

Groupe de Réflexion sur l'énergie et l'environnement au XXIème siècle

COMPTE RENDU

Date de la réunion : 31 mai 2018

Date de diffusion : 8 juin 2018

Lieu de la réunion : Siège de la SFEN au 103 rue Réaumur - Paris 2^{ème}.

Rédacteur : Emilio RAIMONDO ; Revu par Maurice MAZIÈRE ;

Visa : Maurice MAZIÈRE

Participants : Mmes. DUTHEIL.

MM. ACKET, BLANC, CAZALET, CROCHON, GAMA, LENAIL, LEROUGE, MAZIÈRE, NAUDET,
NIEZBORALA, RAIMBAULT, RAIMONDO, SORIN, SORNEIN, TETREAU, VENOT.

Diffusion : les membres du comité d'action, les représentants régionaux,
les membres, les groupes transverses, les sections techniques, Valérie
FAUDON, Boris LE NGOC.

ORDRE DU JOUR

I. Conférence du matin (10h30 – 12h30) :

Conférence par Bernard BONIN du CEA
Présentation du logiciel « MIXOPTIM »
(Outil d'évaluation et d'optimisation d'un MIX électrique)

II. Réunion de l'après-midi :

1. Observations sur le précédent compte rendu.
2. Stockage et archivage des comptes rendus et documents du GR 21 :
quelle solution ?
3. Informations générales et questions d'actualité.
4. Tour de table.
5. Examen du programme pour les prochaines journées.

Pièces jointes au compte rendu :

PJ 1 Présentation de Bernard BONIN.
PJ 2 Présentation de la Voix du Nucléaire.
PJ 3 Bulletin d'adhésion à « Voix du nucléaire ».
PJ 4 Annonce d'un colloque SLC.
PJ 5 ADAPes - Forum nucléaire.
PJ 6 Le rapport de l'IRENA.
PJ 7 L'éolien en Europe en 2017.
PJ 8 EDF acquiert un parc éolien en Ecosse.
PJ 9 Article Michel GAY.
PJ 10 Article traduit par Michel GAY.
PJ 11 Éditorial de l'IFRI.
PJ 12 Lettre Géopolitique de l'Electricité.
PJ 13 Première centrale en Turquie.
PJ 14 Une centrale nucléaire flottante.
PJ 15 Cahier d'acteur d'EDF.
PJ 16 Cahier d'acteur de l'ADEME.
PJ 17 Commentaires JPP sur le cahier d'acteur de l'ADEME.
PJ 18 Cahier d'acteur de France Nature Environnement.
PJ 19 Cahier d'acteur de SLC.
PJ 20 Cahier d'acteur du CEA.
PJ 21 Groupe indépendant de réflexion sur l'énergie.
PJ 22 Quel nucléaire dans le futur ?
PJ 23 Power to gas.
PJ 24 L'hydroélectricité en 2018.
PJ 25 Comment sont répartis les réacteurs nucléaires dans l'UE.
PJ 26 Le stockage de l'électricité réalités et perspectives.
PJ 27 Quelle évolution pour les concessions hydroélectriques en France.
PJ 28 Faut il arrêter l'ARENH ?
PJ 29 Le blog de Sylvestre HUET.
PJ 30 Rénovation énergétique des bâtiments.
PJ 31 Discours de Dominique MINIERE devant la commission de l'Assemblée Nationale.
PJ 32 Renouvellement du parc nucléaire français.
PJ 33 Fichier comportant plusieurs revues de Presse.

1. Conférence du matin : par Bernard BONIN

Bernard BONIN qui était directeur adjoint de la direction scientifique à la direction nucléaire du CEA est depuis peu à la retraite. Pour suivre sa présentation on pourra se reporter aux planches qu'il a projetées (voir PJ 1).

MIXOPTIM est un outil d'évaluation et d'optimisation d'un mix électrique sur un territoire, ce sujet fera d'ailleurs prochainement l'objet d'un MOOC de la SFEN dans le cadre de l'INSTN, qui sera accessible sur Internet.

La transition énergétique est en marche dans les pays occidentaux comme cela est représenté sur la planche 2 qui montre l'exponentielle de l'installation des puissances renouvelables dans le MIX allemand.

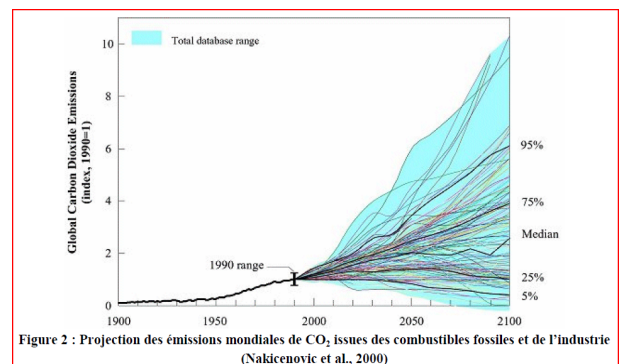
Les problèmes qui se posent dans ce contexte, c'est la gestion de l'intermittence et les aspects économiques associés à cette transition, qui a un coût.

Cela a donné lieu à l'étude de nombreux scénarios qui sont des jeux d'hypothèses sur les puissances installées, leur variation dans le temps et sur l'évolution de la demande. Cet exercice consiste à examiner les conséquences de certaines hypothèses sur le système énergétique (exercice du type « if...then.. »).

Un scénario peut se vouloir normatif (passer par des points fixés à l'avance) ou réaliste (coller au futur le plus vraisemblable) : l'important est d'afficher clairement la philosophie sous-jacente!

Tous les scénarios étudiés ont donné lieu à une multitude de résultats comme cela est représenté sur la planche 5 pour les émissions de CO₂ dans le temps.

Des incertitudes énormes



Le concept de transition énergétique n'a pas la même signification dans toutes les têtes. Pour certains, il s'agit surtout de faire des économies d'énergie, pour d'autres, de diversifier les sources d'énergie, ou de sortir du nucléaire, ou de promouvoir les énergies renouvelables. Pour d'autres encore, il s'agit de décarboner le système.

Les scénarios reflètent fidèlement les tropismes et l'affiliation de leurs auteurs. Exemple : le scénario Négatep est centré sur la réduction de CO₂, le scénario ADEME est centré sur les renouvelables et les économies d'énergie, etc...Si c'est voulu et assumé, c'est bien, à condition que les auteurs précisent qu'il s'agit là seulement d'hypothèses de travail.

C'est pour cela qu'il convient de mettre de l'ordre dans les scénarios en les classant par famille (voir planche 6).

C'est en participant aux travaux de l'Agence Nationale de Coordination de la Recherche sur les Énergies (l'ANCRE) que l'orateur s'est retrouvé engagé dans le développement de cet outil MIXOPTIM aux côtés d'autres personnes venant d'autres institutions (CNRS, PHEMMA, IRSN), voir la planche 7.

