

ÉNONCÉ DE TP

Intermittence de la production et de la consommation de puissance

— ATTENTION —

Pour accéder à la salle de TP vous devrez présenter le travail correspondant aux questions posées à la fin de la subsection 1.

pour l'année prochaine :

- modifier fichiers horodatage en heure directement (pas de demie heure)
- sur jupyterhub de l'ufr le calcul des corrélations est trop long. voir si la réduction au dessus suffit ou s'il faut réduire plus
- vérifier que les corrélations sont normalisées correctement. J'ai l'impression qu'il y a un problème dans les fichiers de données
- refaire tout le TP pour vérifier que les changements sont ok

Le compte rendu de ce TP devra être rendu sous forme numérique, en **pdf**, édité à l'aide d'un outil tel que *Latex*, *Texmacs* ou *LibreOffice*. Les figures seront commentées et choisies selon leur pertinence. **Votre nom** et le **titre du TP** devront apparaître dans le titre de votre compte rendu. Envoyer votre rapport à l'adresse eric.herbert@u-paris.fr.

Vous allez générer dans ce TP un grand nombre de figures. N'oubliez pas de toujours les nommer de manière à pouvoir les retrouver, inscrire les axes et dimensions. Enfin vous pouvez (devez) opérer une sélection pour votre rapport.

1 Avant la séance

L'intermittence est une notion très précise en physique, qui signifie que l'on observe pour une variable aléatoire des fluctuations de grande amplitude dont la fréquence s'écarte de celle attendue pour une loi normale. Par exemple la distribution des incréments de vitesse dans un écoulement turbulent¹ ne suit pas exactement la loi normale. Cependant dans le débat lié à la production de puissance, et notamment dans la comparaison entre les énergies de flux (éolien, photovoltaïque, appelé PV dans la suite) et les énergies de stock (nucléaire, fossile) dans leur capacité à répondre à une demande de puissance électrique, cette définition n'est pas suffisante. En effet, par exemple, une variation parfaitement prévisible est que le PV ne produira jamais de puissance la nuit, et ne pourra donc jamais satisfaire une demande non nulle, quelle que soit la taille du parc installé. Ainsi, il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques intrinsèques de la production et de la consommation et de leur couplage, et d'identifier les notions suivantes :

- **Variabilité pilotable** (modulation voulue de la puissance produite), prévisible (entretien), non prévisible (accident)

1. On trouvera une abondante littérature sur le sujet à l'aide d'un moteur de recherche. Ce matériau pourra servir à l'introduction de votre rapport

- **Prévisibilité de la production.** La nuit, pas de production PV, qui s’oppose aux fluctuations de la vitesse du vent
- **Fractionnabilité,** c’est à dire la possibilité de n’utiliser qu’une section de la puissance installée (il n’est pas possible d’arrêter une demie tranche de réacteur nucléaire, par contre il est possible de choisir un point de fonctionnement à $P_{max}/2$)

Ces paramètres mènent à une grande confusion. Nous allons essayer dans ce TP de percevoir les caractéristiques des différentes sources de production de puissance électrique et d’en extraire une estimation simple de l’intermittence.

Nous nous appuyerons pour cela sur les données de production et d’échange de puissance électrique produites par RTE le Réseau de Transport Électrique français.

1.1 Récupérer les données et les programmes

Données brutes Remarques sur les données de RTE : **1/** EDF est tenu légalement d’acheter toutes la production électrique des sources PV et éolien, donc la puissance injectées de ces sources dans le réseau est toujours la puissance maximale disponible. **2/** le réseau est toujours équilibré, c’est à dire qu’à chaque instant la production totale est égale à la consommation totale. **3/** les source fossiles, nucléaire et hydraulique étant pilotables, elles s’adaptent à la variation de la consommation.

1. Se rendre sur le site de RTE à l’adresse <https://www.rte-france.com/> puis naviguer vers l’onglet Production d’électricité par filière.²
2. Identifier les différentes sources de puissance, les flux exportés et importés.
3. Comparer qualitativement sur différentes périodes leur série temporelle.
4. Quelles sont les valeurs typiques de production de puissance pour chaque source ?
5. Faire un bilan comparatif des points précédents

Dans la deuxième section, nous travaillerons avec un échantillon des données disponibles sur ce site qui ont été mises en page pour pouvoir être exploitées directement. Elles sont dans le répertoire *DATA*, des du dépôt de ce TP.

