Cyril BEQUART
François DUCLOZ
Cyril MOUNIER
Sébastien TIMSIT

Module C06 – Energies Renouvelables

Effacement diffus de consommation d'électricité et impact sur les émissions de CO_2.

1. Sommaire

1. Sommaire 2

2. Introduction : 3

3. L'effacement diffus 4

a. Principe de l'effacement 4

b. Comment fonctionne l'effacement ? 5

c. Comment Voltalis finance-t-elle l'installation du boîtier ? 5

d. Quelles sont les opportunités de l'effacement diffus ? 7

e. Mais d'où vient donc cette économie d'énergie ? 8

4. Emissions de CO2 par mode de production d'électricité : 10

a. Mode de production à fort taux d'émission de gaz à effet de serre : 10

b. Modes de production à faible émission de CO_2 : 13

i. Le nucléaire 13

ii. L'hydraulique : 15

iii. Hydraulique de pompage turbinage : 16

iv. Solaire photovoltaïque : 16

v. Eolien : 18

5. Emissions de CO2 du système électrique français 19

a. Méthode de calcul 19

b. Résultats 20

c. Structure de la production 24

6. Modélisation de l'effacement et impact sur les émissions de CO_2 : 28

a. Explication de l'algorithme : 28

b. Résultats 29

c. Améliorations nécessaires 31

7. Conclusion 32

8. Remerciements 33

9. Bibliographie 33

10. Annexes 34

2. Introduction :

Plusieurs stratégies existent pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) dues à la consommation d'énergie et d'électricité. Pour atteindre les objectifs fixés par les différents organismes internationaux en matière de diminution de GES, plusieurs stratégies sont possibles. Certains pensent que cette réduction passe par un développement accéléré des différentes énergies. D'autres pensent que le meilleur moyen de réduire ces émissions serait de ne pas produire l'énergie, en diminuant la consommation ou en effaçant de manière diffuse certaines consommations non essentielles. Certaines start-up, comme Voltalis et récemment une filiale de EDF, se sont développées dans cet exercice.

Ces entreprises se basent sur des constats simples : la consommation d'électricité provient à 35% environ du chauffage et de l'occupation du résidentiel et des bâtiments tertiaires. Et, il apparaît que la gestion de la consommation d'électricité dans ces domaines est très loin de la perfection. De plus, le développement toujours plus rapide du parc de logement « tout-électrique » accentue ce gaspillage d'électricité, au moment même où des problèmes de production apparaissent. Ce phénomène de surconsommation d'électricité entraine des émissions de GES qui pourraient être évitées. Ces émissions excessives de GES sont amplifiées lors des pointes de consommation d'électricité en hiver.

Ainsi, notre travail s'est attaché à étudier ces possibilités d'effacement de consommation d'électricité et leur impact sur l'environnement via les émissions de GES. En s'appuyant sur les caractéristiques des effacements de consommation proposés par Voltalis, nous avons étudié comment et pourquoi une partie non négligeable de la consommation du résidentiel tout électrique pouvait être effacée. Une entrevue avec M. Bivas, Directeur Général de Voltalis, nous a permis de mieux appréhender ces possibilités d'effacement et les données relatives à ces modulations de consommation du parc d'habitat tout électrique. Ensuite, nous nous sommes penchés sur les caractéristiques de la production et de la consommation d'électricité en France. Quels sont les moyens de production majoritaire en France ? Et, quels sont les impacts environnementaux de chacun de ces moyens de production (essentiellement en production de CO_2) ? Quelle est la spécificité de la structure de la production de l'électricité française et quel est l'impact de cette production sur l'environnement ? Enfin, à la vue de cette consommation, nous proposons une simulation d'effacement de la consommation d'électricité, via Matlab. Quelles sont les économies induites par une diminution de la consommation d'électricité ? Enfin, comment peut se traduire au niveau environnemental cet effacement de la consommation : quelle quantité d'émission de CO_2 peut être évitée via cet effacement ?

3. L'effacement diffus

La consommation électrique en France est de 470 TWh. La production électrique nette s'élève à 549,1 TWh et se répartit en 418,3 TWh nucléaires (76,2%), 68,1 TWh hydrauliques (12,4%), 56,9 TWh thermiques classiques (10,4%) et 5,7 TWh éoliens et photovoltaïques (1,0%). La différence vient de l'exportation. Le secteur résidentiel et tertiaire représente 65% de la consommation d'électricité. Le résidentiel représente les 2/3 de la consommation de ce secteur, soit plus de 200 TWh par an. Le principal poste de consommation dans le résidentiel est le chauffage.

a. Principe de l'effacement

Si l'on coupe le chauffage dans une pièce de la maison pendant 30 minutes, la température varie de 0,5 à 1 degré. L'utilisateur ne ressent même pas la différence, et il n'y a pas de perte de confort. Il est possible de réaliser la même opération sur le chauffe-eau. Bien sûr, il ne faut pas que les périodes de coupures soient trop répétées ou trop longues afin que le confort de l'utilisateur ne diminue pas. Pendant ces coupures, l'utilisateur consomme moins d'énergie. L'économie réalisée est faible, mais cumuler sur une population importante, l'effet peut devenir non négligeable. L'action de coupure peut être manuelle. Il est cependant très dur de se contraindre de le faire tous les jours. De plus, n'étant pas optimisé, la période de l'effacement ne vient pas forcément au moment où le gain est maximum pour la société en général.

C'est ici qu'interviennent les sociétés pratiquant l'effacement diffus. Si c'est une entreprise qui gère cette régulation pour vous, il n'y a plus de désavantages. De plus, l'effacement de consommation peut avoir lieu au moment où il est le plus intéressant d'un point de vue économique.

Il y près de 29 millions de foyers en France. Suite à la politique du gouvernement dans les années 70, 30% des foyers sont équipés en tout électrique, soit 8,7 millions de foyers. Ceci implique qu'en hiver, la demande en électricité est fortement dépendante de la température. Cet état des choses est une des causes de la pointe de consommation en hiver. Cette pointe a atteint ces dernières années des records de puissance à 93 GW. Le coût d'achat du kWh par l'utilisateur est pour la plupart réglé par contrat. En France, les tarifs EDF sont régulés et plutôt bas, à 50€/kWh. Cependant plus la demande est forte, plus l'électricité coûte plus cher à produire. Pendant la pointe de consommation, il faut démarrer des centrales beaucoup plus coûteuses. C'est à ce moment là qu'il est le plus intéressant d'effacer une partie de la consommation.

Le chauffage électrique a un avantage majeur : son coût d'installation varie entre 100 et 200 euros par convecteur pour les plus basiques. Cependant, le chauffage électrique a un

rendement particulièrement faible. En effet, globalement, le principe consiste à produire de la chaleur dans une centrale électrique, à partir de combustible fossile ou d'uranium, convertir cette chaleur en électricité avec un rendement de l'ordre de 30-35%, acheminer l'électricité jusqu'au radiateur avec de nouvelles pertes, puis transformer l'électricité en chaleur dans une résistance. La plupart des radiateurs électriques chauffent de l'air, qui est considéré comme un des meilleurs isolants thermiques possible. Le rendement total du chauffage électrique est catastrophique. Les études montrent qu'il n'est vraiment intéressant que dans le cas d'une résidence secondaire. C'est donc l'effacement du chauffage électrique qui est le plus intéressant, car il évite de dégrader une énergie noble : l'électricité.

b. Comment fonctionne l'effacement ?

Afin de pouvoir couper à distance le chauffage chez le particulier il faut installer un boîtier relié aux fusibles de contrôle du chauffage. Le boîtier permet de mesurer la consommation instantanée d'électricité pour chaque poste de chauffage, ainsi que de les couper sélectivement. Ce boîtier correspond avec un central via une connexion GPRS. L'ordinateur de gestion reçoit la consommation des différentes pièces de la maison et contrôle la coupure à distance du chauffage.

C'est l'entreprise qui optimise les périodes de coupures via son serveur et des algorithmes internes, tenant compte de la demande globale, du confort de l'utilisateur et du prix de l'électricité.

C'est le métier de **Voltalis**, start-up leader de l'effacement diffus en France.

Voltalis installe gratuitement chez les particuliers équipés du tout électrique un boîtier de leur conception, le Bluepod. Ce boîtier permet de couper le chauffage et le chauffe-eau. L'installation est très avantageuse pour le client, qui peut réaliser de 5 à 15% d'économie par an sur sa facture d'électricité.

c. Comment Voltalis finance-t-elle l'installation du boîtier ?

La construction et l'installation d'un Bluepod coûte environ 500€. Pourtant, l'installation chez l'utilisateur est gratuite. Quel est le business modèle de cette entreprise ? Afin de comprendre comment se rémunère Voltalis, ou toute autre entreprise qui se lancerait sur ce marché, il faut savoir comment fonctionne le réseau électrique.

Il n'existe pas aujourd'hui de moyen de stocker l'électricité. Les batteries ne représentent qu'une capacité infime. Le stockage d'énergie par pompage est limité et passe par la transformation de l'électricité en énergie mécanique puis en énergie potentielle de pesanteur. Ce processus est lent. Afin que les flux d'électricité soient équilibrés, il faut que la production et la consommation soient strictement égales. Chaque petite variation de la consommation doit être compensée par une variation identique de la production. De même, si une centrale s'arrête à cause d'un incident, il faut compenser la perte de puissance. Les écarts entre production et consommation apparaissent sur la fréquence du réseau – 50 Hz

en Europe. Si la charge – la consommation – diminue, il y a moins de résistance en sortie des alternateurs en centrale, et leur vitesse de rotation augmente légèrement, la fréquence du réseau de même, lui étant proportionnelle. L'effet inverse a lieu quand la charge augmente. Bien sûr ces variations sont infimes et ne sont pas discernables par l'utilisateur. La perte de centrale, par exemple une tranche de réacteur nucléaire, n'entrainerait qu'une variation de l'ordre de 1Hz.

Le système de régulation a trois échelles de réglage : primaire, secondaire et tertiaire. Le réglage primaire est local et automatique. Afin de compenser les variations de consommation sur le réseau, il existe avec chaque alternateur, un régulateur de fréquence – puissance. Aussi appelé régulateur de vitesse, il contrôle les vannes d'admission de vapeur dans la turbine entraînant l'alternateur. Si la fréquence baisse, il ouvre les vannes, afin de fournir plus de puissance. Dans le cas contraire, il ferme les vannes. Bien sûr, chaque couple centrale-alternateur à une plage de fonctionnement limité en puissance. Si on ferme trop les vannes d'admissions de vapeur dans la turbine, il va falloir baisser la puissance thermique produite par la centrale. C'est au producteur de calibrer le système afin que l'efficacité et la sûreté soient optimales et de décider quelle part de la puissance est réservée à cette régulation. Ce système réagit aux variations de fréquence. Après une forte variation, par exemple lors de la perte d'un moyen de production, l'équilibre peut être rétabli à une fréquence différente de 50 Hz. C'est là qu'intervient le réglage secondaire centralisé. Il a pour fonction de ramener la fréquence à 50Hz. Ce réglage automatisé lui aussi, fait appel à des réserves supplémentaires misent à disposition par le producteur. Elles sont appelés réserves secondaires. Cette puissance peut être utilisée ou retirée pour réajuster l'équilibre offre – demande à la fréquence nominale de 50Hz. Ces services appelés services systèmes et élaborés à partir des contributions de tous les producteurs sont rémunérés par le gestionnaire de réseau. Le réglage tertiaire, manuel gère la reconstitution des réserves de réglage et veille à une exploitation optimale et en sécurité du système. C'est le mécanisme d'ajustement dont nous parlerons plus tard.

Afin de coller au mieux à la demande, chaque jour les producteurs font des prévisions pour le lendemain et planifient leur production en fonction de celle-ci. Les prévisions prennent en compte entre autres : les prévisions météo, l'historique des jours précédents, ainsi que des jours comparables des semaines et années précédentes. Sur la base de ces prévisions, ils attribuent les puissances de réserve primaire et secondaire, ainsi que le planning de production de chaque centrale. Cependant, la consommation varie énormément selon l'heure de la journée, et les prévisions peuvent se révéler fausses. Comme on le voit sur le graphique ci-contre, les

Consommation électrique française du 5 février 2010 comparée aux prévisions des jours précédents

prévisions et la réalité de la consommation ne sont pas toujours égales. Ici, les variations de consommation sont très grandes, entre 60,6 GW au minimum et 77 GW au maximum. On a vu plus haut que la pointe consommation avait déjà atteint 93 GW.

