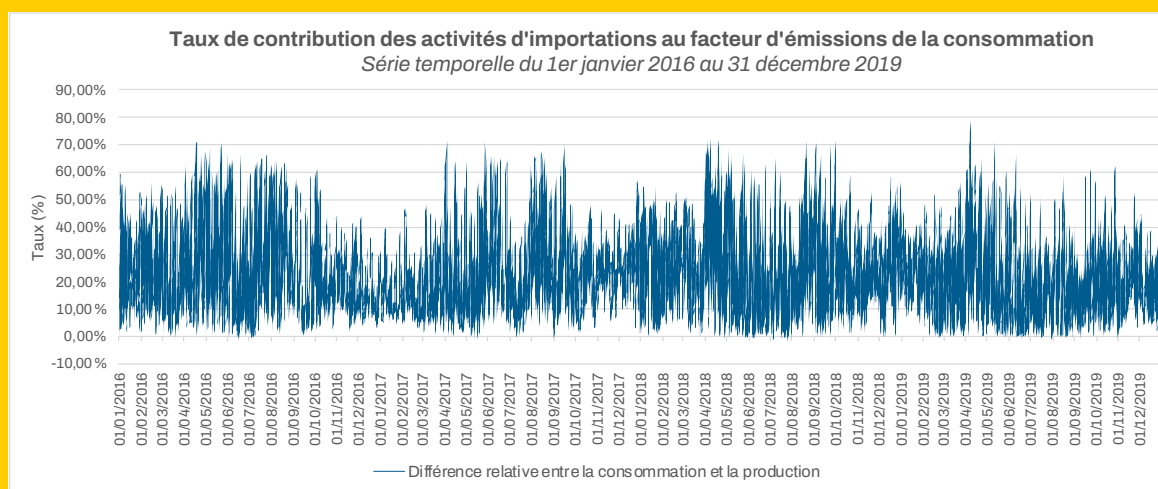


Figure 5 : Différence entre les facteurs d'émissions de la consommation et de la production, relativement au facteur d'émissions de la consommation
Source : Union Française de l'Electricité, à partir des données en accès libre d'ENTSO-E

4. ANALYSE NUMÉRIQUE

4.1. TAUX D'INTERSECTION

L'analyse numérique repose sur la mise en œuvre d'une procédure d'intersection entre les ensembles de niveaux de facteurs d'émissions de la consommation et les niveaux de consommation, classés par ordre décroissant. Chacune de ces valeurs est représentée dans chacun des ensembles par un index commun : la date et l'heure à laquelle la valeur a été atteinte. Cette procédure consiste à mesurer, pour chaque taille d'ensemble (de 1 à 35 060), le nombre d'heures partageant simultanément une position dans l'un et l'autre ensemble. L'objectif de la mise en œuvre d'une telle procédure est, pour un certain niveau, d'isoler les données faisant effectivement l'objet d'une intersection, puisque les données qui ne s'intersectent pas vont a priori dans le sens.

S'il existait une relation linéaire entre les niveaux de consommation et leur facteur d'émissions, alors le taux d'intersection serait toujours égal à 100 % quelque soit la dimension des ensembles considérée. **Ainsi, les plus grands facteurs d'émissions de la consommation ne sont pas nécessairement concomitants aux plus forts niveaux de consommation.**

La courbe du taux d'intersection des deux ensembles selon leur dimension est présentée ci-après en figure 6.

Ce graphique montre une courbe au comportement singulier, où la pente la plus forte concerne des tailles d'ensemble comprises entre 275 valeurs et 5000 valeurs. Entre ces deux dimensions, on peut synthétiquement résumer les informations de la façon suivante :

- Les **275** heures de plus forts niveaux de facteurs d'émissions et de plus forts niveaux de consommation ne s'intersectent pas ;
- Les **1000** heures de plus forts facteurs d'émissions ne représentent pas plus de **9,5 %**

des 1000 heures de plus forts niveaux de consommation ;

- Les **2000** heures de plus forts facteurs d'émissions ne représentent pas plus de **22 %** des 2000 heures de plus forts niveaux de consommation ;
- Les **5000** heures de plus forts facteurs d'émissions ne représentent pas plus de **42 %** des 5000 heures de plus forts niveaux de consommation.

