

# TP intermittence

3 avril 2023

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. Envoyez votre rapport à l'adresse [eric.herbert@u-paris.fr](mailto:eric.herbert@u-paris.fr).

Vous allez générer dans pour 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.

## Première partie

### 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 turbulent<sup>1</sup> 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, fluctuations de la vitesse du vent
- Fractionnabilité, c'est à dire la possibilité de n'utiliser qu'une partie de la puissance installée (il n'est pas possible d'arrêter une demie tranche de réacteur nucléaire)

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.

---

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

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 Récupérer les données et les programmes

## 1.1 Programmes

Rendez vous sur la page

<https://github.com/ericherbert/TPintermittence> et téléchargez l'ensemble du projet (bouton *clone or download*) et extraire les documents de l'archive. Vous y trouverez

- Le dossier *DATA* contenant les données dont vous avez besoin si l'extraction des données téléchargées depuis le site de *RTE* n'a pas fonctionné
- 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. Si vous ne disposez pas d'une installation fonctionnelle, l'application *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.

Si vous disposez d'une installation Python 3 vous pouvez également effectuer le travail sur cette machine.

## 1.2 Données

Remarque sur les données de RTE : EDF est tenu légalement d'acheter toutes la production électrique des sources PV et éolien, donc la puissance de ces sources injectées dans le réseau est toujours la puissance maximale possible avec les installations disponibles. Inversement, 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.<sup>2</sup>
2. Identifier les différentes sources de puissance, les flux exportés et importés.
3. Comparer qualitativement sur différentes périodes leur série temporelle.
4. Faire un bilan comparatif des deux points précédents

À présent nous allons explorer une période spécifique de production de puissance. Vous aurez également besoin de données situées dans des régions géographiques éloignées.

1. Choisir une période et télécharger les données correspondantes. Noter la durée, la fréquence d'échantillonnage, les sources disponibles.
2. Déziper l'archive et enregistrer le tableau au format csv, Prendre garde également aux caractères non reconnus, séparateur décimal etc. Il peut être utile d'ouvrir le fichier pour vérifier son contenu.

---

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

3. Utiliser le programme *open\_data.py* que vous aurez modifié pour votre usage, pour extraire les différentes données. Noter le nom et la colonne de chaque mesurable (Consommation, nucléaire etc).

Si besoin, dans le repertoire *DATA*, des données provenant de RTE sont disponibles.

## Deuxième partie

# 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 Séries temporelles

### 2.1 Séries temporelles. Consommation et 3 Sources

1. À l'aide du programme *plot\_data.py*, représenter la dynamique temporelle de la **consommation** *i*—journalière, *ii*—mensuelle et *iii*—annuelle. Ajoutez les unités et enregistrez ces figures de manière à pouvoir les retrouver simplement, et faites de même pour les trois sources.
  - (a) Sur les diagrammes annuels, repérez les différentes saisons
  - (b) Sur les diagrammes journaliers, repérez les différentes parties de la journée
  - (c) les éventuelles variations régionales de production de puissance
2. Extraire les moyennes temporelles  $\langle x \rangle$  et écart type  $\sigma_x$  de chacune des sources sur chacune des périodes considérées. Quelles sont les limitations de l'emploi des quantités  $\sigma_x$ ,  $\langle x \rangle$  et de la variation relative  $\sigma_x/\langle x \rangle$ , pour caractériser chacune des sources ?

### 2.2 Distribution des séries temporelles. Consommation et 3 Sources

1. À l'aide du programme *plot\_distribution.py*, représenter la variation de la distribution de la **consommation** normalisée par sa moyenne temporelle  $\frac{C(t)-C(t+\tau)}{\langle C \rangle}$ , avec un pas de temps  $\tau$  d'une heure puis de 24 heures. Faire de même pour chacune des 3 sources. Représenter les *densités de probabilité* (pdf) de ces fonctions en vous appuyant sur le paramètre *density* de la fonction histogramme, puis comparer ces distributions avec une loi normale (Gaussienne) de même moyenne et écart type. Ajouter les unités, noms des axes et enregistrer les figures. Vous choisirez la représentation (logarithmique ou linéaire) qui vous paraîtra la plus pertinente en le justifiant.
2. Après avoir justifié qu'une distribution normale représente des fluctuations aléatoire, discuter avec  $\tau = 1$  h et 24 h les écarts de la pdf de la production électrique à cette loi pour les 3 sources.

### 3 Agrégation

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

1. Expliquer pourquoi des conditions climatiques décorréelées 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) Comparer les distributions obtenues avec une loi normale
  - (c) Calculer la covariance<sup>3</sup>  $cov = \langle (X - \langle X \rangle)(Y - \langle Y \rangle) \rangle$  et le coefficient de corrélation  $r = \frac{cov}{\sigma_X \sigma_Y}$  avec  $X$  et  $Y$  les productions de puissance instantanées des deux régions considérées. Conclure.

### 4 Foisonnement

Le foisonnement consiste à multiplier les sources de production de puissance à priori décorréelées 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 décorréelées. 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) Comparer les distributions obtenues avec une loi normale
  - (c) Calculer la covariance  $cov = \langle (X - \langle X \rangle)(Y - \langle Y \rangle) \rangle$  et le coefficient de corrélation  $r = \frac{cov}{\sigma_X \sigma_Y}$  avec  $X$  et  $Y$  les productions de puissance instantanées des sources considérées. Conclure.

### 5 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.

---

3. Des codes de la covariance et de la corrélation sont proposés dans *utils.py*

Pour cela en vous appuyant sur les programmes précédents, vous allez calculer la corrélation entre les variations de la consommation, déterminée par le signe de  $\left(\frac{C(t)-C(t+\tau)}{\langle C \rangle}\right)$  et la variation de la source qui peut être d'origine nucléaire, éolien et solaire.

1. Commentez les valeurs obtenues, en faisant varier  $\tau$ .
2. Estimez les gains dans le cas du foisonnement et dans le cas de l'agrégation.

## Troisième partie

# Stockage

L'objet de cette partie 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.

## 6 Stockage

Nous allons dans cette partie 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  $1$  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  $\Delta(T) = E^*(T) - C^*(T)$ . Comment dériver de  $\Delta$  une quantification du stockage nécessaire ?

5. En déduire une évaluation du volume de stockage  $S$  nécessaire en fraction de la consommation annuelle  $C_0$ .
6. Comment  $S$  dépend de la période choisie ?

## 7 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. Comparer la solution du dihydrogène aux autres solutions de stockage trouvées pour cette application
3. Convertir  $S$  en volume d'hydrogène.

## 8 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