Face à cette grande diversité de scénarios, il faut des outils d'évaluation pour pouvoir dire si les scénarios sont possibles, et combien ils coûteraient à la collectivité, s'ils se réalisaient.

Que fait cet outil ?

Sur un territoire donné, une région, la France ou encore l'Europe, on installe des sources de production d'électricité (éolien, solaire, hydro, nucléaire etc..) avec pour chacune de ces sources une certaine puissance installée et une puissance effectivement produite. Il y a également des échanges avec d'autres pays (import / export) et une demande qui est fluctuante en fonction du temps. L'objectif est de satisfaire cette demande grâce aux sources installées ou par l'import / export.

À partir de là, on veut savoir combien coûte la satisfaction de la demande électrique « $D(t)$ » sur le territoire ; cette problématique est illustrée avec les planches 8 et 9 qui posent les éléments suivants :

- Puissance installée ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots$)
- Puissance effectivement produite à l'instant t ($P_1, P_2, \dots, P_i, \dots$)

$$D(t) = \sum_i P_i(t)$$

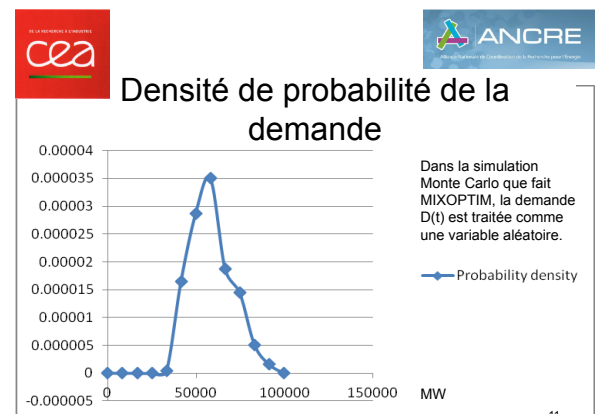
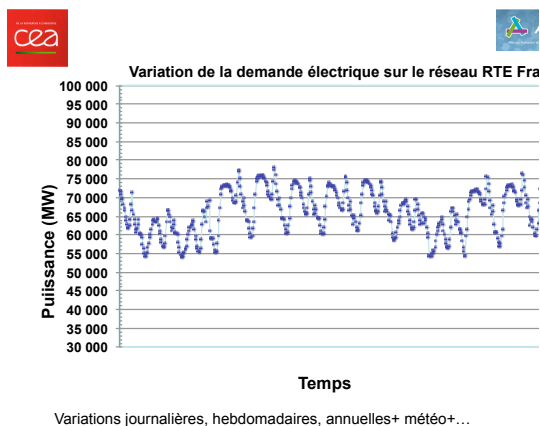
- Demande fluctuante :

- Puissance : $P_i(t) = x_i(t) \cdot \alpha_i$ ($x =$ une fraction de la puissance installée < 1)

La réponse à la question posée n'est pas facile car la demande est fluctuante, elle dépend du temps, les P_i dépendent aussi du temps, les sources ne sont pas forcément disponibles à 100% en permanence (pas de soleil, pas de vent...). Cela se complique aussi du fait que les sources sont utilisées avec un ordre de priorité qui rend le système non linéaire, ce qui rend l'analyse difficile avec des probabilités conditionnelles.

C'est ce qui a conduit à utiliser une méthode dite de « Monte Carlo » en traitant la demande et la disponibilité des sources comme des variables aléatoires.

Voici une image de la demande sur le territoire français en fonction du temps ; on observe les cinq pics de chaque jour de la semaine et les creux du weekend. Avec les informations sur cette demande obtenue auprès de RTE, il a été établi une densité de probabilité de cette demande.



On observe que, sur le territoire français, la demande moyenne (de l'année 2011 ici) est autour de 55 000 MW, mais cela peut aller de 30 000 pour une nuit d'été jusqu'à 100 000 lors d'un pic de consommation un jour d'hiver.

On traite ensuite la disponibilité des sources comme des variables aléatoires indépendantes, voir l'exemple de l'éolien allemand sur l'année 2010/2011 (planche 12), les énergies intermittentes portent bien leur nom.

À partir des chroniques de disponibilité de toutes ces sources, des lois de probabilité ont été tirées. La planche 13 donne la loi de probabilité de disponibilité du parc éolien en 2011 où l'on observe que l'on n'atteint jamais 100% et que la valeur moyenne est d'environ 20%. Cette loi de probabilité dépend du territoire concerné et de sa dimension (des études faites sur ce sujet ont montré que le prétendu foisonnement, existant au niveau d'un grand territoire, n'était pas vérifié).

Pour le solaire on observe les variations journalières de puissance électrique sur le réseau RTE en France en 2012 (planche 14). Pour la source hydraulique, dans MIXOPTIM, trois cas sont considérés : le fil de l'eau qui est considéré comme une énergie fatale, les retenues dans les lacs qui sont pilotées et les stations de pompage (STEP).

Le fait de considérer la disponibilité des sources comme des variables indépendantes peut nous faire manquer des corrélations entre ces variables. Pour éviter cela, MIXOPTIM considère quatre cas de figure avec des lois de probabilité différentes pour la demande et la disponibilité dans ces 4 cas (jour – nuit – été et hiver).

La gestion prioritaire des sources, en France, est basée sur la mise sur le réseau, en premier lieu, des sources fatales (éolien, le solaire, le fil de l'eau hydraulique), les moyens de base et de semi-base viennent ensuite et, si cela est nécessaire, des moyens de pointe sont appelés (voir planche 16).

Dans MIXOPTIM, on modélise cette gestion prioritaire de sources ; un exemple est donné sur la planche 17 où l'on a 4 sources : sources fatales d'abord, puis sources pilotées, sollicitées par ordre de coût variable croissant, dans la limite de leur disponibilité, et jusqu'à satisfaction de la demande.

Question: Comment sont pris en compte les problèmes de transport?

Réponse : MIXOPTIM est un modèle qui considère le territoire comme une plaque cuivre avec aucune limitation.

Pour revenir à la question de départ « combien coûte la satisfaction de la demande électrique ? », examinons la planche 18 :

On divise les coûts pour chaque source en deux composantes : une composante « coût fixe », proportionnelle à la puissance installée, et à déboursier que la source soit utilisée ou non; et une composante « coût variable », proportionnelle à la puissance effectivement utilisée. On obtient ainsi un coût horaire en euros/heure selon la formule :

ANCRE

Coûts pour chaque source

$$C_i = F_i \cdot \alpha_i + M_i \cdot P_i$$

ϵ/h \nearrow C_i \nearrow $F_i \cdot \alpha_i$ \nearrow $M_i \cdot P_i$

Coût fixe (amortissement d'investissement, ... y.c. quote part du coût du réseau) ($\epsilon \cdot MW^{-1} \cdot h^{-1}$) \nearrow Coût variable (combustible, ...) (ϵ/MWh)

Puissance installée (MW) \nearrow Puissance produite (MW)

18

Quels **coûts** prendre pour chaque source ? La planche 19 donne les valeurs retenues dans MIXOPTIM, pour les coûts fixes (F) et les coûts variables (M) en euros/MWh ; ils proviennent d'un rapport OCDE/NEA de 2015 (*Projected costs of generating electricity*). Deux cas ont été retenus pour le nucléaire, GEN II et GEN III car ils diffèrent significativement pour la partie F, l'investissement du premier étant amorti. Les coûts pour le solaire et l'éolien doivent faire l'objet de mises à jour car les coûts évoluent rapidement.