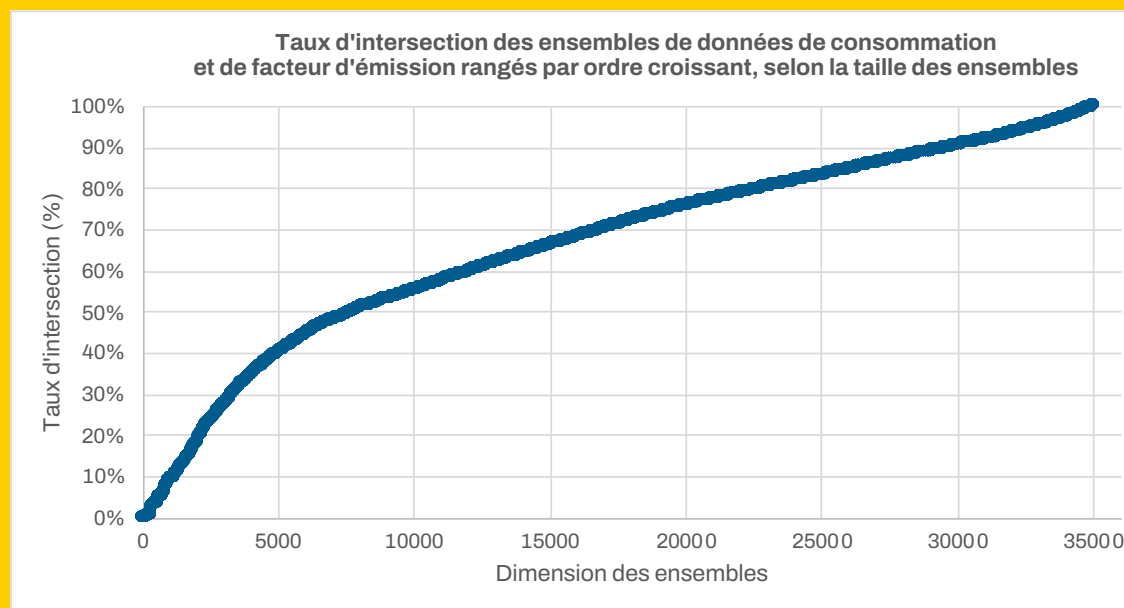


Figure 6 : Graphique du taux d'intersection des ensembles de niveau de consommation et de niveau de facteurs d'émissions, rangés par ordre décroissant, selon leur dimension
Source : Union Française de l'Electricité, à partir des données en accès libre d'ENTSO-E

Le premier résultat montre qu'aucune des 275 premières plus fortes valeurs de facteurs d'émissions de la consommation n'est due à aucune des 275 premières plus fortes valeurs de niveaux de consommation. Cela permet ainsi d'affirmer que les pics de facteurs d'émissions ne sont pas dus aux pics de consommation et réciproquement. Les bornes inférieures associées à chacune des tailles d'ensemble sont mentionnées dans le tableau suivant.

La 5000^e valeur de plus fort niveau de consommation correspond à un niveau moyen de consommation d'une période hivernale, tandis que le 5000^e plus grand facteur d'émissions de la consommation correspond à 1,5 fois sa valeur moyenne sur l'année 2019, soit 60,7 gCO_{2éq}/kWh tel que calculé selon la méthode de la Base Carbone de l'Ademe®. **La valeur maximale (entre 2016 et 2019) vaut 162 gCO_{2éq}/kWh⁹, ce qui est moins élevé que les facteurs d'émissions du gaz naturel et du fioul domestique, lesquels s'élèvent respectivement à 187 gCO_{2éq}/kWh et 266 gCO_{2éq}/kWh d'après la Base Carbone® de l'Ademe.** Dit autrement, sur les 4 années étudiées, la consommation d'électricité a toujours été moins émettrice de CO2 que la consommation d'énergies fossiles.