Les mécanismes de régulation en temps réel décrit ci-dessus ne suffisent pas à compenser les différences entre les prévisions et la réalité. C'est là qu'intervient à nouveau le gestionnaire du réseau, en France RTE. En cas de surplus de production, le producteur produisant plus que ce que ses clients ne consomment réduit sa production à la demande de RTE. En cas de déficit de production, RTE fait un appel d'offre pour une puissance à fournir, pendant un temps donné. Le producteur en défaut de production paye une amende à RTE, qui l'utilise pour acheter les mégawatts manquants à un autre producteur. C'est là que notre entreprise d'effacement entre en jeu.

En effet, une directive européenne a annoncé que l'effacement devait être rémunéré. Notre entreprise peut proposer au gestionnaire de réseau de lui vendre une puissance effacée. Ce dernier peut donc choisir entre acheter de l'effacement ou acheter de la production à un producteur qui augmenterait la puissance d'une centrale ou en démarrerait une nouvelle. L'argent gagné permet de financer l'installation des boîtiers.

d. Quelles sont les opportunités de l'effacement diffus ?

Il existe aujourd'hui une controverse sur la propriété de l'électricité effacée. L'installation des boîtiers est peu chère. Considérons qu'elle coûte 500€ par boîtier et que chaque boîtier permet d'effacer 1 kW, ce qui est la valeur avancée par Voltalis. Le coût d'installation de 'puissance' est de l'ordre de 0,5€/W. C'est moins qu'une centrale au gaz, la moins chère, qui coûte 0,6€/W installé. De plus, les frais de fonctionnement sont bien plus faibles pour le boîtier d'effacement. Il y a peu de maintenance et pas de combustible ; seul le système de gestion et de contrôle induit des frais. Le coût du kilowattheure est bien plus faible que celui de n'importe quelle centrale. Sur le marché de l'effacement le kW

La controverse vient du fait que notre entreprise revend de l'électricité produite par un certain producteur à un second producteur en déficit de production via le marché d'ajustement du gestionnaire de réseau. L'électricité produite par le premier producteur n'est pas consommée par ses clients, et il n'est donc pas rémunéré. Ce n'est pas le cas du second producteur, qui doit cependant, rappelons-le, payer une amende au gestionnaire de réseau. EDF, principal producteur français, a fait un procès à Voltalis, demandant que cette dernière paye une taxe sur l'électricité effacée pour compenser ce manque à gagner. La décision de la CRE (commission de régulation de l'énergie) a été dans le sens d'EDF. Voltalis a fait appel. En effet, l'effacement est une démarche personnelle du propriétaire et le boîtier se place au niveau des fusibles. EDF n'a pas accès à ce qui se passe après le compteur électrique. D'un certain point de vue, cette taxe reviendrait à demander à un fabriquant de double vitrage de payer EDF car l'installation chez le particulier a fait diminuer la consommation d'électricité en chauffage. La situation n'est pas encore résolue.

Passé ce point encore non résolu, de nombreuses opportunités s'ouvrent pour l'effacement. Nous venons de voir la revente sur le marché de l'ajustement en temps réel. C'est le premier moyen de vendre ce service et le plus facile. D'autres débouchés sont envisageables, bien que tout reste à créer. On peut développer des contrats de vente d'une puissance d'effacement à un producteur pour une durée particulière. Ainsi par exemple, Voltalis pourrait effacer 100 MW de consommation pendant 2 heures de 18h à 20h chez les clients de Direct Energie. Le nombre de jours ou leur fréquence serait choisi par contrat. De son côté Direct Energie n'aurait pas à acheter – ou produire – cette électricité à un coût plus important, voire supérieur au seuil de rentabilité. On retrouve un peu ici le système des forward.

L'installation des capacités de production pour la pointe est particulièrement coûteuse. En effet, afin de couvrir les 93 GW de consommation en pointe, les producteurs – en France EDF en particulier, doivent investir dans des centrales qui ne fonctionneront que quelques dizaines d'heures par an. Le coût du kilowattheure de ces centrales est énorme car l'investissement est amorti sur peu de kilowattheure. L'effacement permettrait de supprimer la pointe et donc le besoin en investissement coûteux et peu rentables de ce type. De plus, les centrales utilisées pour la pointe sont soit de l'hydraulique, soit des centrales thermiques fortement émettrices de CO_2. Supprimer la pointe permettrait d'effectuer des économies de CO_2, en n'utilisant pas les centrales thermiques et en utilisant la production hydraulique non consommée pour remplacer des centrales thermiques type centrales à charbon à d'autres moments de la journée. Le potentiel de réduction d'émissions sera discuté plus tard. L'effacement permettrait aussi via d'autres contrats de réduire la quantité d'investissements nécessaires dus à la croissance de la consommation, de 3% par an.

La dernière opportunité très intéressante est pour l'utilisateur. En effet, l'installation d'un boîtier d'effacement permettrait de réaliser 5 à 10% d'économie sur sa facture d'électricité. Pourtant si l'on coupe le chauffage, à première vue, on ne fait que reporter la consommation à plus tard.

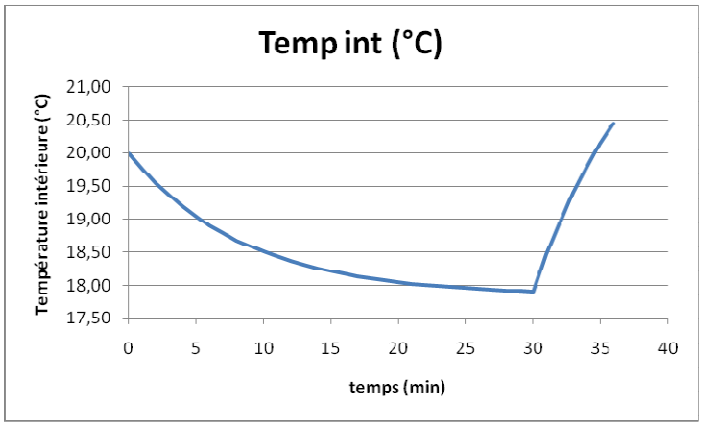
e. Mais d'où vient donc cette économie d'énergie ?

Lorsque l'on coupe le chauffage dans une pièce, la température diminue, du fait des pertes thermiques avec l'extérieur. Ces pertes sont proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Avec la baisse de température intérieure, cette différence de température diminue, ainsi que les pertes thermiques. Les pertes sont donc moins importantes que si l'on continuait à chauffer la pièce durant toute la période d'effacement. Les chiffres avancés par Voltalis suggèrent des économies d'énergie de l'ordre de 50 à 70%.

Nous avons tenté de créer un modèle afin d'estimer les économies effectivement réalisées. Nous nous intéressons à une pièce de 20 m^2 et 2,5 m de hauteur sous plafond. Trois des murs sont en plâtre, intérieurs au bâtiment et mitoyens avec des pièces thermostatées à 20°C. Le quatrième mur est en béton, percé d'une fenêtre de 2 m^2 en

double vitrage et donne sur l'extérieur. Il est isolé à l'intérieur avec 10 cm de polystyrène. Le sol et le plafond sont des dalles isolées par le dessous. La pièce est chauffée par un radiateur électrique d'1 kW, chauffant par convection. La température de consigne est 20°C. Après 30 minutes d'effacement, le chauffage est rallumé afin de retourner à 20°C.

Le premier modèle considère uniquement les flux thermiques à travers les parois. Au bout de 30 minutes, la température a baissé de 2°C. Cependant, nous ne prenons en compte ni les ponts thermiques, ni les pertes par rayonnement, ni les pertes par renouvellement de l'air. De plus, notre modélisation des parois est assez simpliste. Le défaut majeur vient de ne pas avoir pris en compte l'inertie. Ceci explique la forte chute de température. Le réchauffage est très rapide lui aussi. En effet, comme certaines pertes ont été négligées, le chauffage est surdimensionné par rapport aux pertes. Nous avons cependant gardé un chauffage d'un kilowatt standard. Le graphique ci-contre montre l'évolution de la température de la pièce. Dans ce cas, l'économie d'énergie réalisée est de 60%.



Le second modèle prend en compte l'inertie des murs intérieurs et du sol. Le mur extérieur et le plafond, séparés de la pièce par une couche d'isolant, ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'inertie, leur effet étant considéré comme négligeable. Le modèle d'inertie utilisé est simpliste. La température à l'intérieur des murs et dalles est supposée constante. De plus, la modélisation de la température du sol ne prend pas en compte le flux de chaleur à travers l'isolant. Il faudrait aussi prendre en compte l'inertie du mobilier et des objets. L'ajout des effets d'inertie à une influence importante sur le modèle et il n'est plus possible de négliger les pertes par VMC et pont thermique. Nous ne disposions pas du temps disponible pour créer un modèle intégrant tous ces paramètres. Cependant nos calculs imparfaits montrent que les économies d'énergies réalisées concordent avec les valeurs annoncées.

4. Emissions de CO2 par mode de production d'électricité :

En France, dix types de production d'électricité majeurs sont recensés : le nucléaire, l'hydraulique (fil de l'eau et pompage/turbinage), le charbon, le gaz (cycle de Ranking), le gaz (cycle combiné), le fioul lourd, l'éolien, le solaire photovoltaïque, le thermique déchet. Pour calculer ces émissions, deux stratégies ont été adoptées : pour les modes de production à fort émission de CO_2 (charbon, gaz, fioul lourd et déchet), les émissions de CO_2 se concentrent sur le combustible (acheminement et combustion). La part des émissions due à la construction de la centrale devient négligeable. Pour calculer les émissions, on se limitera à calculer la quantité de CO_2 nécessaire à l'acheminement du combustible, et celle émise durant la combustion. Pour les modes de production peu émetteurs de CO_2 (hydraulique, éolien, photovoltaïque, nucléaire), les émissions proviennent uniquement de la construction de la centrale de production d'électricité, exception faite du nucléaire, où une part importante des émissions provient de la production et de l'acheminement du combustible nucléaire. Ainsi, une analyse de cycle de vie des centrales de production à faible émission de gaz à effet de serre sera proposée, afin d'estimer la quantité de CO_2 émise pour produire un kWh électrique.

a. Mode de production à fort taux d'émission de gaz à effet de serre :

La production d'électricité à partir de combustible fossile (charbon, fioul lourd, gaz, déchets) repose sur la transformation d'une énergie thermique (chaleur) en une énergie électrique via une turbine. Cette conversion suit, pour les centrales basiques, le cycle de Carnot, qui possède <u>un rendement maximal bien connu de 33%</u> (lorsque le fluide considéré est de l'eau et qu'il se transforme en vapeur sous pression qui entraine une turbine puis un alternateur). Ce rendement est la principale limite de ce mode de production ; cependant, quelques techniques ont été développées pour dépasser ce rendement extrêmement limitant.

- **Le cycle supercritique** : le principe est le même que la centrale thermique de base, sauf que le fluide est de l'eau dans son état supercritique (229 atmosphère de pression). Ce fluide est capable d'augmenter le rendement de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique. Et, cette technique est utilisée avec la plupart des combustibles fossiles traditionnels. <u>Le rendement obtenu est alors proche de 45%.</u> Mais, étant donné les difficultés de mise en œuvre (haute pression et très haute température), cette technique reste marginale, surtout pour la France où le charbon reste un combustible assez marginal dans la production d'électricité (15% en moyenne).