Programmes Rendez vous sur la page <https://github.com/ericherbert/TPintermittence> et télécharger l’ensemble du projet (bouton *clone or download*) et extraire les documents de l’archive. Vous y trouverez :

- Le dossier *DATA* contenant les données téléchargées depuis le site de RTE. Ces données vous permettront de réaliser le TP. Vous pouvez également choisir de télécharger des données pour d’autres périodes, il faudra alors procéder à une mise en forme.
- L’énoncé du TP en pdf
- Des programmes *Python* permettant la réalisation de ce TP. Le programme *outils.pdf* contient des fonctions pour calculer la covariance et la corrélation.

Ce TP est prévu pour être effectué sur python. Vous pouvez utiliser le *JupyterHub* de l’UFR vous permettra de travailler via votre explorateur web et sans rien installer sur votre machine.

2. Sinon accessible ici <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-deelectricite-par-filiere>. Un bouton *téléchargement* est disponible en bas de la page.

Vous la trouverez à l'adresse suivante <https://jupy.physique.u-paris.fr/>. Vous devez normalement pouvoir vous y connecter avec vos identifiants ENT.

..

2 Traitement

2.1 Intermittence

Dans une première approche de l'intermittence, nous allons évaluer la capacité des sources de production de puissance à suivre la variation de la consommation. Pour cela nous allons utiliser la notion de corrélation. Pour fixer les idées rapidement, nous allons construire un signal sinusoïdal et calculer son autocorrélation :

```
import numpy as np
sin = np.sin(2*np.pi*np.arange(0,5,0.1))
print(np.correlate(sin,sin))
autocor = np.correlate(sin, sin, 'same') / np.std(sin)
→ / np.std(sin) / len(sin)
```

Faites le plot de `autocor`. Commenter le plot obtenu, la valeur numérique affichée, que nous appelons le coefficient de corrélation r . Si besoin, appuyez vous sur l'aide de la fonction `np.autocor` et de la page Wikipedia correspondante.

Dans la suite on s'intéressera uniquement aux sources de production nucléaire, éolien et PV. L'expression *les 3 sources* s'y réfère.

2.2 Représentations brutes

Après avoir choisi un fichier disponible dans *DATA*. Les fichiers sont régionalisés, sont disponibles l'Occitanie, les Hauts de France et toute la France.

Séries temporelles

1. À l'aide du programme *plot_data.py*, représenter les séries temporelles de la **consommation** journalière et saisonnière (par exemple 3 mois). Ajouter les unités et enregistrer ces figures de manière à pouvoir les retrouver simplement, et faites de même pour les **trois sources**. Vous pourrez commenter les points suivants :
 - (a) Sur les diagrammes annuels, repérer les différentes saisons
 - (b) Sur les diagrammes journaliers, repérer les différentes sections de la journée
2. Extraire les moyennes temporelles $\langle x \rangle$ et écart type σ_x de chacune des sources sur une semaine que vous aurez choisie. Quelles sont les limitations de l'emploi des quantités σ_x , $\langle x \rangle$ et de la variation relative $\sigma_x / \langle x \rangle$, pour les caractériser ?

Distributions À l'aide du programme *plot_distribution.py*, représenter la distribution de la **consommation** et des *3 sources*. Représenter les *densités de probabilité*³ de ces fonctions en vous appuyant sur le paramètre *density* de la fonction histogramme.

3. appelée pdf pour Probability Density Function, définie telle que $\int pdf = 1$

Autocorrélations À l'aide du programme *plot_correlation.py*, représenter l'autocorrélation de la **consommation** et des 3 *sources*. Ajouter les unités, noms des axes et enregistrer les figures. Pouvez vous identifier des motifs periodiques ?

Corrélations Calculer les coefficients de corrélation entre la consommation et C et chacune des trois sources S à l'aide de

```
autocor = np.correlate( C, S ) / np.std(C) / np.std(S) /
    ↪ len(C)
```

conclure sur les capacités respectives de chacune des sources à satisfaire la demande.

Une manière d'améliorer cette capacité est de varier les sources, à la fois géographiquement (agrégation) et techniquement (foisonnement). C'est ce que nous allons voir dans la suite.