Dimensions des ensembles	Borne inférieure : niveaux de consommation	Borne inférieure : facteurs d'émissions	Taux d'intersection
275	83 771 MWh	126 gCO _{2éq} /kWh	0 %
1000	78 250 MWh	115 gCO _{2éq} /kWh	9,5 %
2000	74 500 MWh	107 gCO _{2éq} /kWh	22 %
5000	68 270 MWh	92 gCO _{2éq} /kWh	42 %

Tableau 3 : Bornes inférieures des ensembles selon leur dimension



9 Ce facteur d'émissions a été atteint le 09/11/2017 à 05h00, pour un niveau de consommation égal à 59 270 MW.

4.2. PROCÉDURE DE CLASSIFICATION AUTOMATIQUE DES DONNÉES

Puisque le débat porte sur les données de plus forts niveaux de consommation et de plus forts niveaux de facteurs d'émissions, alors l'intersection choisie sera l'intersection des ensembles constitués des 5 000 heures de plus forts facteurs d'émissions et de plus forts niveaux de consommation (soit l'équivalent de 208 jours sur les 4 années étudiées). Le taux d'intersection est de 42 %, ce qui représente environ 2 120 combinaisons (soit en moyenne 22 jours par an) de données de production, consommation, imports, exports et de facteurs d'émissions associés¹⁰.

	Production (MWh)	Consommation (MWh)	Imports (MWh)	Exports (MWh)	FE production (gCO _{2eq} /kWh)	FE consommation (gCO _{2eq} /kWh)	FE imports (gCO _{2eq} /kWh)	FE exports (gCO _{2eq} /kWh)
Minimum	60 508	68 277	2 175	-40	49,3	91,7	170	78,6
Maximum	91 074	94 565	13 772	-15 491	120	145	527	360
Médiane	72 852	74 740	7 081	-4 565	84,6	104	316	123
Moyenne	73 697	75 823	7 189	-5 063	84,7	106	322	132
Ecart-type	6 173	5 544	1 840	2 900	10,8	9,54	59,1	39,3

Tableau 4 : Statistiques conventionnelles des échantillons de données classifiées



¹⁰ Soit 16 960 données au total, en associant pour chaque heure les valeurs de production, consommation, imports et exports ainsi que leurs facteurs d'émissions associés.

Il est à noter que le facteur d'émissions horaire de la consommation le plus élevé (162 gCO₂éq/kWh) ne figure pas parmi le panel de données intersectées. Le facteur d'émissions le plus faible traité dans le cadre de l'étude de cette intersection d'ensemble vaut 91,7 gCO₂éq/kWh. Il convient de remarquer que les extrema et moyennes des niveaux de consommation sont supérieurs à ceux des niveaux de production : cela signifie que sur certaines situations, la production ne parvient pas à elle seule à subvenir aux besoins de consommation. Or, dans la première analyse, les situations remontées de dépassement n'étaient pas fréquentes. Ainsi, pour ces données intersectées, les niveaux d'imports et les facteurs d'émissions associés jouent un rôle important : ils sont d'ailleurs particulièrement élevés, comme en témoignent la moyenne et la valeur minimale, tous deux supérieurs au facteur d'émissions de la consommation française.

L'échantillon de données isolées fait donc l'objet de l'application d'une procédure de classification automatique des données : la procédure dite des « K-moyens ». Cette procédure exige la fixation d'un nombre K de groupes, tout en veillant à ce que celui-ci soit optimal. La méthode de la silhouette en figure 7, communément utilisée à ces fins, fournit à l'endroit de la « cassure » de la courbe, un nombre optimal de 10 groupes. Les nombres de combinaisons correspondant sont recensés dans le tableau 5.

