

ÉNONCÉ DE TP Intermittence

— ATTENTION —

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

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 énergie 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)
- **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. 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

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

..

2 Traitement

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

2.1 Représentations brutes

Après avoir choisi un fichier de données disponible dans *DATA*.

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.

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
 - (c) les éventuelles variations régionales de production de puissance
2. Extraire les moyennes temporelles $\langle x \rangle$ et écart type σ_x de chacune des sources sur chacune des périodes considérées. 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.

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.

2.2 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 sont 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

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

2.3 Foisonnement

Le foisonnement consiste à multiplier les sources de production de puissance à priori décorréées 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 décorréées. 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.

2.4 Intermittence

Dans une première approche de l'intermittence, nous allons évaluer la capacité d'une source de production de puissance à la variation à suivre la variation de la consommation. C'est une manière de combiner la prévisibilité de la variabilité et la fractionnabilité.

Pour cela en vous appuyant sur les calculs précédents, calculer la corrélation de la consommation avec chacune des 3 sources d'énergie et conclure.

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.

Quantifier C_0 la totalité de l'énergie consommée dans l'année choisie. Puis représenter la somme cumulée et normalisée de la consommation de puissance sur cette année :

$$C^*(T) = \frac{1}{C_0} \int_0^T P_C(t) dt \quad (1)$$

Cette expression représente l'énergie produite entre $t = 0$ et $t = T$. Par construction vous devez vérifier que $C^*(0) = 0$ et $C^*(T = 1) = 1$ avec $T = 1$ correspondant à un an.

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

1. Procéder de la même manière que pour la consommation et quantifier la totalité de l'énergie produite dans l'année choisie E_0 . Représenter la somme cumulée et normalisée de la consommation sur cette année :

$$E^*(t) = \frac{1}{E_0} \int_0^T P(t) dt \quad (2)$$

Vérifier que $E^*(0) = 0$ et $E^*(T = 1) = 1$ avec $T = 1$ correspondant à un an.

2. Tracer la série temporelle de la différence des puissances normalisées $\delta(t) = \frac{P(t)}{E_0} - \frac{C(t)}{C_0}$. Vérifier que $\int_0^1 \delta(t) dt$ sur un an est bien nul.
3. Vous vous êtes ainsi assuré de produire exactement sur l'année la quantité d'énergie nécessaire à la consommation, sans sur-production, sans sous-production. Cependant la synchronisation de la consommation et de la production ne sont pas assurées. Pour cela il faut que E^* et C^* soient égaux à chaque pas de temps. Est ce le cas ?
4. Tracer la série temporelle de la différence des sommes cumulées $\Delta(T) = E^*(T) - C^*(T)$. Δ représente une estimation du stockage nécessaire à chaque pas de temps ?
5. En déduire une évaluation du volume de stockage S nécessaire en fraction de la consommation annuelle C_0 .
6. 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 Conclusion

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