- **Le cycle combiné :** ce cycle est une combinaison d'une turbine à gaz (turbine à rotation, où l'air est directement chauffé dans la turbine) et d'une turbine à vapeur traditionnelle. Le gaz très chaud issu de la première turbine passe par une autre turbine classique, utilisée dans les centrales thermiques. Ces deux turbines sont possèdent deux arbres de transmissions entrainent une ou deux génératrices de courant. Le rendement obtenu est alors de 60%, ce qui est une très forte progression par rapport au rendement de base. C'est pourquoi la totalité des centrales à gaz nouvellement installées utilisent cette technique.
- **La cogénération :** cette technique n'augmente pas à proprement dit le rendement thermique : la chaleur qui n'a pou être convertie en électricité est envoyé vers une unité consommatrice de chaleur (tertiaire, industrie, serres …), au lieu d'être rejeté à l'atmosphère. Ceci permet de répartir l'émission de CO_2 sur les deux destinataires en énergie, et non pas de concentrer ces émissions sur la seule centrale électrique. On peut alors estimer que 1/3 de l'énergie est récupérée sous forme thermique, ce qui diminue d'autant les émissions de CO_2 destinées à l'électricité.

Pour calculer le taux d'émission en CO_2 de la combustion donnant un $kWh_{électrique}$, on procède ainsi :

La quantité d'énergie primaire nécessaire pour produire un $kWh_é$ est égale à

1/rendement

La masse de combustible nécessaire pour produire cette énergie primaire est donc de :

1/rendement/PCI

Où PCI est le pouvoir calorifique inférieur exprimé en kWh/kg.

On obtient ainsi la masse de C contenu dans cette masse brûlée par la formule suivante, où C est la valeur moyenne de carbone contenu dans le combustible[1]:

1/rendement/PCI x %massique de C.

On trouve ainsi la masse de CO_2 émise pour la production de 1 kWh par la formule :

$$\textbf{Masse } CO_2 = 1/\text{rendement}/PCI \times \%\text{massique de C.} \times (1 + 1/M_c \times 2 \times M_o) \qquad (1)$$

Les PCI varient selon les combustibles, ces valeurs se trouvent dans les tables : on récapitule ces PCI suivant les combustibles et les différents types existant de ces combustibles. Ces valeurs sont exprimées en quantité d'énergie par kilogramme (kWh/kg). Cette énergie

[1] Cette formule admet l'approximation que la totalité du combustible est brûlé, ce qui en réalité n'est pas vrai, environ 5% du combustible n'est pas brulé et s'envole sous forme de composés volatiles organiques, ou se retrouve dans les cendres issues de combustion

correspond à celle pouvant être au maximum extraite du combustible, en prenant en compte la valeur de chaleur latente du produit.

Combustible	PCI (kWh/kg)
Fioul lourd	11,1
Charbon Anthracite	9,3
Charbon Bitumineux	9,5
Charbon Houille	9,8
Gaz naturel	11,5
Déchets/biomasse	7,5

Pour le charbon, les trois types de combustibles existant ayant des écarts faibles de PCI, et étant utilisé dans le monde à part égal, sont considérés dans la suite de notre travail comme un seul combustible de PCI 9,5 kWh/kg.

Les pourcentages massiques de Carbone dans les combustibles sont aussi issus de la littérature et sont les suivants pour les combustibles nous intéressant :

Combustible	% massique de C
Fioul lourd	86,4
Charbon	85 à 95 %
Gaz naturel	90 %
Déchets/biomasse	50 %

Ainsi, d'après la formule (1), on trouve des valeurs d'émission de CO_2 par combustible, et par rendements, détaillés en première partie :

Combustible et type de cycle	Rendement	Emission de CO_2 (gr/kWh)
Charbon	35%	1070
	45%	860
Fioul lourd	35%	804
	45%	625
Gaz	35%	820
	45%	630
	60%	428
Déchet/biomasse	30%	860

En général, la valeur retenue pour les émissions est celle du cycle traditionnel (Cycle de Carnot, à rendement de 35%), car les autres techniques à rendement élevé restent en France largement minoritaires. Pour le gaz, une distinction est faite dans la suite du travail entre le cycle normal (35% de rendement), et le cycle combiné (60% de rendement).

Dans cette partie, on néglige les émissions provenant du cycle de vie complet de la centrale et du combustible : vérifions ces hypothèses par rapport aux émissions dues à la combustion.

Transport : les calculs montrent que 1 kWh électrique nécessite 200 grammes de fioul et de gaz, 300 grammes de charbon. En moyenne, le combustible parcourt 10000 km pour arriver en France, la France important la majorité de ses combustibles fossiles de pays lointains (Australie pour le charbon, Moyen Orient pour le pétrole …). Or, le coût CO_2 du transport moyen sur longue distance sur des moyens de transports maritimes lents (bateaux, vraquiers …) est de 20 grammes de $C0_2$[2] par tonne et par kilomètre parcouru : un rapide calcul nous montre que ces émissions s'élèvent à une dizaine de grammes supplémentaires par kWh, ce qui est à comparer des émissions issues de la combustion négligeable.

Construction : nous montrerons dans la prochaine partie que la construction d'une centrale « coûte » de l'ordre de 100 000 T de CO_2. Une centrale thermique produit au cours de sa vie 100 TWh (Puissance de 350 MW, fonctionnant pendant 3000 heures par an, pendant 50 ans). Ce qui fait un amortissement carbone de 1 gramme de CO_2 par kWh, ce qui est là aussi négligeable.

b. Modes de production à faible émission de CO_2 :

Parmi ces modes de production, on recense le nucléaire, l'éolien, le solaire photovoltaïque, l'hydraulique cours de l'eau et lac, et l'hydraulique pompage-turbinage. Pour tous ces modes de production, une analyse de cycle de vie complète de la construction et de l'entretien éventuel est proposé, afin d'estimer au mieux la production moyenne de gaz à effet de serre (essentiellement CO_2) par kWh d'électricité produite. Pour l'ensemble des calculs, les valeurs restent des moyennes, et les propositions faites n'ont pas de prétention de refléter parfaitement la réalité, mais de donner un ordre de grandeur aussi juste que possible de ces émissions.

i. Le nucléaire :

Pour cette énergie, les émissions de gaz à effet de serre proviennent de plusieurs postes essentiels : d'une part, l'extraction et le transport du combustible entraine des émissions de CO_2. Ensuite, la fabrication et le conditionnement du combustible passe par une concentration gourmande en énergie de l'uranium. En outre, il y a l'ensemble du cycle de recyclage de ce combustible usagé. Enfin, un « amortissement » des émissions de CO_2 dus à

[2] Source : www.ademe.fr

la construction de la centrale constitue le dernier poste essentiel d'émissions de CO_2. L'émission de chaque poste est estimée dans la suite de notre travail. Pour cette partie, quelques données globales ont été choisies : le rendement des turbines des centrales nucléaires est pris égal à 30%, ce qui est un chiffre commun dans les centrales de type REP. Nous considérons que cette infrastructure de type REP possède une puissance par tranche de 900 $MW_é$, qu'elle produit pendant une durée de 40 ans (durée actuelle prévue pour les centrales nucléaires EDF), et que annuellement, la production est à pleine puissance pendant 8000 heures.

Acheminement du combustible : le combustible nucléaire est constitué d'oxyde d'uranium. Deux isotopes principaux de l'uranium constituent cet oxyde : l'^{238}U et l'^{235}U. Or, seul le second est fissile et peut servir à la réaction de fission dans les centrales nucléaires. Nous allons calculer la masse d'oxyde d'Uranium «naturel », nécessaire à la production d'un kWh d'électricité. Des données connues[3] donnent qu'un gramme de combustible final (après concentration) produit 24 MWh d'énergie primaire. Pour produire notre $kWh_é$, il faut 3 kWh d'énergie primaire, donc 125µg de combustible final. Pour avoir cette masse de combustible, il faut trois fois plus de combustible naturel, car les réactions de concentration multiplient par trois en moyenne la concentration d'^{238}U. Il faut donc extraire et transporter 375 µg de combustible naturel pour produire ce kWh. Or, les principaux producteurs d'Uranium naturel sont l'Afrique du Sud et le Canada. En général, l'uranium naturel parcourt 10000 km avant d'arriver dans les usines d'enrichissement. Or, d'après l'ADEME, le transport de minerai par bateau coûte 100 gr CO_2/km/tonne transportée. Ainsi, nous pouvons estimer que le transport de cette masse de combustible émet donc 0,75 gramme de CO_2/kWh. L'extraction double en général les efforts mécaniques nécessaires au transport. Ainsi, dans cette étape, les émissions sont estimées à 1,5 gr/kWh.

Enrichissement du combustible : en France, l'enrichissement du combustible s'effectue à la centrale Georges Besse du Tricastin. Nous nous baserons sur cette centrale pour estimer la quantité d'énergie nécessaire à la production du combustible pour produire $1kWh_é$. L'énergie nécessaire à l'enrichissement s'exprime en UTS (unité de travail de séparation). La centrale du Tricastin produit 10,8 MUTS, en utilisant 1/3 de la production électrique de la centrale du Tricastin, qui est de 45 TWh annuel. Or, une centrale typique REP nécessite 120 kUTS/an pour produire 10,4 TWh/an. Ainsi, pour produire 1 kWh, 11,5 µUTS, donc 0,016 kWh électrique. Cette électricité nécessaire provient en totalité du nucléaire : ainsi, il faut rajouter 1,5% aux émissions initiales de CO_2 de l'électricité nucléaire.

Construction de la centrale : cette partie est constituée d'une très large estimation de la quantité de matière (ciment, acier) nécessaire à la construction de la centrale. Nous allons ensuite montrer que cette quantité est négligeable par rapport aux autres postes d'émissions. On estime la production pendant 40 ans d'exploitation de la centrale considérée à 415 TWh. Sa construction nécessite environ 1 000 000 tonnes de béton, et

[3] www.areva.fr

50 000 tonnes d'acier et autres métaux (ordre de grandeur très larges). D'après les tables d'émissions de CO_2 par matériaux de construction, le béton émet 400 gr de $C0_2$ par kilogramme, et l'acier environ 500 grammes. Une estimation de la quantité de carbone issue de la construction est donc de 4.10^{11} gr de CO_2. Amortie sur les 415 TWh de production totale, la quantité par kWh de CO_2 est donc de 0,85 de CO_2/kWh.

En ajoutant les émissions dues à l'enrichissement du combustible (+1,5%), l'électricité provenant du nucléaire émet **2,4 gr de CO_2/kWh.**

En conclusion, l'énergie nucléaire est une source d'électricité à très faible émission de CO_2 en comparaison avec l'ensemble des autres modes de production thermique. Par $kWh_é$ produit, quelques grammes de CO_2 sont émis dans l'atmosphère, notre étude nous donne un chiffre indicatif de 2,4 gramme CO_2/kWh.

ii. L'hydraulique :

Cette source d'énergie est considérée par le large public comme la plus propre. Il est vrai qu'elle n'utilise aucun combustible, et que les émissions de CO_2 se limitent à la construction. Des discussions apparaissent pour savoir le bilan carbone « réel » de telles infrastructures. Certains affirment que recouvrir des vallées emboisées par de grands lacs entraine une forte diminution de la fixation du carbone par les arbres, et cause une forte émission de méthane, issue de la décomposition de ces éléments végétaux. Mais, notre étude d'émission de CO_2 se limite aux émissions directes de gaz à effets de serre, et ne prend pas en compte les impacts indirects (environnementaux …) des modes de production. Ainsi, pour estimer la quantité de CO_2 émise par kWh d'hydraulique, nous prenons l'exemple du barrage de Grand Maison, et nous allons estimer la quantité de CO_2 émise durant sa construction. Ce type de barrage ne reflète qu'un type de barrage (barrage lac, du type poids). Or, le type de barrage varie selon les emplacements et selon les débits. Néanmoins, nous considérons qu'une telle estimation donne une idée de l'ordre de grandeur de ces émissions pour l'hydraulique.

Le barrage de Grand Maison a une puissance de 1800 MW. Les données d'exploitation montrent que ce barrage fonctionne 2000 heures durant une année à pluviométrie moyenne. Cela produit 3,6 TWh d'électricité par an. Nous prenons une durée d'exploitation de 50 ans (même si le retour sur les barrages existant nous montre que cette durée d'exploitation peut être prolongée), ce qui nous donne approximativement 150 TWh électrique de produit pendant l'ensemble de l'exploitation.