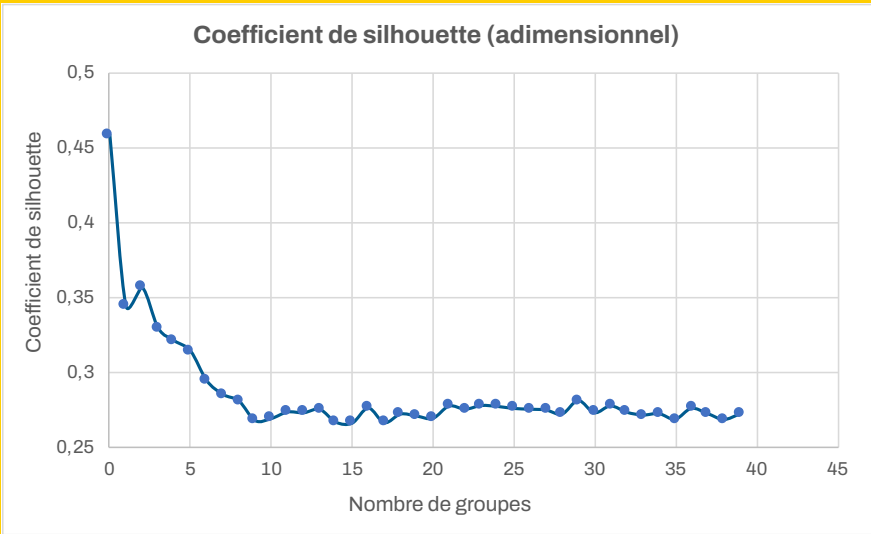


Figure 7 : Coefficient de silhouette

Groupe	Nombre
0	349
1	106
2	265
3	155
4	292
5	168
6	103
7	247
8	257
9	178

Tableau 5 : Nombre de combinaisons par groupe

En vertu des principes conditionnant les méthodes de classification, les combinaisons au sein d'un même groupe sont les plus semblables possibles, tandis que les groupes qu'elles constituent sont les plus dissemblables possibles. Chaque groupe ainsi créé est alors caractérisé par une « combinaison des valeurs moyennes caractéristique ». Ces dernières apparaissent dans le tableau ci-dessous et sont classées par ordre croissant de facteur d'émissions de la consommation.

facteur d'émissions des exports diffère selon le groupe : les facteurs des groupes 0 et 7 figurent parmi deux des trois plus importants facteurs d'émissions de la catégorie.