La même démarche, que celle réalisée pour les coûts, est faite pour les **émissions de CO₂** produites par le parc considéré. On distingue deux productions de CO₂, une part fixe qui correspond à la fabrication/construction de la source et une part variable pour son exploitation. Sur la planche 20 les valeurs retenues dans MIXOPTIM sont données.

Les échanges extraterritoriaux (**import / export**) sont aussi modélisés dans MIXOPTIM comme obéissant à un mécanisme boursier. Si on a besoin de puissance et qu'il revient moins cher de l'importer que de la produire sur place, on importe ; si on a de la puissance disponible, et qu'on peut la produire à bon marché et la vendre cher, on exporte.

- L'importation : est une source considérée comme les autres, caractérisée par un coût fixe nul, et un coût variable fixé par mécanisme d'offre et de demande ci-dessus (MIXOPTIM considère ce prix comme une variable aléatoire). La disponibilité de la source est limitée par les capacités d'interconnexion du territoire.
- L'exportation : MIXOPTIM suppose un prix du MWh exporté. Toutes les sources dont le coût variable est inférieur à ce prix produisent, dans la limite de leur disponibilité. On exporte le surplus (dans les limites des capacités d'interconnexion du territoire), et on comptabilise les gains ainsi réalisés.

La planche 23 affiche une carte des échanges contractuels transfrontaliers en 2012. On constate que la France est globalement exportatrice, mais importatrice vis à vis de l'Allemagne.

Que produit MIXOPTIM ?

MIXOPTIM **calcule** les coefficients d'utilisation des sources, Kp_i (contrairement à la plupart des autres outils d'évaluation des MIX, qui les **supposent**). C'est la valeur moyenne des puissances produites par chaque source ou encore la valeur moyenne des x_i affichés plus haut, dans la formule page 4.

$$Kp_i = \frac{\bar{P}_i}{\alpha_i} = \bar{x}_i$$

In fine MIXOPTIM calcule 4 indicateurs de performance du MIX :

- **un indicateur économique**, c'est la valeur moyenne du coût horaire rapporté à la valeur moyenne de la demande ; il s'exprime en euro/MWh.
- **Un indicateur climatique** c'est la valeur moyenne du CO₂ produit toujours rapporté à la valeur moyenne de la demande ; il s'exprime en tCO₂/MWh.
- **Un indicateur de sécurité d'approvisionnement** qui est la probabilité de coupure, lorsque le MIX électrique installé sur le territoire serait incapable de satisfaire la demande. Cela arrive ¼ d'heure par an en France soit une probabilité de 10⁻⁵.
- **Un indicateur d'indépendance** : la puissance moyenne importée est calculée, rapportée à la demande moyenne.

La **méthode Monte Carlo** est rappelée :

- On tire au hasard les variables aléatoires que sont la demande D(t) et la disponibilité Xi(t) de chacune des sources (fractions disponibles de la puissance installée des sources)
- On déduit des règles de mobilisation des sources les xi(t) (fractions effectivement utilisées)
- On déduit, pour le cas considéré, le coût horaire (C), la quantité de CO₂ produite, la puissance importée et la probabilité de coupure.

On en déduit ainsi une photo du MIX, on répète l'opération n fois (des milliers) pour en déduire des valeurs moyennes qui soient statistiquement significative sur les 4 indicateurs retenus.

MIXOPTIM est le seul outil de modélisation des MIX qui utilise la méthode Monte Carlo, les autres outils s'appuient sur des modèles à pas horaire qui utilisent une chronique existante de la demande. La planche 27 présente une comparaison des deux approches qui sont finalement très complémentaires.

MIXOPTIM calcule une situation (un état de la demande et de la disponibilité des sources) sans tenir compte, ni du passé, ni du futur. Or, on sait que l'historique joue un rôle dans la mobilisation des sources. C'est un désavantage des simulations Monte-Carlo par rapport aux modèles à pas horaire, qui dessinent une chronique de la demande et de la mobilisation des sources.

L'avantage du MC, c'est qu'il permet d'explorer tout l'espace des phases (l'ensemble des états possibles de la demande et de la disponibilité des sources), et pas seulement un chemin parmi d'autres dans cet espace comme le font les modèles à pas horaire. Les situations rares sont mieux calculées.

MIXOPTIM est outil prédictif et il doit être validé, pour cela on a pris le MIX français en 2012 dont on connaît les résultats observés.

Ces éléments ont été confrontés avec les valeurs calculées par MIXOPTIM (voir planche 28). Les performances du MIX français actuel calculées par MIXOPTIM sont assez proches de celles observées, sauf pour l'import-export (mais cela s'explique bien par la méthode sommaire utilisée pour modéliser ces échanges). Ici il faut signaler que les modèles à pas horaire ne prennent pas en compte l'import / export. L'outil a aussi été validé sur le MIW allemand avec des résultats très satisfaisants, ce qui a donné une grande confiance dans son utilisation.

On a observé qu'il y avait une influence mutuelle entre les sources ; plus on met d'énergies fatales et intermittentes dans le MIX, plus le coefficient d'utilisation des autres sources décroît (voir sur la planche 29, la décroissance du nucléaire au fur et à mesure que la puissance éolienne augmente), ce qui est le cas en Allemagne aujourd'hui.

MIXOPTIM a aussi été validé sur un autre type de valeurs observables ; les coefficients d'utilisation des sources (Kp) pour le MIX français 2012. Les résultats de cette confrontation sont donnés sur la planche 30 et les valeurs calculées par MIXOPTIM sont tout à fait comparables à celles observées.

Le logiciel de MIXOPTIM est en accès libre sur Internet en suivant ce lien : <http://app.mixoptim.org>

La planche 31 montre l'exemple d'un MIX français de 2015 à partir duquel on a fait l'exercice de supprimer 1,6 GW de nucléaire (par exemple fermeture de Fessenheim), d'ajouter 6,1 GW* d'éolien ou 11,6 GW* de solaire. Les résultats sont parlants, avec l'introduction des renouvelables, les coûts et le CO₂ augmentent ainsi que la probabilité de coupure, l'import ne bouge que très peu.