2.3 Agrégation

Pour une source de puissance particulière, l'agrégation consiste à étendre la production spatialement pour profiter de conditions climatiques le plus décorréliées possible (cas aléatoire) ou anticorrélées (cas déterministe)

1. Expliquer pourquoi des conditions climatiques décorréliées ou anticorrélées pourraient être avantageuses.
2. À partir du programme *agregation.py* qui utilise des données issues de RTE décrivant la production électrique issues de deux régions, représenter puis additionner les sources électriques PV **ou** éolien.
3. Discuter :
 - (a) Les séries temporelles obtenues. L'agrégation permet elle de diminuer les périodes sans puissance produite ?
 - (b) Calculer le coefficient de corrélation $r = \frac{cov}{\sigma_X \sigma_Y}$ avec X et Y les productions de puissance instantanées des deux régions considérées et la covariance $cov = \langle (X - \langle X \rangle)(Y - \langle Y \rangle) \rangle$.
 - (c) Conclure sur l'agrégation

2.4 Foisonnement

Le foisonnement consiste à multiplier les sources de production de puissance à priori décorréliées pour tendre vers une distribution normale. Il s'agit de s'appuyer sur une conséquence du théorème central limite qui prédit un comportement aléatoire d'une somme de variables elles même aléatoires. La condition étant que les variables soient absolument décorréliées. En vous appuyant sur le programme *foisonnement.py* additionner les sources éolien et PV et représenter la série temporelle correspondante.

1. À partir du programme *foisonnement.py*, additionner les sources de production de puissance électrique PV et éolien d'un espace géographique que l'on précisera
2. Commenter

- (a) Les séries temporelles obtenues. L'agrégation permet-elle de diminuer les périodes sans puissance produite ? La perte de puissance nocturne est-elle atténuée ?
- (b) Calculer le coefficient de corrélation $r = \frac{cov}{\sigma_X \sigma_Y}$ avec X et Y les productions de puissance instantanées des sources considérées.
- (c) Conclure le foisonnement

Une autre manière de pouvoir satisfaire la demande est de disposer d'un stockage. C'est ce que nous allons voir dans la suite.

3 Stockage et Conversion

L'objet de cette section est d'évaluer et de dimensionner les solutions à mettre en oeuvre pour compenser l'intermittence intrinsèque de sources de puissance. On supposera que la puissance requise est toujours fournie et qu'elle correspond à la consommation.

3.1 Stockage

Nous allons dans cette section normaliser la quantité d'énergie produite sur une année par la quantité d'énergie consommée dans cette même année pour ne plus dépendre de la taille du parc de production de puissance.

Les questions suivantes sont à discuter pour les sources PV et éolien.

1. Quantifier E_0^C la totalité de l'énergie consommée dans l'année choisie.
2. Procédez de même pour quantifier les énergies E_0^{PV} et E_0^W produites sur l'année en France.
3. Tracer la série temporelle de la différence des puissances normalisées pour le PV et l'éolien $\delta^{PV}(t) = \frac{P(t)}{E_0^W} - \frac{C(t)}{E_0^C}$ et l'éolien $\delta^W(t) = \frac{P(t)}{E_0^W} - \frac{C(t)}{E_0^C}$.
4. Vérifier que dans les deux cas $\sum_0^{1y} \delta(t) dt$ sur un an est bien nul.
 Vous vous êtes ainsi assuré de produire exactement sur l'année la quantité d'énergie nécessaire à la consommation, sans sur-production ni sous-production. Cependant la synchronisation de la consommation et de la production ne sont pas assurées. Pour cela il faut que consommation et production soient égaux à chaque pas de temps.
 En vous appuyant sur les δ , concluez si c'est bien le cas.
5. Nous allons à présent calculer la taille du stockage nécessaire.
 Tracer la série temporelle de la différence des sommes cumulées $\Delta(t) = \sum \delta(t)$. Δ représente une estimation du stockage nécessaire à chaque pas de temps, en unité de E_0^C .
 Son maximum est le stockage nécessaire. Si $\Delta_{MAX} = 0.5$ alors il faut pouvoir stocker la moitié de la consommation annuelle.
6. En déduire une évaluation du volume de stockage S nécessaire en fraction de la consommation annuelle E_0^C .
7. Question subsidiaire : comment S dépend de la période choisie ?

3.2 Conversion en énergie

Vous allez à présent estimer la quantité d'énergie et le volume correspondant à la quantité S calculée précédemment.

1. Convertir le volume de stockage normalisé trouvé dans la section précédente en une unité d'énergie.
2. La solution du dihydrogène est souvent mis en avant pour les grands volumes de stockable, expliquer pourquoi.
3. Convertir S en volume et en masse d'hydrogène, en prenant des ordres de grandeur de la littérature.

3.3 Conclure

1. Conclure sur les contraintes imposées par une production de puissance de type flux (quelle qu'elle soit).
2. Comparer les deux sources PV et éolien