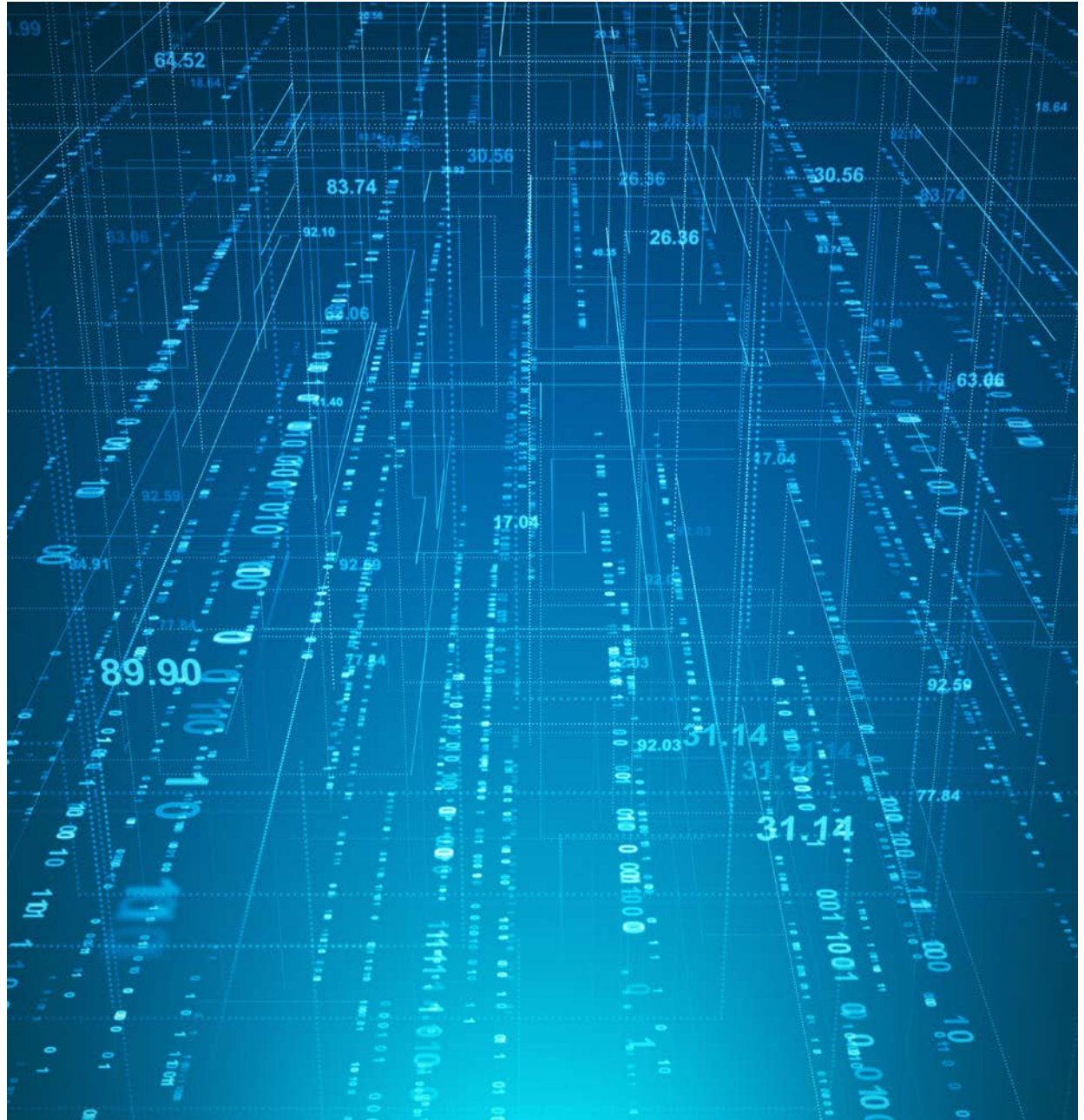
Le tableau ci-dessus comporte quatre types de « structure de groupes » :

- **Structure de groupes 1** : Les groupes 3, 4 et 6 sont caractérisés par des **niveaux moyens de production supérieurs aux niveaux moyens de la consommation**. Les niveaux moyens de production sont d'ailleurs élevés, au regard des autres niveaux moyens de la production. En valeur absolue, les niveaux moyens d'exports sont supérieurs aux niveaux moyens d'imports. Les niveaux moyens des facteurs d'émissions de la production, de la consommation et des exports sont relativement faibles par rapport à leur catégorie respective, tandis que ceux des imports sont relativement élevés.
- **Structure de groupes 2** : Les groupes 0, 2, 5 et 7 sont caractérisés par des **niveaux moyens de production inférieurs aux niveaux de consommation**. Les niveaux moyens d'imports sont supérieurs en valeur absolue aux niveaux moyens d'exports. Le niveau du facteur d'émissions moyen des imports est entre 10 % à 20 % plus faible que le niveau des mêmes facteurs d'émissions moyens des groupes de la structure 1. Les facteurs d'émissions associés à la production et à la consommation disposent de valeurs moyennes (entre 81 gCO₂/kWh et 87 gCO₂/kWh) de l'ordre de 10% supérieures à celles du groupe 1. Enfin, le niveau moyen du