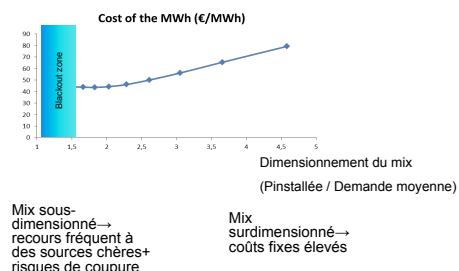
**Puissance installée nécessaire, compte tenu du coefficient d'utilisation, pour compenser les 1,6 GW de nucléaire.*

La dimension optimale du MIX est représentée sur la planche ci-après. Il s'agit ici du cas français.

À droite du diagramme, le MIX est surdimensionné, le MWh est cher car on paye des coûts fixes élevés. À gauche du diagramme, le MIX est sous dimensionné, le coût du MWh tend vers une constante quand le parc fonctionne au max de sa disponibilité et que les interconnexions sont saturées. À l'extrême gauche, le parc ne suffit plus à satisfaire la demande, et on a des coupures d'alimentation. L'optimum du dimensionnement du MIX est autour de la valeur 2, soit une puissance installée double de la demande moyenne. En France nous sommes à 2,3.



La dimension optimale du mix



L'Allemagne est probablement autour de 3 car ils ont une forte puissance installée d'EnR.

Gestion de l'intermittence

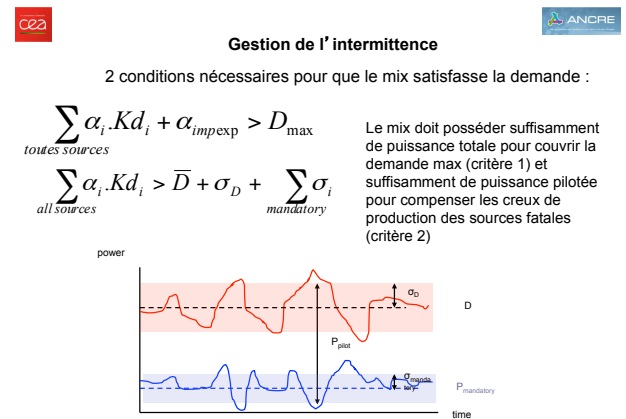
Les MIXs à forte proportion de renouvelables posent question :

- Le mix considéré sera-t-il capable de suivre les fluctuations de la charge ?
- De combien de puissance pilotée aura-t-on besoin en backup ?
- Est-il intéressant d'augmenter l'agilité des sources pilotées pour suivre la charge, comme le nucléaire ou le gaz ? De développer l'interconnexion entre territoires ? D'effacer les pics de demande ? De (dé)stocker l'électricité ? ?

Pour répondre à ces questions, MIXOPTIM a été doté de critères de viabilité d'un MIX, autrement dit de critères d'aptitude d'un MIX à suivre les fluctuations de charge. Pour cela le MIX doit satisfaire à deux conditions :

- Le MIX doit posséder suffisamment de puissance totale pour couvrir la demande max (**critère 1**). Voir la première équation ci-dessous.
- Le MIX doit posséder suffisamment de puissance pilotée pour compenser les creux de production des sources fatales (**critère 2**). Voir la deuxième équation ci-dessous ainsi que les courbes représentatives de la demande en rouge et des fluctuations de la puissance fatale faisant apparaître un écart-type entre le pic de la demande et le creux de production. Cette deuxième équation exprime que la puissance que l'on peut espérer tirer de toutes les sources doit être supérieure à la demande moyenne plus l'écart-type de la demande, plus la somme des écarts-

type de production des sources fatales



La planche 35 donne des chiffres pour les écarts-type des fluctuations. L'amplitude des fluctuations de la demande et des productions éolienne et solaire est évaluée ici pour une demande française moyenne de 57 GW et pour un parc éolien de 6500 MW et solaire de 2500 MW installés (France 2012). Les chiffres du tableau sont directement calculés à partir des chroniques RTE.

On observe que l'écart-type du solaire (0,58) est supérieur à la production moyenne (0,30) ; cela veut dire que si l'on ajoute du solaire dans le MIX on dégrade le deuxième critère qui est la robustesse du MIX, ce qui n'est pas le cas pour l'éolien.

Dans la gestion de l'intermittence on doit tenir compte des fluctuations subies (celles de la demande ou de la production intermittente) et les compenser par des fluctuations de sources pilotées (suivi de charge). C'est ce qui est représenté sur la planche 36 avec l'équation suivante :

$$D(t) - \sum_{\text{sources fatales}} P_i(t) = \sum_{\text{sources pilotées}} P_i(t)$$

Pour traiter la question de l'intermittence, on passe dans l'espace des fréquences, et on fait une analyse spectrale des fluctuations : on raisonne sur les transformées de Fourier de la demande et de la production des sources, ce qui nous renseigne sur l'amplitude des fluctuations de puissance à la pulsation oméga (à une fréquence donnée).

$$\tilde{D}(\omega) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T D(t) \cdot e^{i\omega \cdot t} \cdot dt$$

Les sources pilotées doivent pouvoir répondre aussi rapidement que les fluctuations de la demande l'exigent. Chaque source pilotée possède une « agilité » qui est caractérisable par une fréquence de réponse. Par exemple pour les réacteurs nucléaires, on peut faire varier leur puissance de 2%/mn et on

peut définir une fréquence de coupure (ou une agilité) qui est donnée par l'expression $\omega_c = \frac{1}{P} \cdot \frac{dP}{dt}$

Pour le nucléaire on obtient une fréquence de coupure de 1h-1. L'exercice a été fait pour les différentes sources ; on peut voir les résultats sur la planche 38 où l'on observe, notamment, la très grande agilité de l'hydraulique.

L'idée, derrière cette approche par les fréquences, a été de construire un critère d'enveloppe des fluctuations subies. Cela a permis, par exemple sur la planche 39 de construire le spectre de la demande sur lequel on voit des pics très marqués à la fréquence diurne et demi-diurne ainsi qu'un pic à la fréquence hebdomadaire et, moins évident, une fréquence saisonnière.

La même chose a été faite avec la production éolienne (voir planche 40), dont le spectre est beaucoup plus continu mais sur lequel on peut observer des fréquences diurne et demi-diurne. Pour le solaire la composante périodique est très évidente (voir planche 41).

On définit maintenant pour chaque source une fonction de réponse qui délimite le domaine fréquence-puissance qui lui est accessible (voir planche 42).