Or, ce barrage poids a nécessité le déplacement de 23 Mm^3 de remblais, ce qui fait quelques 1 000 000 camions devant déplacer ces remblais sur une dizaine de kilomètres (remblais extraits sur les montagnes à proximité du site). Or, les chiffres de l'ADEME utilisés

dans la partie nucléaire donnent 600 grammes de $C0_2$ par convoi de 40 Tonnes chargé par kilomètre. Le déplacement des remblais donne donc des émissions de 6.10^6 kg de CO_2. De plus, l'ensemble des canalisations et renforts de barrages a demandé l'utilisation de 70 000 tonnes d'acier, produisant 500 kg CO_2/tonne produite. Ainsi, ceci rajoute 350.10^6 kg de CO_2. Ainsi, l'ensemble de la construction provoque l'émission d'environ 360 000 tonnes de CO_2. Amortis sur la production totale d'électricité, on a des émissions de **2,5 gr de CO_2/kWh**. Cette valeur sera prise comme moyenne à l'ensemble de la production d'électricité via l'hydraulique.

iii. Hydraulique de pompage turbinage :

L'hydroélectricité a cet avantage de pouvoir stocker de manière efficace l'énergie électrique sous forme d'énergie mécanique. Ce stockage s'effectue notamment durant la nuit où les centrales nucléaires ne sont pas arrêtées, mais où la demande est faible. De manière schématique, l'énergie nucléaire sert à remonter de l'eau de plusieurs centaines de mètres (cf. schéma du lac aval vers le lac amont), où elle est stockée, et où elle peut être returbinée pour donner de l'électricité.

L'électricité produite par ce moyen émet de plusieurs manières du CO_2. Tout d'abord, l'électricité qui sert au premier turbinage pour le stockage émet du CO_2 qu'il faut prendre en compte. Il faut ensuite prendre en considération les différents rendements de transfert entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique. En général, le rendement global de l'installation est considéré égal à 65%. Enfin l'installation globale nécessite à la construction de fortes émissions qu'on ne peut négliger. Nous allons expliciter l'ensemble de ces étapes causant l'émission de CO_2.

<u>Chaîne de production :</u> comme nous l'avons précisé, l'électricité produite par pompage turbinage est en très large partie issue du nucléaire. Cette électricité produit 2,4 grammes de CO_2 par kWh selon nos estimations. De plus, pour produire 1 kWh par turbinage, il faut 1/0,65 = 1,54 kWh d'électricité nucléaire. Ainsi, la chaîne de production produit 3,8 gr de CO_2 par kWh produit.

<u>Construction et amortissement :</u> le barrage étudié dans la partie précédente, le barrage de Grand Maison utilise ce procédé de pompage turbinage. Nous considérons qu'il y a le même amortissement carbone pour les deux techniques : 2,5 gr CO_2/kWh.

Au final, la production d'électricité via pompage turbinage émet **6,3 gr de CO_2/kWh**.

iv. Solaire photovoltaïque :

Les émissions de ce type de production provient de sa construction. C'est essentiellement la production des cellules photovoltaïques composant le panneau qui

nécessite une grande quantité d'électricité : 600 $kWh_é$ sont nécessaires pour produire 1m² de cellule photovoltaïque. Or, 1m² de panneau photovoltaïque a une puissance de 0,1 kW, et pendant une année, 1500 heures d'ensoleillement sont exploitables en photovoltaïque. Ainsi, pour une exploitation moyenne de 30 ans, on a une production totale de 4,5 $MWh_é$ produit par 1 m² de panneau. Ainsi, pour produire 1 $kWh_é$ photovoltaïque, il faut 0,13 $MWh_é$.

Or, les principaux pays producteurs de cellule photovoltaïque sont l'Allemagne (55% avec Q-Sharp Inc.), le Japon (17% avec Sharp), la Chine (10% avec Sun Tech), les USA (8% avec Sun Power). Or, ces pays produisent leur électricité selon des moyens de productions différents :

Pays	Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique
Allemagne	27%	36%	14%	15%	8%
Chine	2%	83%	1%	0%	15%
Japon	26%	28%	22%	12%	12%
USA	18%	49%	22%	3%	8%

Ainsi, la production d'électricité selon les pays émet des quantités de CO_2 variables. Avec les valeurs trouvées dans notre travail, nous obtenons les valeurs suivantes pour les émissions :

Pays	Emissions (gr de CO_2/kWh)	Emission pour produire 1 kWh
Allemagne	554	73,99
Chine	820	109
Japon	502	66,8
USA	636	84,9

Donc, la production des cellules photovoltaïque émet des quantités variables selon les pays. Ainsi, pour produire 1 $kWh_é$ en photovoltaïque, des quantités variables de CO_2, données en deuxième colonne du tableau précédent. Pour donner une valeur moyenne suivant la répartition de la production, 1 $kWh_{électrique}$ photovoltaïque produit **72,8 gr de CO_2/kWh.** Cette énergie qui se dit propre émet certes 10 fois moins que tous les modes de production à partir de combustible fossile, mais reste tout de même l'énergie renouvelable la plus polluante (10 fois plus que l'ensemble des autres techniques décrites). Ceci provient notamment du fait que la technologie des cellules photovoltaïques n'a sûrement pas atteint la maturité nécessaire pour devenir une énergie

v. Eolien :

Le dernier moyen de production qui nous intéresse est l'énergie éolienne. Là aussi, la production de CO_2 provient essentiellement de la production. Estimons la quantité nécessaire de béton, d'acier et d'autres matériaux composites.

Pour construire une éolienne d'une puissance de 2MW crête, 1000 m^3 de béton armé et 300 tonnes de fer et acier sont nécessaires. Or, les mêmes données utilisées précédemment donnent des émissions correspondant à ces productions : 70 tonnes de CO_2 pour le béton + 390 tonnes de CO_2 pour l'acier. Ce qui fait un total d'environ 500 tonnes de CO_2 nécessaire à la construction de la centrale éolienne.

Cette éolienne produit au maximum de sa puissance pendant une durée de 2000 heures en moyenne par an, et une éolienne est amortie durant une période de 20 à 30 ans. Ainsi, durant son exploitation, une éolienne produit de 80 à 120 GWh d'électricité. Ainsi, amorties sur par exemple 25 ans d'exploitation, ceci donne un taux d'émission de **6 gr de CO_2/kWh**.

En conclusion de cette partie, nous pouvons affirmer que la production d'électricité produit des quantités de CO_2 très variables selon le mode de production. Les pays qui produisent leur électricité à partir de charbon ou de toute autre énergie fossile comme la Chine ou les Etats-Unis émettent de grandes quantités de gaz à effets de serre, à l'inverse, des pays comme la France ou le Japon, ayant orienté leur production électrique largement vers le nucléaire émettent des quantités largement inférieures de GES.

Dans la suite de notre travail, nous allons nous appuyer sur les données établies dans cette partie, en prenant pour chaque moyen de production, des valeurs médianes (pour les productions à partir d'énergie fossiles), et les valeurs estimées pour les moyens de productions plus propres (nucléaire, éolien, solaire photovoltaïque …). Ces valeurs sont résumées dans le tableau ci après.

Mode de production	Masse de CO_2 émise gr $CO_2/kWh_é$
Biomasse/déchet	858
Fioul lourd	860
Charbon	1070
Gaz *cycle de Rankine*	730
Gaz *cycle combiné*	428
Nucléaire	2,4
Eolien	6
Hydraulique (fil de l'eau)	2,5
Hydraulique (pompage)	6,3
Solaire photovoltaïque	72,8

5. Emissions de CO2 du système électrique français

a. Méthode de calcul

A partir de nos modèles d'émissions de CO2 par filière de production, nous pouvons désormais réaliser un bilan d'émissions de CO2 de la production et consommation d'électricité en France. Pour cela, nous avons besoins de l'énergie produite par chaque filière de production. RTE (Réseau de Transport d'Electricité) publie sur son site internet ces données :

« Les producteurs français réunis au sein de l'Union Française de l'Electricité - UFE - ont décidé, en partenariat avec RTE, de mettre à la disposition des acteurs du marché, via le site internet de RTE, des données agrégées par filière relatives à la production d'électricité. »

Dans le cadre de notre étude, nous réalisons un bilan annuel afin de le confronter aux chiffres que l'on peut trouver sur internet : « Emissions de CO2 du système électrique : 30 Mt/an »[4]. Pour cela, nous exploitons les données de production au pas de temps horaire sur une année, du 1er septembre 2008 au 31 aout 2009. Cependant nous nous intéressons au contenu CO2 des émissions du à la consommation d'électricité française. Ainsi, il convient de prendre en compte les échanges aux frontières. Ainsi :

Consommation (pertes comprises) = Production + Imports – Exports

Concernant les échanges aux frontière, la France est historiquement exportatrice net d'électricité sur le bilan annuel (entre 30 et 40 TWh par an). Cependant, il convient de préciser un peu ce propos. En effet, la France a de plus en plus besoin recours aux pays frontaliers lors de heures de pointes, notamment de l'Allemagne. De plus, la France a été importatrice nette d'électricité lors du mois d'octobre 2009. Ceci fut une première depuis 27 ans[5]. Cet hiver (2009-2010), l'énergie transite quotidiennement de l'Allemagne et la Belgique vers la France lors de la pointe de 19h. Cependant, la France est tout de même exportatrice nette vers l'Italie à ces moments. Ainsi, dans notre modèle, nous agrégeons les échanges aux frontières, en ne prenant en compte que le solde globale des échanges aux frontières. Ce qui revient à dire que si la France importe 100 MW depuis l'Allemagne à une heure donnée, et que si dans le même temps elle exporte 50 MW vers l'Italie alors nous prenons en compte dans le bilan CO2 que 50 MW de consommation en France avec la teneur en CO2 du kWh moyen de l'Europe, c'est à dire 370 gCO2/kWh. Cela revient à dire que les 50 MW de différence ont été importés par la France de l'Allemagne pour satisfaire les besoins de l'Italie. Cette hypothèse revient à omettre le problème du transport dont la difficulté s'accroit avec la distance et qui nécessite parfois une production supplémentaire proche de la consommation pour pouvoir l'acheminer dans de bonnes conditions. Nous aurions pu importer que 50 MW de l'Allemagne si l'on n'avait pas exporté 50 MW vers l'Italie.

---

[4] http://www.agirpourlenvironnement.org/pdf/contenuCO2longue.pdf

[5] http://www.lemonde.fr/economie/article/2009/11/17/la-france-importatrice-nette-d-electricite-une-premiere-depuis-27-ans_1268549_3234.html

Cette hypothèse peut être discutée mais il nous semblait important de faire un bilan sur la consommation de la France en matière d'électricité, plutôt que sur la production. Sans prise en compte des échanges aux frontières, cela revenait à dire que l'on émettait pas de CO2 en achetant un jean puisqu'il a été fabriqué en Chine !

Nous travaillons sur les données de production en agrégeant chaque unité de production avec sa filière de production. Nous distinguons dans notre étude 10 filières de production :

- Nucléaire
- Eolien+Solaire
- Biomasse
- Gaz
- Charbon
- Fioul
- Hydraulique fil de l'eau/lac
- Pompage hydraulique
- Importation
- Exportation

Pour l'exportation, nous prenons comme teneur en CO_2 celle du kWh moyen français, à savoir 75 gCO_2/kWh.