Groupes	Production (MWh)	Consommation (MWh)	Imports (MWh)	Exports (MWh)	FE production (gCO ₂ /kWh)	FE consommation (gCO ₂ /kWh)	FE imports (gCO ₂ /kWh)	FE exports (gCO ₂ /kWh)
3	79 484	75 758	6 067	-9 793	77,0	98,5	372,9	95,4
4	73 039	71 541	6 643	-8 142	74,7	99,5	366,4	98,9
6	84 912	82 590	7 139	-9 462	80,8	100,9	335,2	100,4
5	76 941	78 867	7 934	-6 008	81,2	103,0	318,4	114,0
2	68 443	70 118	6 226	-4 552	85,5	103,7	307,1	119,0
9	80 027	83 272	6 442	-3 197	91,4	105,4	287,4	147,6
7	73 617	78 108	7 417	-2 928	86,6	105,8	306,9	152,8
0	70 261	74 468	7 457	-3 251	86,3	106,4	305,6	148,4
1	86 303	89 730	6 855	-3 428	96,8	110,1	282,7	142,8
8	64 913	70 657	9 086	-3 342	90,3	118,6	331,0	169,9

Tableau 6 : Combinaisons caractéristiques moyennes de chaque groupe
créé par la procédure de classification K-moyens
Source : Union Française de l'Electricité, à partir des données en accès libre d'ENTSO-E

- **Structure de groupes 3** : Les groupes 1 et 9 sont caractérisés par de forts niveaux de consommation et de production (les deux plus élevés dans chacune des catégories respectives) et par des **niveaux de production inférieurs aux niveaux de consommation**. Les facteurs d'émissions associés à la production sont également les deux plus importants (près de 10 % supérieur à ceux de la structure de groupes 2). En valeur absolue, les imports sont plus de deux fois supérieurs aux exports. Les facteurs d'émissions moyens des exports sont près de 50 % supérieur à ceux de la structure de groupes 1. En revanche, les niveaux de facteurs d'émissions moyens des imports sont les plus faibles de leur catégorie.
- **Structure de groupes 4** : Le groupe 8 s'oppose à tous les niveaux aux autres structures de groupes. **Le niveau moyen de consommation est certes plus élevé que le niveau moyen de production (comme pour les structures de groupes 2 et 3), mais leurs niveaux moyens sont les plus faibles en valeur absolue.** Les niveaux moyens des facteurs d'émissions de la consommation et des exports sont en revanche les plus élevés de leur catégorie respective. Enfin, le niveau du facteur d'émissions moyen de la production est également élevé, pointant à la troisième place de sa catégorie.



4.3. ANALYSE DE L'INTERSECTION CLASSIFIÉES

Les données montrent qu'il y a un lien entre la situation du dépassement de la consommation sur la production et le niveau du facteur d'émissions des imports. En effet, pour les groupes de la structure 2, 3 et 4, **à supposer qu'il soit possible de produire plus, pour un niveau de consommation donné, il est parfois plus avantageux économiquement pour les fournisseurs de s'approvisionner auprès des producteurs étrangers, lesquels proposent des modes de production moins chers à tout horizon de temps¹¹ que les modes de production français.** En vertu du mécanisme d'imputation des prix du carbone, ces quantités d'énergies importées sont ainsi moins émissives que les imports que réalisent les fournisseurs français dans le cas où le niveau de production français est excédentaire sur la consommation (structure de groupes 1). Dans ce dernier cas, les fournisseurs français importent par contrainte à des prix plus élevés et non par arbitrage économique, ce qui caractérise bien les contenus plus émissifs rencontrés dans cette situation. **En revanche, il peut être constaté pour les groupes des structures 2, 3 et 4 que les niveaux moyens des facteurs d'émissions de la production, de la consommation et des exports revêtent des niveaux moyens relativement plus importants.** Le fait que les facteurs d'émissions de la production soient élevés signifie que les modes de production appelés sont carbonés. Ces modes sont plus chers dans l'ordre de mérite car les prix du carbone sont imputés aux coûts marginaux de fonctionnement des centrales de production. Une telle situation peut être due à une conjonction de facteurs, tels que la moindre production des énergies renouvelables variables avec des prix de marchés moins élevés et poussant ainsi les fournisseurs à compléter leur portefeuille avec de l'électricité