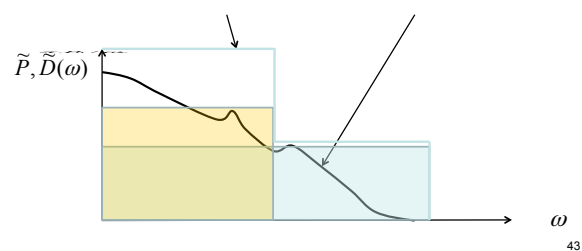
Ce domaine est construit pour vérifier la condition suivante : la somme de toutes les fonctions de réponse de toutes les sources pilotées doit envelopper le spectre de toutes les fluctuations subies ; **c'est le troisième critère de viabilité du MIX**. Le mix doit posséder suffisamment de sources pilotables agiles pour couvrir les fluctuations de puissance subies à toutes les fréquences (voir planche ci-contre). Évidemment il faut des chiffres pour vérifier ce critère. L'amplitude des fluctuations peut être calculée à partir de la transformée de Fourier des chroniques de la demande et des productions éoliennes et solaires.



Gestion de l'intermittence et agilité des sources

Critère 3 : le mix doit posséder suffisamment de sources pilotables agiles pour couvrir les fluctuations de puissance subie à toutes les fréquences

$$\forall \omega, \sum_{\text{controlled}} \alpha_i \cdot K d_i \cdot c(\omega_{ci}) > 2\tilde{D}(\omega) + 2 \sum_{\text{mandatory}} \tilde{P}_i(\omega)$$



La planche 44 donne les valeurs de ces amplitudes à 4 fréquences seulement (saisonnière, hebdomadaire, diurne et semi-diurne). L'amplitude des fluctuations de la demande et des productions éolienne et solaire est évaluée ici pour une demande française moyenne de 57 GW et pour un parc éolien de 6500 MW et solaire de 2500 MW installés (France 2012). Les chiffres du tableau sont directement lus comme la hauteur des pics de la transformée de Fourier.

Ensuite l'exercice s'est poursuivi en jugeant de l'aptitude d'un MIX à suivre la charge et ses fluctuations en anamorphosant* le MIX français. On écrit les inégalités qui disent l'aptitude ou l'inaptitude du MIX aux quatre fréquences et on les applique à des MIXs de composition variable en utilisant les amplitudes de fluctuations caractéristiques des sources fatales du tableau de la planche 44. Et cette démarche permet de définir les limites de la zone d'aptitude de MIXs de composition variée.

**anamorphose : homothétie multidimensionnelle avec des facteurs différents dans les différentes dimensions.*

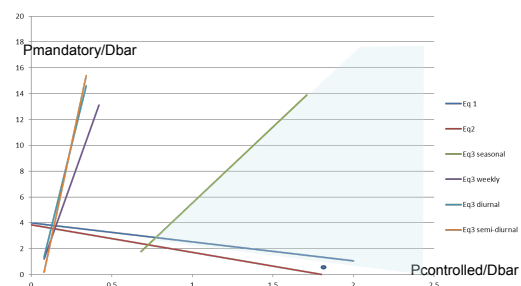
Le résultat de cette approche donne le résultat représenté sur la planche 46 ; soit un diagramme avec, en abscisse, la puissance pilotée sur la demande moyenne et, en ordonnée, la puissance fatale sur la demande moyenne.

Le **critère 1** (page 9) fondé sur D_{max} est la ligne bleue, le **critère 2** (page 9) fondé sur les écarts-type est la ligne rouge et le **critère 3**, que nous venons de voir, appliqué aux 4 fréquences, donne les 4 autres droites. La zone apte, qui satisfait aux trois critères est la zone bleutée ; c'est la fréquence saisonnière (droite verte) qui limite la zone d'aptitude.

En dessous de la droite bleue, on est sous dimensionné pour suivre la charge et, pour une puissance pilotée donnée, si on augmente la puissance fatale, on sort de la zone d'aptitude et on ne réussit pas à suivre les fluctuations. Le point noir représente le MIX français en 2012. Il est au-dessous de la ligne bleue et serait donc dans la zone d'inaptitude, mais cela est dû au fait que l'on n'a pas tenu compte ici de l'interconnexion et du stockage, qui vont améliorer les choses, comme nous allons le voir plus loin. À ces contraintes physiques, liées à l'intermittence, il faut ajouter les contraintes économiques vues plus haut, que MIXOPTIM

peut calculer : coûts, émissions de CO_2 , indépendance et durée de coupure.

La zone d'aptitude du mix



46

Si on tient compte de tous ces indicateurs de performances, on obtient les 4 diagrammes de la planche 47, où les zones hachurées correspondent à des MIXs inapte à suivre la charge.

Le même exercice est fait en tenant compte de l'import / export et cela donne les diagrammes de la planche 48.

Pour améliorer la position des MIXs dans la zone d'aptitude, nous disposons de certaines possibilités de réglage comme l'interconnexion, l'effacement ou le stockage / déstockage.

Regardons successivement les mérites de ces réglages :

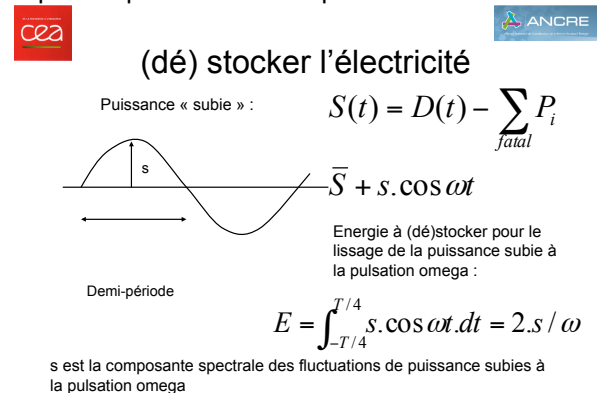
- **L'interconnexion** : la planche 49 affiche le diagramme de gauche sans interconnexion et celui de droite avec interconnexion où la zone d'aptitude s'élargit. Sans interconnexion le MIX français serait inapte à suivre la charge. Les contraintes de viabilité d'un MIX sont plus difficiles à satisfaire pour un petit territoire. Voir les commentaires de la planche 50 qui traite de cette question des petits territoires et notamment du fait que l'autonomie électrique de petits territoires obligera à installer de la puissance, ce qui aura un coût. La planche 51 propose de remplacer du nucléaire par du solaire ou de l'éolien. Avec l'interconnexion, le mix français satisfait juste le critère de viabilité. Toute réduction du parc

nucléaire devra s'accompagner d'une augmentation de puissance installée en éolien ou solaire car les autres sources renouvelables comme l'hydraulique ne sont pas expansibles. Pour remplacer 1GW de puissance nucléaire installée tout en restant dans la zone apte, il faut installer 3.8 GW d'éolien, ou encore 7.3 GW de solaire.