Cependant, afin de restituer complètement la consommation, il ne suffit pas de sommer les puissances totales des différentes filières de production et d'ajouter le solde des échanges aux frontières. En effet, notre modèle ne prend pas en compte l'autoconsommation des moyens de production. Bien que n'étant pas négligeables (de 0 à 10 % suivant les filières), il nous est pas possible de les prendre en compte. Cette hypothèse contribuera à augmenter légèrement l'incertitude de nos calculs. De même, nous ne pouvons pas prendre en compte le détail heure par heure des entités de production des particuliers (panneau solaire sur les toits...). Ces productions restent cependant très marginales donc peuvent être aujourd'hui en France négligées. Ainsi nous pourrons voir de légères différences par rapports au données officielles, notamment dans la part du solaire et de l'éolien. Mais nous pensions qu'il était intéressant et très enrichissant de faire notre propres calculs avec notre propre méthodologie plutôt que de reprendre toujours des résultats publiés. L'ensemble de ces résultats n'engage que nous étant donné que nous avons choisi une méthode de calcul spécifique. Ils ne sauraient être pris comme référence. Cependant, nous estimons qu'ils fournissent des indications et ordre de grandeur représentatif de la situation.

b. Résultats

Bilan annuel : Nous appliquons désormais notre modèle d'émission de CO_2 par filière de production aux données de production par filière au pas de temps horaire, sur l'année 2008-

2009 (du premier septembre au 31 août). Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

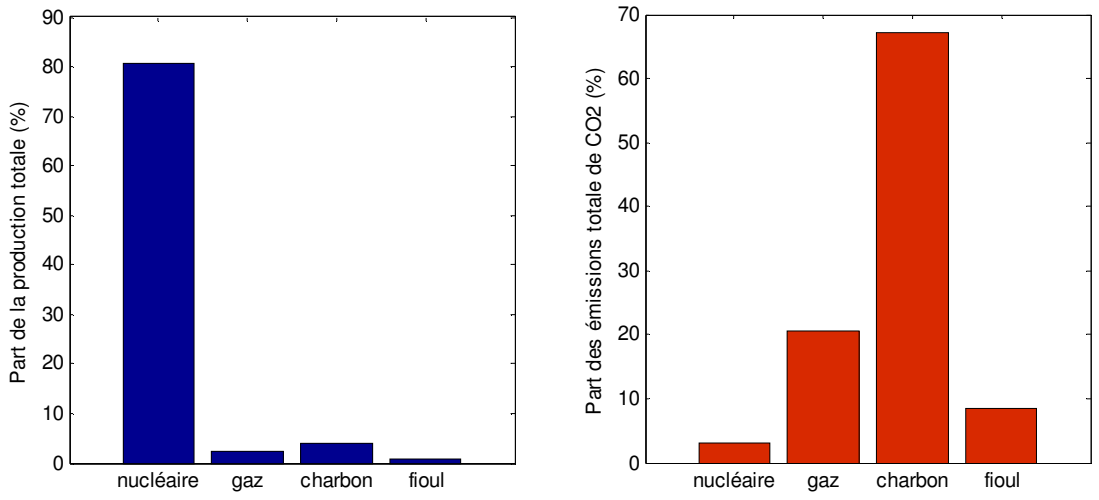
Filière	Production annuelle (TWh)	Part dans la production totale(%)	Emission (gCO2/kWh)	Emissions annuelle (milliers de tonnes de CO2)	Part dans les émissions de la production (%)
Nucléaire	405,49	80,73	2,4	973,2	2,97
Eolien+Solaire	0,46	0,09	30	13,8	0,04
Biomasse	0,79	0,16	50	39,5	0,12
Gaz	11,42	2,27	589	6726,4	20,5
Charbon	20,56	4,09	1071	22019,8	67,12
Fioul	3,51	0,7	804	2822	8,6
Pompage	6,27	1,25	6,5	40,8	0,12
Hydraulique	53,77	10,71	3,2	172,1	0,52
Importation	14,8		370	5476	
Exportation	-49,46		75	-3709,5	
Total	467,61	100		34574,1	100

Tableau 1. Bilan annuel (calculs propres)

Arrêtons-nous quelques instants pour commenter ces résultats. Nous voyons que si l'on somme l'ensemble des moyens de production français auxquels on rajoute les importations, on obtient une valeur de 517 TWh pour l'année à cheval 2008-2009, à comparer aux 550 TWh que RTE transporte chaque année. On obtient un écart de seulement 6%.

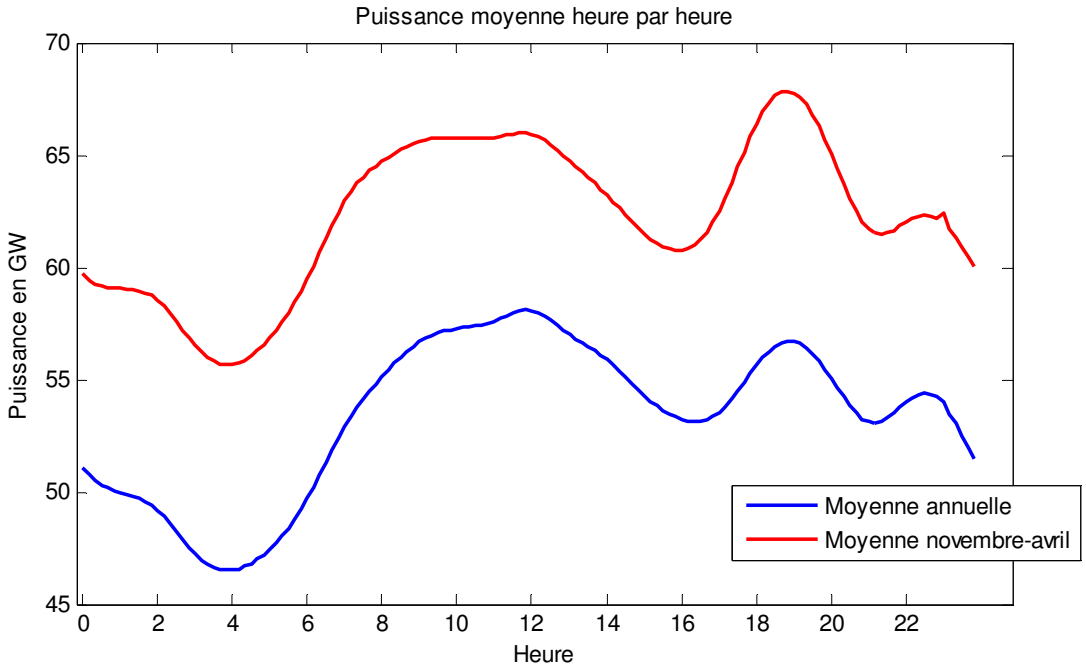
Avec notre modèle d'émissions de CO_2 par filière et notre méthode de calcul, nous trouvons que la consommation d'électricité en France a émis de l'ordre de 34 Mt de CO2 pendant la période septembre 2008 à fin août 2009.

Quelques chiffres sont assez frappants. Par exemple, nous voyons que le nucléaire représente plus de 80 % de l'électricité produite et que cette quantité représente moins de 3 % des émissions de CO_2 (notre modèle prend en compte les émissions dues à la construction et au cycle du combustible). A l'inverse, le charbon compte pour 67 % des émissions alors qu'il ne représente que 4 % de la production d'électricité. Ce constat est représenté sur les figures ci dessous.

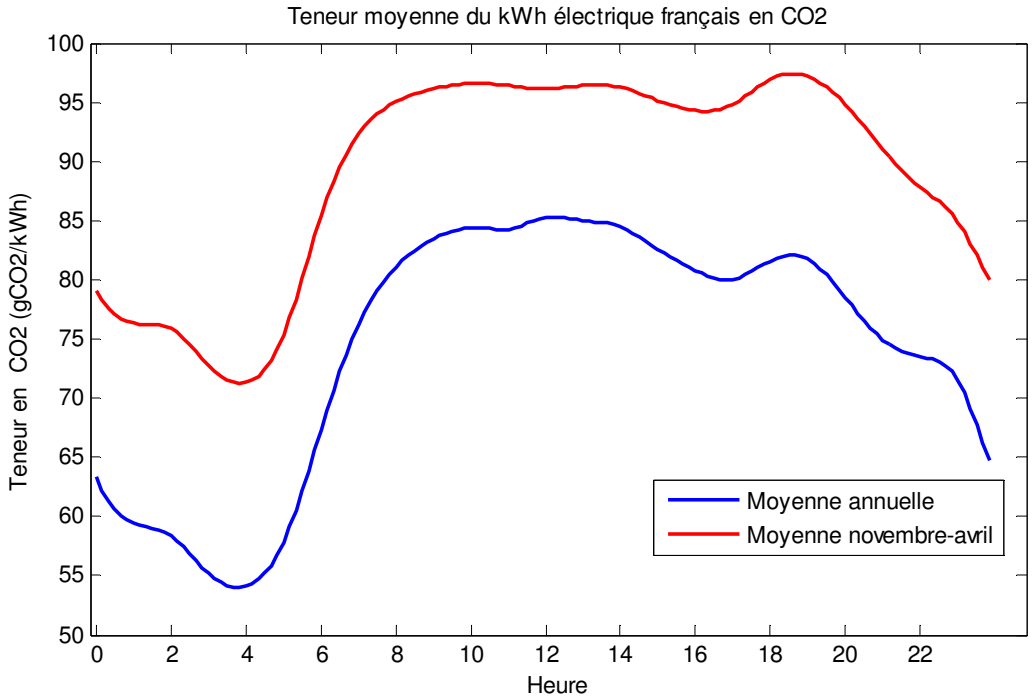


1. Répartition de la production et des émissions de CO2

Si à partir du bilan annuel, on zoome un peu afin de s'intéresser cette fois ci, au contenu carbone du kWh français moyen par heure. On classe donc chaque valeur de production suivant l'heure afin de faire une moyenne annuelle par heure. On représente tout d'abord la courbe de charge moyenne sur l'année te sur la période de chauffage (novembre-avril) suivant l'heure de la journée. Ensuite, on calcule la teneur moyenne en CO_2 du kWh consommé en France en division la consommation moyenne par les émissions de CO_2 moyennes, et ceci heure par heure.



1. Consommation moyenne par heure



2. Teneur moyenne en CO_2 du kWh consommé en France

Ces courbes appellent plusieurs commentaires. Tout d'abord, la pointe de consommation est fortement marquée vers 19h en période hivernale alors qu'elle se situe le matin en période estivale. La consommation moyenne sur l'année est de 53,4 GW. En effet, nous consommons 467.61 TWh par an (soit 8760 heures).