importée. Ils ont donc nécessairement recours à des modes de production qui demeurent carbonés, mais dont les prix sur le marché sont moins chers. Ainsi, on comprend de ces imports qu'ils sont moins cher car relativement moins carbonés qu'ils ne peuvent l'être à d'autres instants de l'année.

La même analyse peut être conduite à l'égard de la structure de groupes 1 caractérisée par des situations de dépassement de la production sur la consommation. **Lorsque la production excède la consommation, cela signifie que la France dispose de l'intégralité de ces modes de production bas-carbone, reflétant des prix sur le marché très faible. Ainsi, elle produit plus qu'elle n'a besoin pour répondre à la demande des pays voisins cherchant leur optimum économique. En ce sens, les facteurs d'émissions de la production, de la consommation et des exports, qui pondèrent fortement la production, sont plus faibles.** En revanche, puisque la France importe par contrainte, elle importe indépendamment de son choix auprès de pays dont les prix reflètent l'état de mobilisation des centrales carbonées. Ceci vient expliquer, comme précédemment, les raisons pour lesquelles ces imports présentent des facteurs d'émissions aussi élevés.

Le groupe 8, quatrième groupe le plus important en termes de dimension (avec 257 combinaisons), est le groupe qui présente en moyenne les facteurs d'émissions les plus élevés. Les facteurs d'émissions de la production sont élevés, tandis que les facteurs d'émissions des exports et des imports statuent respectivement à la première et à la quatrième place du classement. Les valeurs moyennes associées de production et de consommation pointent aux premières places des valeurs les plus faibles de leur catégorie. En revanche, le niveau d'imports et d'exports figurent parmi les niveaux les plus élevés. Ce groupe confirme

11 Le recours au gré-à-gré se fait sur la base d'une anticipation des prix SPOT sur la période considérée.

ainsi la thèse développée jusqu'alors : **si les niveaux de consommation suffisaient à expliquer le niveau du facteur d'émission, alors ce groupe devrait être celui dont les valeurs de facteurs d'émissions sont les plus faibles. Les données ci-dessus démontrent que ce n'est pas le cas et que le premier niveau moyen de consommation le plus faible désigne de surcroît le facteur d'émissions moyen le plus élevé.** Cette situation est due à un dépassement moyen conséquent de la consommation sur la production, associé à un niveau moyen du facteur d'émissions des imports élevé. Il est également intéressant de constater qu'un niveau de production élevé n'implique pas nécessairement un niveau du facteur d'émissions de la consommation excessif. Bien qu'élevé (101 gCO₂/kWh), le niveau moyen du facteur d'émissions du groupe 6 témoigne de cette assertion.



CONCLUSION

L'analyse montre que ce sont davantage les écarts entre les niveaux de consommation et de production qui tendent à expliquer l'évolution du facteur d'émissions de la consommation, davantage que ledit niveau de consommation seul. En aval de cet écart se trouvent les activités d'importations que réalisent les fournisseurs français auprès des producteurs étrangers, lesquelles peuvent être entreprises à long-terme ou à court-terme. Il est cependant impossible de déterminer quel type d'importation est à l'origine de la hausse du facteur d'émissions de la consommation, tant il n'existe pas de données sur la répartition des produits de long-terme et des produits de court-terme. En ce sens, l'analyse produite en partie 4 ne repose que sur une intuition, en l'attente de disposer de ces données.