- La planche 52 présente les bénéfices de **l'effacement** ; le diagramme de gauche est celui sans effacement. Si l'on suppose un effacement parfait (une demande constante et un écart-type nul), la partie du diagramme viable est fortement augmentée, les critères 1 et 2 sont fortement relaxés. Dans un tel cas on peut même réduire le parc des sources pilotées de 1,8 fois la demande moyenne à 1 fois la demande moyenne. On peut ajouter les remarques suivantes :
 - Augmenter l'agilité des sources pilotées n'améliore pas la robustesse du MIX français, qui contient déjà bien assez de sources pilotées agiles (hydraulique) pour suivre les fluctuations de charge à haute fréquence.
 - La vraie contrainte vient des fluctuations à basse fréquence (l'intermittence de la disponibilité des renouvelables sur des périodes longues, ex : panne anticyclonique). Comment gérer ça ? Avec du (dé)stockage ?
- Les planches 54 à 62 abordent la question du **(dé)stockage**. Introduire du (dé)stockage d'électricité dans le mix équivaut à lisser les fluctuations de la demande et des sources fatales : le lissage efface la pointe.

On voit que la composante spectrale des fluctuations subies à la pulsation oméga intervient dans le calcul de l'énergie à (dé)stocker. Pour l'estimer, on fait une transformée de Fourier de la puissance subie. Le (dé)stockage de l'énergie permet de lisser la puissance subie. En pratique, tant qu'on a peu d'énergies fatales dans le mix, les fluctuations de la puissance subie sont dominées par les fluctuations de la demande : $S(t)$ est proche de $D(t)$. C'est le cas du mix français actuel. C'est ce qui autorise à penser que le (dé)stockage de l'énergie équivaut plutôt à lisser la demande. Avec beaucoup d'énergies fatales fluctuantes

dans le mix, il faudrait au contraire penser que le (dé)stockage de l'énergie équivaut plutôt à lisser la production.



Le (dé)stockage introduit un filtrage passe-bas dans les fluctuations subies. Plus on veut lisser fort (c'est-à-dire à basse fréquence), plus il faut pouvoir (dé)stocker d'énergie. Pour pouvoir lisser les fluctuations subies $S(t)$ à la pulsation ω , il faut disposer d'une énergie (dé)stockable

égale à : $4 \cdot \tilde{S}(\omega) / \omega$. Sur la planche 57 on peut relever sur le diagramme affiché que pour lisser la demande française à la pulsation oméga = $1h^{-1}$ il faut disposer d'une énergie (dé)stockable de l'ordre de 2,4 GWh. Pour les fluctuations horaires, cela est à notre portée car

nous disposons d'environ 70 GWh avec les STEP. En revanche, pour les pulsations saisonnières, c'est gigantesque car nous devrions disposer d'une dizaine de TWh soit 1000 fois plus. En conclusion, le (dé)stockage est efficace à haute fréquence mais il ne permet pas de lisser les fluctuations saisonnières (voir planche 61).

Les technologies de stockage sont rappelées sur la planche 62, mais la seule technologie de stockage de masse actuellement disponible est la STEP.

Dans tout ce qui a été montré, on a considéré que les sources éoliennes et solaires étaient fatales ; c'est le cas en France, mais ce n'est pas inéluctable. Si toutes les sources renouvelables deviennent pilotées, il n'y a plus de limites physiques à leur introduction dans le mix. On voit dans ce cas sur la planche 63 que le diagramme d'aptitude change complètement d'allure (à gauche les sources sont fatales à droite elles sont pilotées à la baisse). Cela rend le MIX plus robuste mais les limites économiques demeurent.

Sur la planche 65, on pose la question : 100% de renouvelables est-ce faisable ? L'exercice a été fait en utilisant 5 variables qui caractérisent ce type de MIX :

- La puissance éolienne / puissance moyenne.
- La puissance solaire / puissance moyenne.
- La puissance d'interconnexion / puissance moyenne
- L'écart-type de la demande / puissance moyenne, qui caractérise l'effacement.
- L'énergie stockable – déstockable / puissance moyenne
-

Partant du MIX français on supprime tout ce qui est non renouvelable (le nucléaire, le charbon et le gaz). Évidemment on est tombé sur un MIX inapte, mais en jouant sur les trois réglages possible (interconnexion, effacement et (dé)stockage) on a cherché à quelles conditions on peut avoir un MIX apte. Le résultat est montré sur le diagramme de la planche 65. C'est le petit triangle bleu qui correspond à la zone d'aptitude aux conditions suivantes :

- Un parc éolien dimensionné à 6 fois la demande moyenne, soit 360 GW d'éolien installé.
- 0 GW en solaire. L'adjonction de solaire dégrade la viabilité du MIX.
- Une puissance interconnectée = 0,65 fois la demande moyenne.
- Un effacement considérable mais pas total.
- Une énergie stockable / déstockable correspondant à 36 heures de la consommation moyenne française (alors que nous sommes à 1 heure actuellement). En supposant l'hydraulique stable à son niveau actuel.

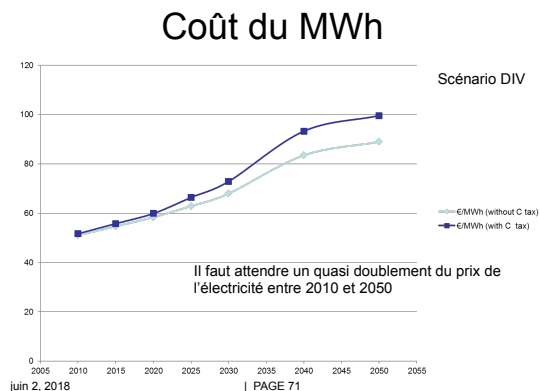
Ce résultat se passe de commentaire. Donc un Mix avec 100% de renouvelables n'est pas possible, du moins avec les technologies actuelles. Il est peut-être possible au Québec ou en Norvège grâce à leur hydraulique ou encore sous les tropiques mais avec un stockage diurne.

Dans le cadre de l'ANCRE, MIXOPTIM a été utilisé pour dire combien coûtaient différents scénarios énergétiques. Ces éléments sont présentés sur les planches 67 à 71.

Un scénario dessine une trajectoire : consommation, puissances installées en fonction du temps. MIXOPTIM calcule les performances du MIX en fonction du temps, connaissant les coûts pour chaque source.

Problème : les coûts ne sauraient être considérés constants : ils dépendent du temps. Les coûts « fixes » (amortissement de l'investissement) dépendent en particulier de l'historique de construction du parc.

Le résultat de ces études sur le coût du MWh est donné sur la planche 71 où l'on observe que, quoi qu'on fasse, que l'on introduise une taxe carbone ou pas, le prix du MWh double pratiquement entre aujourd'hui et 2050.



Pour les émissions de CO₂, la planche 72 affiche l'évolution calculée par MIXOPTIM : on observe une diminution, mais elle n'est pas à la hauteur des attentes.

Les principales conclusions tirées par l'orateur sont les suivantes :

- La transition énergétique va coûter cher (doublement du coût de l'électricité). Au coût des renouvelables, il faut ajouter celui de la gestion de l'intermittence.
- Il faudra des investissements importants, dans des sources chères.
- Le gain en CO₂ est mince.
- Il faudra garder un minimum de sources pilotées.