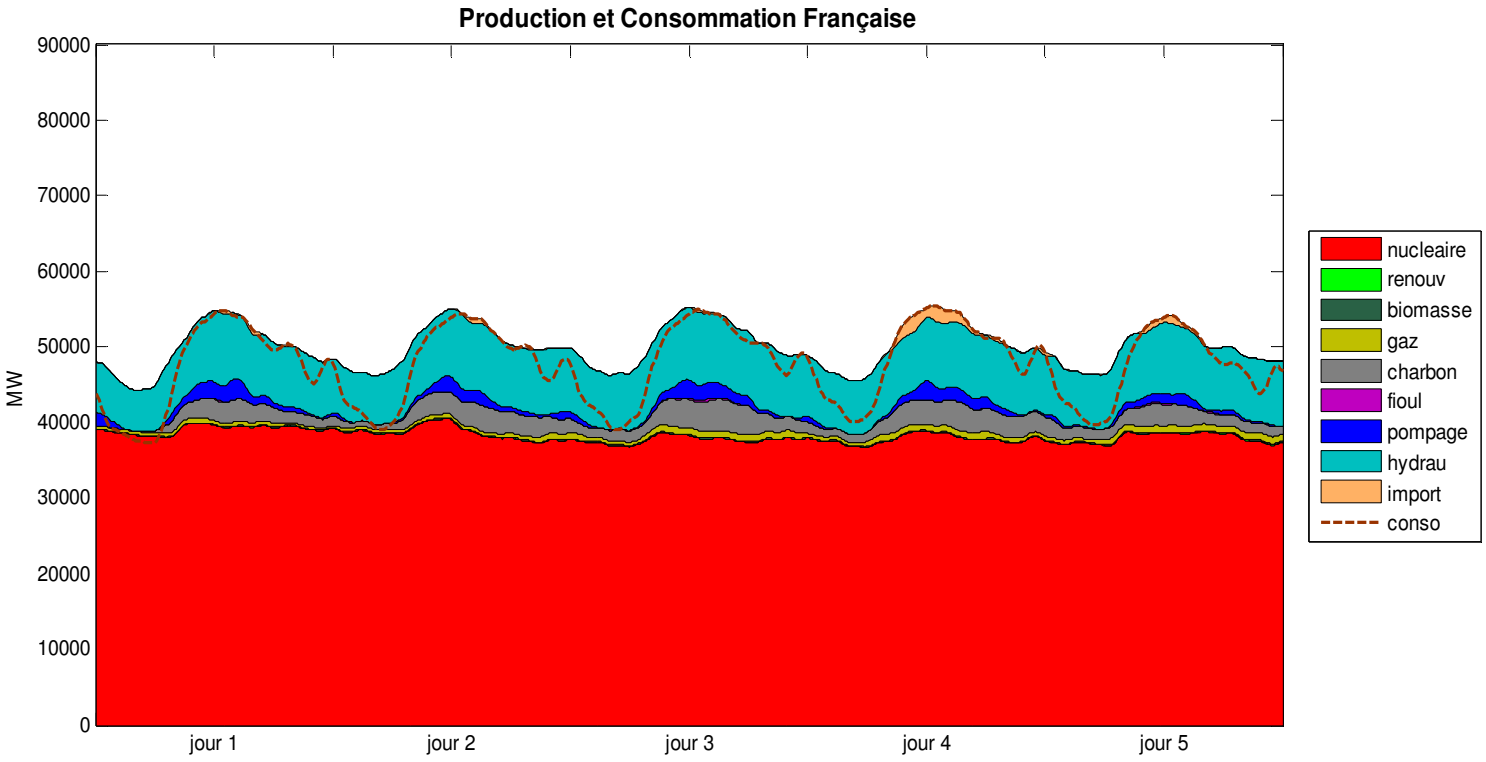
Concernant le deuxième graphe, le kWh en période hivernale est plus polluant que le kWh moyen sur l'année (89,9gCO_2 contre 74,4 gCO_2 en moyenne sur l'année). Ceci s'explique par le fait que la consommation est plus élevée en hiver à cause du parc de chauffage électrique installée en France. Cette situation est atypique et ne se retrouve dans aucun autre pays. Le chauffage électrique s'est fortement développé en France à partir des années 1970 et le déploiement de l'industrie nucléaire. La puissance de chauffage appelée peut représenter plus de 30 % de la consommation totale lors de jours de grand froid en hiver (soit 30 :GW). Ainsi, les capacités de production classique (nucléaire et hydraulique) ne sont pas suffisantes ces jours-là et les producteurs doivent recourir à des moyens de production plus polluants (charbon et fioul).

Concentrons nous sur la période hivernale, on remarque qu'il y a un fort pic de production en moyenne vers 19h mais que le kWh à 19h ne contient pas tellement plus de CO_2 que le kWh à 16h alors que la consommation est plus de 10 % plus forte. Cela signifie que c'est généralement un moyen de production peu émetteur de CO_2 qui assure la pointe

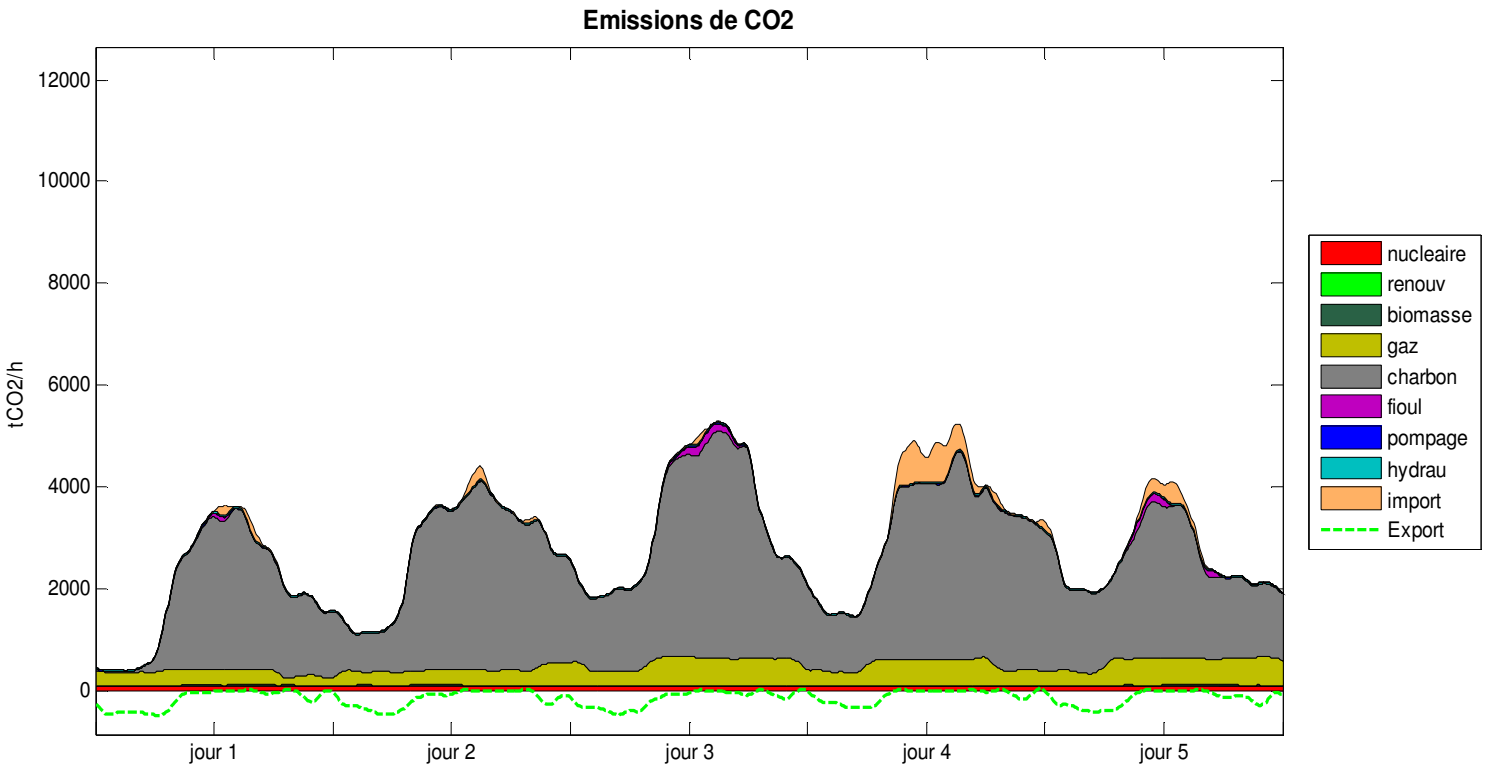
entre 18 h et 20 h. Nous verrons en effet, qu'il s'agit principalement du pompage hydraulique et de l'hydraulique classique.

c. Structure de la production

Nous avons dans un premier temps fait des bilans par période ou sur l'année à partir des données horaires. Zoomons encore plus afin de voir la structure de la production heure par heure sur une période choisie. Nous pourrons voir comment se répartit la production d'électricité suivant les filières de production et comment se répartissent les émissions de CO_2. Les deux premiers graphes montrent une situation typique en période estivale de l'année 2009 sur 5 jours où l'on peut remarquer que le nucléaire et l'hydraulique parviennent pratiquement à assurer la production pour toute la consommation et les exportations. La courbe de consommation est superposée sur le premier graphe. Le deuxième graphe montre les émissions de CO_2 sur ces mêmes 5 jours suivant les filières de production.



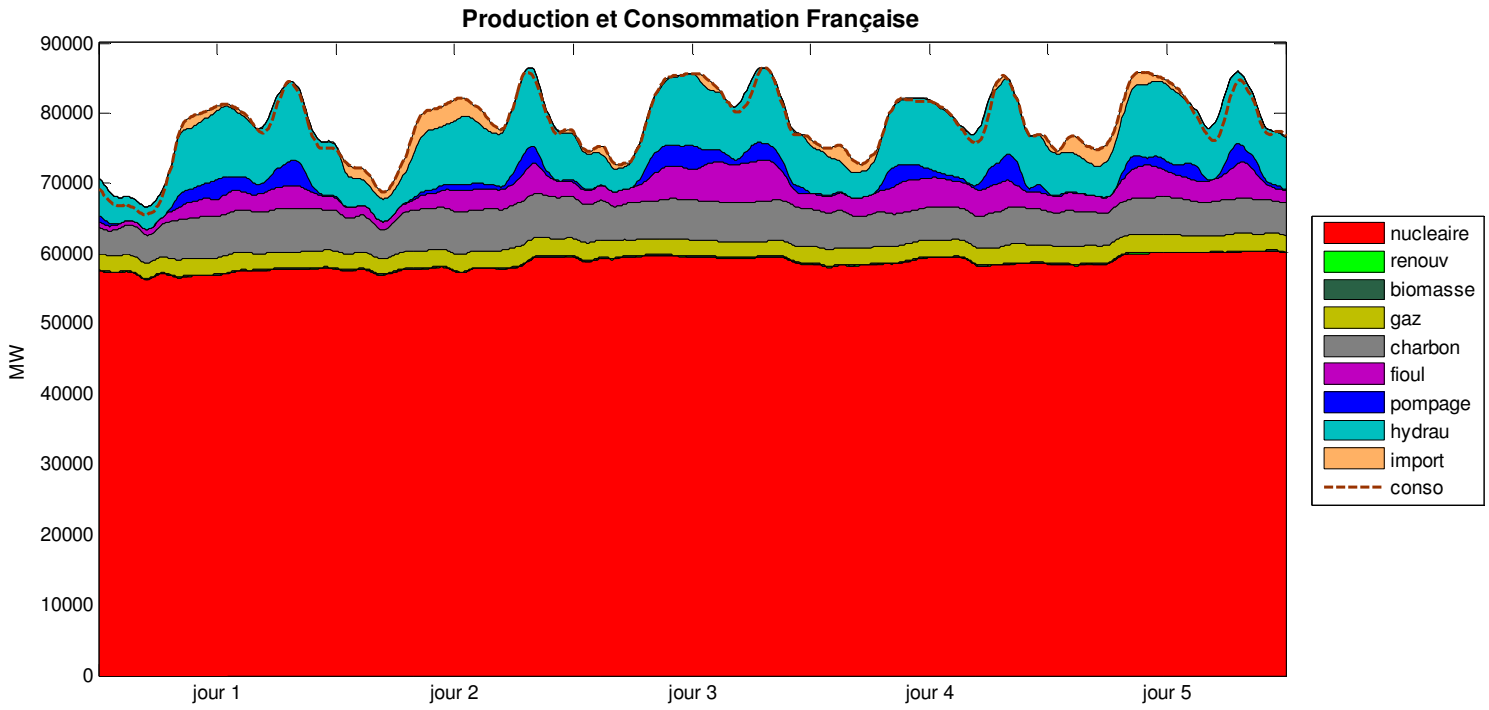
3. Production et consommation sur 5 jours d'été