Toutefois, cette analyse n'est effectuée qu'a posteriori et n'a pas vocation à disposer des mêmes résultats en prospective. Il y a plusieurs raisons à cela. Tout d'abord, comme il a été précisé tout au long de ce document, le système évolue selon des paramètres qui varient à des horizons temporels différents, de façon aléatoire et indépendante les uns par rapport aux autres, ce qui forcent les fournisseurs à devoir importer ou solliciter des modes de production pilotables carbonés à très court termes pour rétablir leur propre équilibre. Ces évolutions aléatoires à très court terme sont structurelles dans l'analyse qui est effectuée ci-dessus. Ils disposent d'une faible inertie, car leur prise d'effet est immédiate. Il y a donc de fortes chances pour qu'à long terme, dans la perspective de l'évolution du mix de production nationale, ces éléments structurels soient amenés à évoluer, modifiant ainsi autour d'eux la dynamique des « lois d'évolutions du facteur d'émissions de la consommation ». **Il faut être ainsi très prudent quant à la mise en prospective des résultats issus de ce travail.** A titre d'exemple, le raccordement au réseau des énergies renouvelables variables va par exemple faire de l'écart entre les niveaux de production et de la consommation un enjeu majeur, qui va augmenter

les flexibilités et la capacité de stockage dont dispose le pays. Ainsi, bien qu'à l'amont la dépendance aux modèles météorologiques à court-terme soit renforcée, il y aura à l'aval de nouvelles flexibilités qui permettront de réduire l'importance de la dépendance à cet aspect à très court terme. A cet instant, il est ainsi impossible de prévoir dans quelles mesures est-ce que ces flexibilités vont bouleverser les résultats de l'analyse. Il est possible qu'elles permettent de réduire la dépendance actuelle de la France aux importations, tout en renforçant le recours aux centrales pilotables et aux capacités de stockage.

Tout le propos peut également être nuancé vis-à-vis de ces conclusions, tant il s'agit du facteur d'émissions de la consommation et non des émissions totales. Il y a deux raisons à cela. Dans un premier temps, dans la perspective d'un mix à forte part d'énergie renouvelable variable, les émissions directes engendrées seront, en valeur absolue, moins conséquentes à l'échelle européenne que ce qu'elles peuvent l'être actuellement. L'objectif de neutralité carbone ne repose alors que sur les émissions, puisque le facteur d'émissions n'est que la résultante de la pondération de celles-ci par les quantités d'électricité produites. Dans un second temps, puisque les émissions résultent d'un produit entre le facteur d'émissions et le niveau de consommation, alors il se peut qu'un facteur d'émissions soit plus élevé qu'un autre, sans que le niveau d'émissions total induit soit plus important (par produit avec le niveau de consommation).

Ce travail contient tout de même certaines limites. Tout d'abord, il considère que la production à partir de la biomasse repose sur un facteur d'émissions nul, ce qui peut être discuté selon l'hypothèse admise de la gestion durable des ressources. Lors du calcul du facteur d'émissions de la consommation, la méthode considère que le facteur d'émissions des imports est calculé à partir de la simple production de chacun des pays

auprès desquels la France importe. Elle ne tient pas compte des imports des pays dans l'empreinte de leurs exports (donc des imports français). Bien que la revue de la littérature effectuée souligne que cela n'entache pas l'empreinte carbone dans de grandes proportions, la méthode pourrait être améliorée à l'aide de méthode itérative portant sur l'intégration des imports. Enfin, la clé de répartition choisie pour arbitrer les quantités de production et d'imports allouées à la consommation (le pass-through) est considérée invariante dans le temps. Cette approche, bien que conservatrice, ne reflète nécessairement pas la réalité des flux économiques et physiques que ce travail s'est essayé à approcher.



Le présent document synthétise le travail réalisé par Nicolas Foissaud entre septembre 2021 et février 2022, lors de son stage de fin d'étude réalisé à l'UFE dans le cadre du Master Transport et Développement Durable commun à l'Ecole des Ponts ParisTech, aux Mines PSL et à l'Ecole Polytechnique.