Bernard BONIN est vivement remercié pour la qualité de son exposé.

2. Réunion de l'après-midi

2.1. Observations sur le précédent compte rendu.

Pas d'observation.

2.2. Stockage et archivage des comptes rendus et documents du GR 21 : quelle solution ?

Devant les difficultés rencontrées dans l'utilisation du site de « Dropbox » pour le stockage de nos documents, le groupe examine différentes autres solutions présentées par Émilio RAIMONDO. Parmi celles-ci, il est décidé d'instruire les deux pistes suivantes :

- Réalisation d'un petit site Internet sur lequel nous pourrions archiver nos documents, d'une façon sécurisée, que les membres du GR 21 pourraient consulter et télécharger (en lecture seule).
- S'abonner au site « Dropbox » professionnel pour un montant de 300 euros par an environ.

Maurice MAZIÈRE et Émilio RAIMONDO instruisent ces deux pistes et reviendront sur le sujet à la rentrée de septembre.

2.3. Les voix du nucléaire :

Jacques BLANC et Bernard LENAIL présentent la nouvelle association « Les voix du nucléaire » qui est née récemment. Derrière cette association nous avons une personne anciennement d'AREVA, qui en est la Présidente et quelques retraités. Le bureau de l'association est constitué de Myrto TRIPATHI, Nathalie GUILLAUME, Marie-Hélène AUTISSIER, Claude JAOUEN et Olivier BARD.

Voici un extrait de ce qui est dit en introduction du document annonçant cette naissance :

« VOIX DU NUCLEAIRE (au pluriel) est une association d'employés et sympathisants bénévoles de la filière nucléaire française, indépendante de toute attache économique, institutionnelle, syndicale ou politique.

Elle a été créée en mars 2018 par et pour des employés qui, à titre individuel, souhaitent :

- *Se réapproprier la fierté d'être les acteurs d'une filière scientifique et industrielle d'exception*
- *Participer au rétablissement des faits la concernant. »*

Le document de présentation est joint au compte rendu en PJ 2 ainsi qu'un bulletin d'adhésion en PJ 3.

L'association a besoin de trouver des personnes du GR 21 qui accepteraient d'apporter une aide à temps partiel bien sûr.

2.4. Informations générales et questions d'actualité

Les informations suivantes sont communiquées par Maurice MAZIÈRE.

- Annonce d'un colloque de SLC le 16 juin 2018, voir PJ 4.
- Annonce du Forum du développement durable au Palais du Luxembourg. « Nucléaire : un projet soutenable pour demain ? », le 22 juin 2018, voir PJ 5.
- Articles d'actualité sur les EnR :
 - Un rapport de l'IRENA sur les nouveaux emplois dans les EnR, voir PJ 6.
 - Bilan de l'éolien en Europe en 2017, voir PJ 7.
 - Edf acquiert un gros projet de parc éolien en mer en Écosse, voir PJ 8.
 - Par Michel GAY,
 - « Électricité : produire local, est-ce conforme à l'intérêt général ? », voir PJ 9
 - Traduction par Michel GAY d'un article « Si le solaire et le vent sont si bon marché, pourquoi rendent-ils l'électricité si chère ? », voir PJ 10.
 - Éditorial de l'IFRI, « Davantage d'EnR en Europe ? », voir PJ 11.
- Lettre de géopolitique de l'électricité de Lionel TACCOEN : Énergie et climat ; le doute sur les politiques européennes, voir PJ 12.
- Nucléaire International :
 - Lancement de la première centrale nucléaire en Turquie par les Russes, voir PJ 13.
 - Une centrale nucléaire flottante en route vers l'extrême orient russe, voir PJ 14.
- Informations et actualités sur la PPE; aller voir sur le site la marche à suivre pour rédiger une contribution. Ci-après quelques contributions, les principaux cahiers d'acteurs et des commentaires sur ces cahiers d'acteurs
 - Le cahier d'acteur d'EdF, voir PJ 15.
 - Cahier d'acteur de l'ADEME, voir PJ 16.
 - Les remarques de Jean-Pierre PERVÈS sur le cahier d'acteur de l'ADEME, voir PJ 17.
 - Le cahier d'acteur de France Nature et Environnement, voir PJ 18.
 - Cahier d'acteur de SLC, voir PJ 19.
 - Cahier d'acteur du CEA, voir PJ 20.
 - Contribution d'un groupe indépendant de réflexion sur l'énergie, voir PJ 21
 - Quel nucléaire pour le futur, les réponses de la SFEN au débat sur la PPE, voir PJ 22.
- Quelques notes et études de type pédagogique
 - Qu'appelle-t-on le « Power to gas ? », voir PJ 23.
 - L'hydroélectricité en 2018, voir PJ 24.
 - Comment sont répartis les réacteurs nucléaires dans l'Union Européenne ? Voir PJ 25
 - Le stockage de l'électricité par Georges SAPY, voir PJ 26.
- D'autres articles sur des sujets divers :
 - Quelle évolution pour les concessions hydroélectriques en France ? Par Bernard TARDIEU, voir PJ 27.
 - Article de Jacques PERCEBOIS, « Faut-il arrêter l'ARENH ? », voir PJ 28.

- Le blog de Sylvestre HUET, « En avril le jus de l'eau abonde », voir PJ 29.
- Rénovation énergétique des bâtiments : Nicolas HULOT veut un « choc de confiance », voir PJ 30.
- Discours de Dominique MINIÈRE devant la commission de l'assemblée nationale sur la sécurité dans les INB, voir PJ 31.
- Renouvellement du parc nucléaire français, par Hervé NIFENECKER, voir PJ 32.
- Enfin, différents articles publiés par Enerpresse ainsi que 2 numéros de « Vivre EdF, l'hebdo », tous regroupés dans le fichier, « revue de presse » PJ 33.

2.5. Tour de table.

- **Françoise DUTHEIL** : A posé une question sur la RT 2012 dans le cadre de la PPE. Elle attend une réponse.
Sinon, elle nous demande si l'accord avec la Russie (collaboration avec ROSATOM) est quelque chose de positif ?
Elle considère que la RGN publie de bons articles mais il est dommage qu'il n'y ait pas de résumés correspondant à ces articles qui pourraient être utilisés pour être transférés plus largement auprès de son cercle de diffusion.
- **Bernard LEROUGE** souhaiterait avoir à chaque réunion, une information sur l'avancement des différents chantiers EPR de France, Chine et Finlande. Maurice MAZIÈRE retient l'idée.

Cette intervention a été l'occasion de rappeler les problèmes nouveaux sur la qualité des soudures du circuit vapeur de l'EPR de FLA III, qui risquent d'être à nouveau la cause de retards significatifs.

il tient à signaler qu'il a trouvé très intéressant la RGN du mois de janvier, en particulier un article sur l'Allemagne. Il en profite pour nous expliquer comment se passe la fourniture d'électricité en Allemagne où elle est plus décentralisée et combine un MIX avec la production de chaleur.