4. Emissions de CO_2 sur la même période

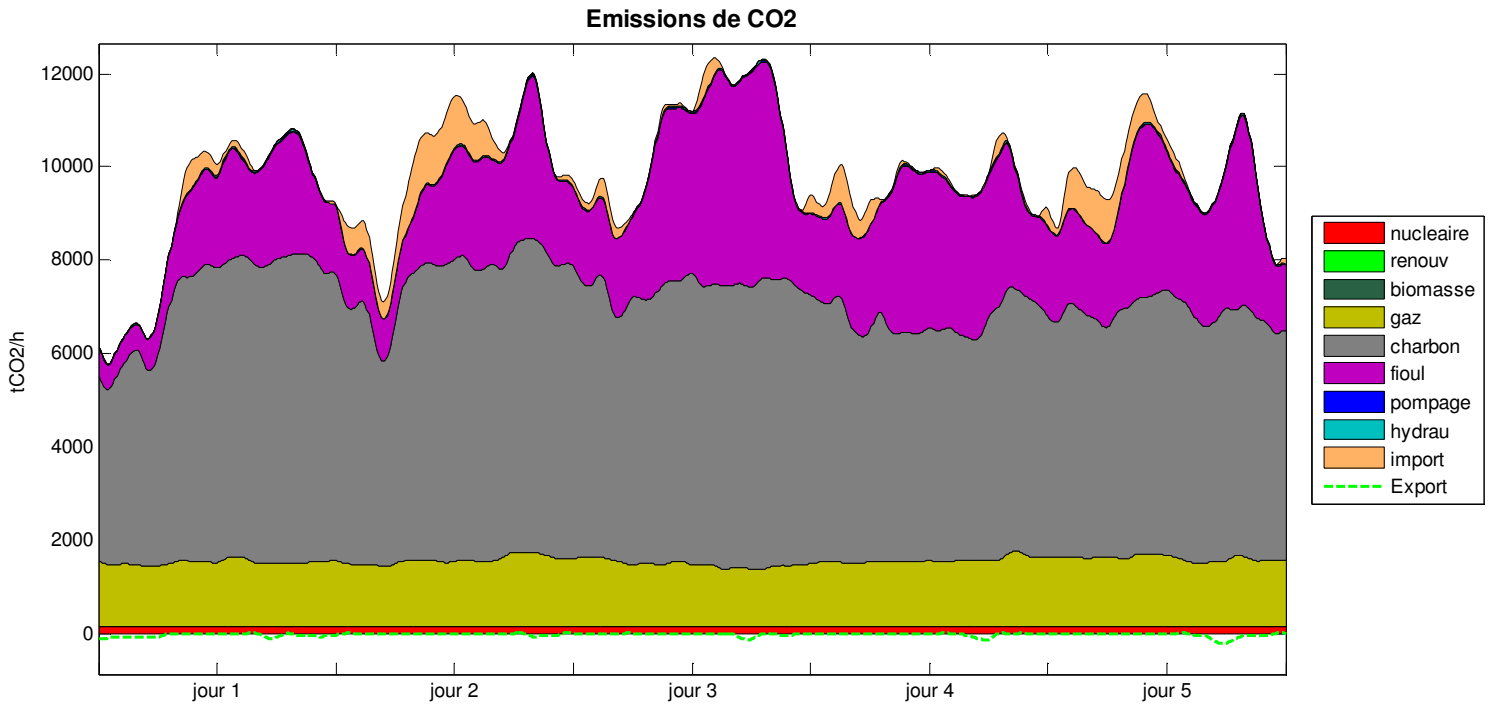
Nous remarquons que l'on émet environ 3 000 tonnes de CO_2 par heure sur cette période d'été quasi uniquement via une production d'électricité avec des centrales au charbon. La consommation moyenne est un peu en deçà de 50 GW. On remarque que le maximum de consommation n'a pas lieu le soir mais dans la matinée, ce qui est caractéristique de la période estivale et l'on a parfois un solde des échanges aux frontières négatif à ce moment de la journée.

Visualisons la structure de la production sur cette fois ci cinq jours de froid en hiver. La consommation est beaucoup plus forte, comme nous l'avons expliqué précédemment. Nous devons donc fortement augmenter la production d'électricité en faisant appel à des moyens fortement polluants et souvent, nous devons importer massivement de l'électricité, principalement en provenance d'Allemagne.



5. Production et consommation sur cinq jours d'hiver

Les émissions sont donc naturellement beaucoup plus importantes, le graphe suivant montre ces résultats qui sont saisissants !



6. Emissions de CO_2 sur cinq jours d'hiver

Sur ces cinq jours, notre consommation d'électricité émet en moyenne pratiquement 10 000 tonnes de CO_2 par heure. Si l'on compare par rapport à la période estivale précédente, la consommation est environ 70 % plus forte sur la période hivernale mais les émissions sont 300 % plus importantes. Il semble donc particulièrement judicieux de vouloir mettre en œuvre des solutions pour réduire les émissions de CO_2 lors de ces périodes. L'effacement de la consommation peut être l'une d'elles.

6. Modélisation de l'effacement et impact sur les émissions de CO_2 :

Dans cette partie, nous construisons un modèle de réduction des émissions de CO_2 dues à l'effacement. Pour cela nous nous mettons dans le cadre de proposition d'effacement à l'heure de la pointe journalière. Nous nous intéressons ici uniquement à l'effacement obtenu à partir des radiateurs dans les foyers. Ainsi nous supposerons un potentiel d'effacement constant entre début novembre et fin avril et nul le reste de l'année. Ce potentiel d'effacement sera pris successivement égal à 10, 100, 1000 et 10000 MW. Nous supposerons que l'on dispose de ces puissances une heure ou eux heures par jours. Notre but est de calculer le CO_2 que l'on n'émet pas lorsque RTE a recours à l'effacement. Pour ce faire nous limitons nos émissions de deux manières. Dans le premier cas, l'ajustement de la pointe est assuré par l'énergie hydraulique ou le pompage. Dans ce cas, nous considérons que l'énergie que nous n'utilisons pas est répartie également sur la journée. Plus précisément, la production d'énergie hydraulique augmente un peu tout au long de la journée et permet de diminuer le niveau d'utilisation des centrales émettrices. Ainsi 1kWh non utilisé à la pointe sera ''étalé'' sur 24h. Pour schématiser, on produira 1/24 kW hydraulique en plus en continu. La consommation de combustible fossile en sera diminuée d'autant. Nous verrons un peu plus loin comment est explicitement répartie cette énergie ''gagnée''. L'autre manière de réduire les émissions est de ''supprimer'' directement la production des centrales à fioul, gaz et charbon. Nous procédons ainsi lorsque ces dernières sources font l'ajustement.

a. Explication de l'algorithme :

Nous commençons par interpoler la production linéairement pour réduire le pas de temps. Cela permet de mieux localiser l'effacement dans le temps. Ainsi on pourra choisir d'effacer la production une ou deux heures autour de la pointe.

Nous déterminons ensuite la pointe journalière. Pour ce faire nous considérons simplement le maximum de consommation journalière, en gardant en mémoire l'heure à laquelle il se produit.

Ceci fait, on s'occupe de mesurer les variations autour de la pointe. Comme notre interpolation est linéaire, on se contente de calculer le taux de variation pour chaque source d'énergie entre l'heure i et l'heure i-1. Précisément pour chaque source, nous calculons la variation entre la puissance instantanée délivrée à l'heure de pointe et celle de l'heure précédente.

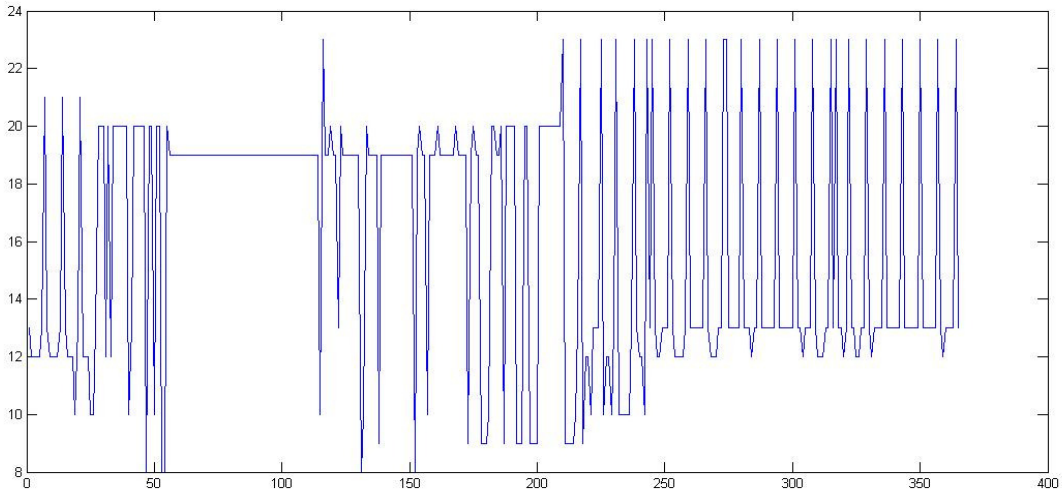
On classe ensuite ces variations pour établir celles qui varient le plus en pourcentage. Cela nous permet de connaître les sources d'énergie qui gèrent l'ajustement de la pointe. Dans notre cas, on suppose que ces dernières connaissent la plus forte variation à l'heure de pointe. Dans notre modèle un source d'énergie qui varie de 50% ajuste ''plus'' qu'une source qui varie de 40%. Nous reviendrons sur ce point dans les améliorations nécessaires. Une fois classées, nous allons pouvoir choisir quel type d'énergie est réduite grâce à l'effacement.

C'est la partie la plus délicate puisqu'il faut ici prédire le comportement d'EDF lorsqu'on lui demande de produire une certaine puissance en moins pendant une heure. Nous tenons ici un raisonnement très simple qui consiste à supposer qu'EDF utiliserait moins ce qu'il utilise peu. Pour savoir ce qu'EDF utilise peu, on compte le nombre de fois dans l'année ou chaque source assure l'ajustement ''en premier''. On entend par là, celle qui enregistre la plus grande variation à la pointe et ainsi de suite jusqu'à celle qui est placée en neuvième position.

Une fois ces résultats connus, nous exécuterons algorithmiquement le raisonnement que nous avons développé dans l'introduction. Dans toute la suite nous ne considérons que les types d'énergie qui connaissent une variation positive. Parmi ceux-là, nous commencerons par limiter la production de ceux qui sont le moins réquisitionnés à l'heure de la pointe parmi fioul, charbon et gaz. Nous regardons ensuite pompage et hydraulique. Si ces dernières varient le plus, alors nous faisons un report sur les prochaines 24 heures. Ce report nous permet de diminuer la production des sources émettrices. Nous calculons ensuite la non-émission de CO_2 en utilisant les valeurs calculées dans la partie émission de ce mini-mémoire. Cela nous permet d'obtenir d'abord des non-émissions journalières puis annuelles.

b. Résultats

Pour les pointes nous obtenons le graphe suivant, (en abscisse le jour de l'année en partant du 1er septembre et en ordonnée l'heure de la pointe) :



On voit que la description de la pointe comme maximum journalier fonctionne bien entre novembre et décembre (jours 60 à 120). Il serait donc utile de voir si on pourrait trouver un autre critère de sélection de la pointe. On pourrait par exemple mesurer la variation horaire de production et choisir l'heure où la variation est maximum. Il faudrait surtout considérer la consommation plutôt que la production. L'export peut en effet générer de grosses productions d'électricité hors de ce que l'on considère comme pointe.

Dans ces conditions nous obtenons pour l'utilisation des types de production pour les deux premiers rangs:

	Rang 2	Rang 1
Nucléaire	0,01	0
Renouvelable	0,15	0,12
Biomasse	0,03	0,01
Gaz	0,05	0,03
Charbon	0,07	0,01
Fioul	0,18	0,19
Pompage	0,12	0,53
hydraulique	0,34	0,05
Import	0,03	0,05

Explication : Le premier rang montre les variations les plus fortes à la pointe. Le rang 2 montre les variations les plus fortes après le premier rang. On voit donc que le pompage connait la plus forte variation 53,15% du temps. L'hydraulique ajusterait en premier 5,48% du temps mais 34,52% du temps en second. On voit ici que le fioul est utilisé en premier, puis viennent le gaz et le charbon pour le rang 1, dans le sens inverse pour le rang 2. Dans la suite nous regarderons notre ordre de suppression par rapport au premier rang. Nous réduisons dans l'ordre croissant de variation c'est à dire charbon, gaz puis fioul. Il se trouve qu'en termes d'émissions, un point de vue écologique nous mènerait au même ordre. En effet le charbon émet en moyenne plus de CO_2 que le gaz, qui lui -même émet plus que fioul.

Voici les résultats que nous trouvons avec le modèle. Ceci dans le cas où l'on efface une heure par jour. Nous avons par ailleurs intégré l'import dans nos émissions avec une valeur européenne moyenne de 370 grCO_2/kWh.