La dernière production de Lionel TACCOEN évoque l'augmentation des émissions de CO₂ d'une année sur l'autre. Où trouve-t-on ce chiffre officiel ? Autre élément d'étonnement, les média ne relayent pas cette information qui n'est pas politiquement correcte ! Il a donc rédigé un article sur ce sujet à l'AFIS (Association Française pour l'Information Scientifique) mais il aimerait y mettre la source de l'information*.

Par ailleurs, ne pourrions-nous pas proposer des articles à l'AFIS ? Maurice MAZIÈRE va regarder cette question avec l'AFIS.

Note : dans la RGN hebdo de cette semaine nous trouvons l'information sur l'augmentation des émissions de CO₂.

**Jean-Michel GAMA qui connaît cette source a communiqué le lien hors réunion : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone>*

- **Jean-Paul CROCHON** soulève la question des fabrications du matériel de contrôle commande TELEPERM, en principe aujourd'hui propriété de Framatome (par l'apport de KWU chez AREVA

en son temps) et dont les fabrications seraient délocalisées en Russie, ce dernier point reste à vérifier.

- **Philippe RAIMBEAULT** évoque une conférence qui a été organisée par le GR des Yvelines à Versailles sur le renouveau de l'énergie nucléaire au Royaume Uni. Le conférencier était Pierre Yves CORDIER, conseiller nucléaire de l'Ambassade de France à Londres. Il apparaît que l'acceptation du public outre-manche est meilleure qu'en France. Il est suggéré d'inviter Pierre Yves CORDIER à l'une de nos réunions.
- **Jacques BLANC** soulève deux sujets qui font ou refont surface ces temps-ci :
 - Le premier est la problématique des métaux rares, indispensables mais d'origine chinoise pour l'instant ; on s'interroge sur leur disponibilité notamment.
 - Le deuxième sujet est l'hydrogène, nous l'avons abordé voici quelques années, on peut se demander s'il ne faudrait pas y revenir.
- **Bruno COMBY** donne diverses nouvelles et informations :
 - Dans le cadre de l'AEPN il signale une rencontre récente avec Myrto TRIPATHI (Présidente des « Voix du Nucléaire » évoquée plus haut).
 - Aux USA un nouveau groupe se crée « Climate Emergency Coalition, California», ils émettent une pétition pour signature et préparent aussi une lettre destinée à la banque mondiale. L'AEPN est associée à ces actions.
 - Il nous donne ensuite des informations intéressantes sur son expérience personnelle avec sa voiture électrique et sa maison équipée de panneaux photovoltaïques. Il en retient que le prix des panneaux baisse significativement si bien que le temps de retour sur investissement dans son cas est de 6 ans. Pour les batteries de voiture on observe une nette amélioration de l'autonomie.
- **Jean-Michel GAMA** aborde un point technique à propos des réseaux à courant continu dont on entend parler dans la presse, il serait intéressant de faire un point sur cette question. Sur les cahiers d'acteur de la PPE, il a déjà émis sa contribution dont nous avons eu copie ainsi que la fédération syndicale CGT. Le vendredi 15 juin au soir au centre culturel de Bagnols sur Cèze, il ouvre un débat sur « les énergies ». Enfin il a été contacté par un Indien du Rajasthan qui habite Palaiseau qui est patron d'un institut (SDMI, Sustainable Development Management Institute) ; il souhaite que des gens compétents puissent leur communiquer des éléments leur permettant de préparer une conférence en Inde à la rentrée.
- **Francis SORIN** aborde deux points :
 - La RGN procède à une évolution éditoriale avec des articles plus ouverts cela semble apprécié, une nouvelle maquette est envisagée avec plus d'accessibilité en vue d'avoir quelque chose de plus agréable à feuilleter.
 - Il a fait l'objet d'une qualification de « Valet du grand capital » sur « Youtube » de la part de l'association « pièce et main-d'œuvre », car il a été invité dans une librairie du 14^e pour présenter le livre de Nicole COLLALIDA et Anne PETIER, « Le nucléaire vu de

l'intérieur ». Livre intéressant avec les témoignages de diverses personnes.

- **Claude ACKET** a sorti son livre « Le nucléaire durable » est édité (voir précédente information », Il est destiné à tous publics, l'éditeur est LGO, on le trouve sur Amazon.
Sinon, à la SFEN Lyon un débat public labellisé a été organisé dans le cadre de la PPE, qui a réuni 200 à 300 personnes. Il doit faire un compte rendu et répondre à des questions ; ce document sera joint au débat.
- **Gilbert NAUDET** doit faire une conférence en Bourgogne en septembre, sur le fonctionnement des réacteurs nucléaire et les questions de sûreté. Il est preneur de quelques planches de base sur le sujet (Émilio lui fera parvenir des planches sur l'EPR préparées par AREVA à l'époque).
- Jean-François SORNEIN a fait une présentation en Bourgogne sur le thème «Fukushima 7 ans après ». Dans ce contexte il a lu un livre témoignage du directeur de la centrale de Fukushima. Ce témoignage est assez poignant : il livre la situation à laquelle il a dû faire face sans électricité, sans liaison, avec une équipe de crise à gérer etc... Le titre c'est « Fukushima, le directeur parle ».

2.6. Examen du programme pour les prochaines journées.

- Le 21 Juin nous aurons un exposé sur les risques par Jean-Marc CAVEDON du CEA.
- Une nouvelle date doit toujours être fixée avec Philippe MONTARNAL, attaché nucléaire en Inde pour présenter la situation de l'énergie dans ce pays, comme cela avait été envisagé puis annulé.
- Le contact avec la CRE grâce à JM. GAMA a été positif, un orateur est recherché et nous sera communiqué prochainement.
- L'attaché nucléaire en Amérique du sud au Brésil a été également envisagé. Il avait fait une conférence à la SFEN PACA, qu'il pourrait nous refaire.
- EdF a été contacté pour le sujet sur le démantèlement des tranches, cela devrait déboucher à terme.
- Autres sujets déjà évoqués :
 - La RT 2012 par l'UFE (Union Française d'Electricité), sujet proposé par Jean-Pierre PERVÈS.
 - Un sujet proposé par B. LEROUGE sur l'émergence des cancers en liaison avec l'énergie
 - L'éolien off-shore, difficulté à trouver quelqu'un chez GE, anciennement ALSTOM.
 - Tchernobyl, 30 ans après ; se rapprocher de l'IRSN.
 - Le projet RJH (réacteur Jules Horowitz), proposé par Jean-Paul CROCHON.
 - Politique post-accidentelle et évacuation des zones peuplées, plan d'intervention.

Prochaine réunion le 31 mai 2018 à 10h30.

Conférence sur les risques par Jean-Marc CAVEDON du CEA