Capacité d'effacement	Réduction du CO_2 émis(tCO_2)	Pourcentage des émissions annuelles
10MW	2170	Moins de 0,01
100MW	21714	0,06
1000MW	217780	0,6
10000MW	2629000	7,54

Nous avons obtenu pour les émissions totales annuelles une valeur de 35,7 millions de tonnes. C'est la valeur que nous avons pris pour calculer nos pourcentages.

c. Améliorations nécessaires

Il sera utile de considérer la consommation à la place de la production pour obtenir une meilleure définition des pointes. En termes algorithmique, il faudrait dans un premier temps essayer de voir comment la pointe est sélectionnée si l'on regarde la variation plutôt que le maximum. Il est possible que selon le moment de l'année, nous obtenions de meilleurs résultats. On peut donc penser à deux modes de sélection en fonction du moment.

Dans le même ordre d'idée, la sélection par variation à l'heure de pointe n'est pas suffisante. En effet, certaines sources d'électricité, comme l'hydraulique, produisent de gros volumes tout au long de la journée. Leur variation relative au moment de la pointe peut donc être faible. Néanmoins, relativement par rapport aux autres productions (fioul, pompage) la quantité d'énergie produite est très grande. On pourrait donc pondérer entre la variation et la quantité relative produite. Par exemple dans le cas de l'hydraulique variation faible*part importante dans la production. On obtiendrait comme cela plus d'étalements de la production que de suppressions directes des centrales émettrices. On aboutit par ailleurs à un meilleur classement pour savoir quelle production procède réellement à l'ajustement.

Un point important à améliorer et probablement source d'erreur est le comportement d'EDF en cas d'effacement. Nous avons considéré ici que l'on pouvait facilement ne pas produire avec les centrales à charbon, etc ...Il est néanmoins probable que l'utilisation de ces centrales ne soit pas diminuée aussi radicalement mais plutôt répartie de manière équilibrée entre les différentes productions. Par ailleurs, nos deux méthodes de limitations demandent encore à être améliorées algorithmiquement. La hiérarchisation entre les deux limitations est encore mal établie. En l'état actuel on aura trop tendance à supprimer plutôt qu'à étaler. On ''atteindra'' donc plus facilement le gaz après avoir effacer le fioul que dans le cas où l'on supprime un petit peu en continu. Le résultat carbone que nous avons calculé pourrait donc être plus élevé qu'il ne doit l'être.

Il serait ensuite intéressant de regarder l'utilisation des chauffages électriques au cours de l'année. Nous avons ici supposé que nous avions une puissance d'effacement disponible entre novembre et avril. Il est peu probable que le fonctionnement du chauffage soit si simple. Nous pourrions donc essayer de perfectionner et de lisser notre potentiel de réduction en fonction de la période de l'année.

Cela n'a pas été fait ici, mais on pourrait travailler sur une perspective d'effacement plus régulière. En effet, proposer une certaine puissance à la pointe est un premier pas, mais on peut penser à effacer plusieurs fois par jour, voir en continu selon la taille du parc installé.

Une modification un peu moins importante est d'interpoler la courbe de production de manière plus lisse.

7. Conclusion

En conclusion, l'effacement semble une solution efficace pour remédier à court terme aux problèmes de production, d'acheminement et de consommation de l'électricité. Il apparaît aussi que les possibilités d'effacement dans le domaine tertiaire et dans l'habitat individuel semblent nombreuses. Les entreprises comme Voltalis proposent ainsi des solutions efficaces d'effacement diffus de la consommation d'électricité des particuliers.

Nos différents modèles d'émissions de CO_2 et d'effacement de la consommation de pointe de l'électricité montrent que ces mesures ne peuvent être que bénéfiques pour l'environnement. Car, effacer de la consommation d'électricité, notamment lors de la pointe de consommation en hiver, réduit de manière drastique les émissions de gaz à effet de serre. On peut ainsi économiser plusieurs millions de tonnes d'émission de CO_2 juste en effaçant ponctuellement quelques MW de consommation, en pointe : selon notre modèle, un effacement organisé de la consommation d'électricité peut économiser annuellement 35,7 MT de CO_2.

Ainsi, à court terme, un effacement diffus de la consommation d'électricité, notamment lors des pics de consommation, réduit la production d'électricité, assurant ainsi la stabilité d'un réseau qui montre actuellement ses limites. A plus long terme, l'effacement de consommation notamment aux périodes critiques peut réduire le plan de construction de nouvelles centrales. Car, pour répondre au besoin futur à la pointe de consommation, de nombreuses centrales facilement mobilisables (gaz essentiellement) devraient être construites. Et, diminuer efficacement ces besoins de pointes diminue donc la nécessité de construire des centrales.

Cependant, on peut aisément comprendre que ces mesures ne soient pas acceptées par les producteurs d'électricité, qui possèdent aujourd'hui des centrales capables de répondre au besoin de pointe en hiver. Ces producteurs ont tout intérêt à produire de l'électricité, même si cette production est polluante : il faut bien que leurs centrales soient amorties. Un plan européen d'incitation à l'effacement diffus de consommation est une réponse à cette réticence des producteurs, en permettant la monétisation de ces capacités d'effacement, au même titre que la production.

8. Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier M. Pierre Bivas, Directeur de Voltalis, qui nous a accueillis dans ses locaux parisiens, afin de nous expliquer en détail l'ensemble du fonctionnement de sa start-up, et de la technologie qu'il a mis au point. Ses explications complémentaires lors de sa présentation pour ce module *Energie renouvelable* nous ont été d'une aide précieuse.

Nous tenons aussi à noter l'aide essentielle que nous a fournie RTE, via les différentes bases de données sur la consommation d'électricité en fonction des modes de production. Ces fichiers ont été décisifs pour la modélisation des émissions de CO_2, et de l'effacement de la consommation.

En outre, les cours de l'ENSTA sur les générateurs et sur le marché de l'électricité nous ont fourni des informations utiles pour la rédaction de ce travail.

9. Bibliographie

- ✓ www.rte-france.com
- ✓ www.edf.fr
- ✓ www.agirpourlenvironnement.fr
- ✓ www.ademe.fr
- ✓ www.developpement-durable.gouv.fr
- ✓ http://www.sfen.org/fr/societe/developpement/edf.htm

✓

10. Annexes

Modélisation Matlab de l'effacement de la pointe et des conséquences sur les émissions de CO_2 :

```
clear all;

%%Déclaration des matrices et constantes du problème

imax=8760;
jmax=11;
imax2=imax*5;
jmax2=9;
production_c=zeros(imax2,jmax);
classement=zeros(365,8,2);
TVariation=zeros(8,1);
pointes=zeros(365,1);
capac_eff=zeros(6,1,365);
capac_eff(:,:,62:242)=10;
production2=zeros(imax2,jmax);
reducCO2=zeros(imax2,jmax2);
convEn_CO2=zeros(jmax2,1);
convEn_CO2(1,1)=2.4*(10^3);
convEn_CO2(2,1)=30*(10^3);
convEn_CO2(4,1)=819*(10^3);
convEn_CO2(5,1)=1071*(10^3);
convEn_CO2(6,1)=804*(10^3);
convEn_CO2(7,1)=6.3*(10^3);
convEn_CO2(8,1)=2.5*(10^3);
convEn_CO2(9,1)=370*(10^3);
Compens=zeros(jmax2,jmax2);
reducJourPart=zeros(imax,jmax2);
reducJour=zeros(imax,1);
emissionsJour=zeros(365,1);


%%interpolation linéaire de la production pour passer à un pas de temps d'1/5 d'heure

for i=1:imax-1
   for i1=0:4
      production_c((5*i)+i1-4,:)=production(i,:)+(i1/5)*(production(i+1,:)-production(i,:));
   end
end



for i=1:365
   consoMax_courante=0;
```

```
%%Calcul des émissions journalières

for h=1:24
   if (24*(i-1)+h~=5018)
      emissionsJour(i,1)=emissionsJour(i,1)+(production(24*(i-1)+h,1:9)*convEn_CO2(1:9,1));
   end
end


%%Détermination de la pointe par maximum de consommation

for i2=1:24
   if (production((i-1)*24+i2,11)>= consoMax_courante)
      consoMax_courante=production((i-1)*24+i2,11);
      pointes(i,1)=i2;
   end
end

%% calcul du taux de variations à l'heure de la pointe

for k=1:jmax2
   if (production((i-1)*24+pointes(i,1)-1,k)==0)
      TVariation(k,1)=0;
   else
      TVariation(k,1)=(production(24*(i-1)+pointes(i,1),k)-production((i-1)*24+pointes(i,1)-
1,k))/(production((i-1)*24+pointes(i,1)-1,k));
   end
   classement(i,k,1)=k;
   classement(i,k,2)=TVariation(k,1);
end

%%Classement des sources d'énergie en fonction de leur variation à la
%%pointe

vec=sort(TVariation(:,1));
while (~(isequal(classement(i,:,2),vec')))
  for k=1:jmax2-1
    c=k;
      while((c~=0)&&(classement(i,c,2)>classement(i,c+1,2)))
         temp=classement(i,c,:);
         classement(i,c,:)=classement(i,c+1,:);
         classement(i,c+1,:)=temp;
         c=c-1;
      end
   end
end

%% Calcul du pourcentage d'utilisation sur l'ajustement de la pointe
%% pour chaque source

for k=1:jmax2
```

```
    for k2=1:jmax2
      if (classement(i,k2,1)==k)
        Compens(k,k2)=Compens(k,k2)+1;
      end
    end
  end

  %%calcul de la réduction d'émission de C02
  %%critère statistique des sources de production=critère écologique
  %%annulation énergie polluante

  reste_eff=capac_eff(:,:,i);
  heureh=(i-1)*24*5+(pointes(i,1)*5);
  for s=[9,5,4,6]
    for c2=9:-1:1
      if ((classement(i,c2,1)==s)&&(classement(i,c2,2)>0))
        production2((heureh-2):(heureh+3),s)=max(production_c((heureh-2):(heureh+3),s)-
reste_eff,0);
        reducCO2((heureh-2):(heureh+3),s)=reducCO2((heureh-
2):(heureh+3),s)+(production_c((heureh-2):(heureh+3),s)-production2((heureh-
2):(heureh+3),s))*1/5*convEn_CO2(s,1);
        reste_eff=max(-production_c((heureh-2):(heureh+3),s)+reste_eff,0);
      end
    end
  end

  %%pointe assurée par pompage ou énergie hydraulique

  reste_eff2=zeros(24*5,1);
  jourj=(i-1)*24*5;
  for s=[7,8]
    for c2=9:-1:1
      if ((classement(i,c2,1)==s)&&(classement(i,c2,2)>0))
        production2((heureh-2):(heureh+3),s)=max(production_c((heureh-2):(heureh+3),s)-
reste_eff,0);
        reste_eff2=(sum(reste_eff)/(24*5))*ones(24*5,1);
        production2((jourj+1):(jourj+(24*5)),s)=production_c((jourj+1):(jourj+(24*5)),s)+reste_eff2;

        %%Report sur les énergies émettrices

        for s2=[9,5,4,6]
          p=c2-1;
          for c3=p:-1:1
            if (classement(i,c3,1)==s2)

production2((jourj+1):(jourj+(24*5)),s2)=max(production_c((jourj+1):(jourj+(24*5)),s2)-reste_eff2,0);

reducCO2((jourj+1):(jourj+(24*5)),s2)=reducCO2((jourj+1):(jourj+(24*5)),s2)+(production_c((jourj+1):
(jourj+(24*5)),s2)-production2((jourj+1):(jourj+(24*5)),s2))*1/5*convEn_CO2(s2,1);
              reste_eff2=max(-production_c((jourj+1):(jourj+(24*5)),s2)+reste_eff2,0);
            end
          end
```

```
            end
            reste_eff=max(-production_c((heureh-2):(heureh+3),s)+reste_eff,0);
        end
    end
  end

  %%Calcul des économies de CO2 par source et jour et par jour

  for k=1:jmax2
    reducJourPart(i,k)=sum(reducCO2(jourj+1:jourj+(24*5),k));
  end
  reducJour(i,1)=sum(reducJourPart(i,:));
end

%%Calculs finaux

emissionsTotales=sum(emissionsJour)

reducTotale=sum(reducJour)

pourcentageReduc=reducTotale/emissionsTotales

for k2=1:9
  Compens(:,k2)=Compens(:,k2)/365;
end
```