

documentation outils de pré-dimensionnement elfe

youen FROGER, Ingénieur de recherche de l'école Normale Supérieure de Rennes

Juin 2022

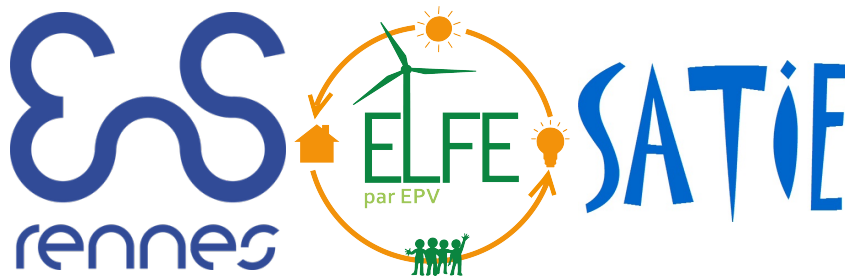


Table des matières

1	Introduction	2
2	entrées/sorties des outils de simulation	3
2.1	Données d'entrée de l'outil de simulation simple	3
2.1.1	Consommation	3
2.1.2	Production	4
2.1.3	Puissance de batterie installée	5
2.1.4	Puissance de batterie installée	5
2.1.5	Flexibilité	5
2.2	Données de sortie de l'outil de simulation simple	6
2.3	Données d'entrée de l'outil de simulation paramétrique	6
2.4	Données de sortie de l'outil de simulation multiple/paramétrique	7
3	Outil de simulation simple	8
3.1	Étapes de simulation	8
3.2	Définition de la flexibilité énergétique/flexibilité sur la consommation	8
3.3	Batteries	10
3.4	Utilisation	10

4	Outil de simulation paramétrique	12
5	Interface web	12
5.1	Outil de simulation simple	12
5.1.1	Visualisation de simulation sur une longue durée	13
5.1.2	Visualisation de simulation sur une courte durée	14
5.2	Outil de simulation paramétrique	15
5.2.1	Visualisation de la variation de 2 paramètres (3D)	15
5.2.2	Visualisation de la variation d'un paramètres (2D)	15
6	Nomenclature	15

1 Introduction

Dans le contexte actuel d'augmentation de la part de la production d'énergie renouvelable dans le mixe énergétique français, la production d'énergie est de moins en moins pilotable. Cela a pour conséquence le besoin d'ajouter des sources d'énergies pilotables, souvent non renouvelables, dans la production, d'ajouter des moyens de stockages, ou d'importer de l'énergie dont on ne contrôle pas le mode de production. Afin de limiter ce besoin au maximum, il peut être intéressant de piloter une part de la consommation afin de faire correspondre celle-ci au maximum à la nouvelle production. Cela se traduit par le fait de déplacer dans le temps une part de la consommation. Une consommation que l'on peut déplacer dans le temps sera appelée par la suite de ce document "consommation flexible".

Le projet ELFE (Expérimentons Localement la Flexibilité Énergétique), initialement porté par l'association EPV (Energie Citoyenne en Pays de Vilaine) a vu le jour afin de caractériser à échelle réelle l'impact que la flexibilité énergétique peut avoir sur l'autoconsommation du territoire. Pour se faire, le projet est découpé en plusieurs sous-parties dont la partie pré-dimensionnement qui est l'objet de ce document. L'objectif de la partie pré-dimensionnement est de pouvoir estimer à partir des données disponibles à ce jour quel peut être l'impact d'une telle démarche.

Dans ce cadre, et avec les contraintes établies en collaboration avec les porteurs du projet ELFE (EPV), j'ai conçu plusieurs outils afin de pouvoir caractériser et visualiser les impacts respectifs de différents facteurs sur l'autonomie du territoire.

Le premier outil permet la simulation numérique d'un scénario donné afin de pouvoir extraire les informations nécessaire. Dans la suite de ce document, cet outil sera nommé outil de simulation simple.

Un autre outils fait appel à l'outil de simulation simple en faisant varier ses paramètres afin de pouvoir analyser l'impact des différents paramètres sur des indicateurs (également appelés "métriques" dans ce document). Cet outil sera appelé "outil de simulation paramétrique" dans la suite de ce document.

Les facteurs considérés par l'outil de simulation paramétrique sont les suivants :

1. La production éolienne annuelle totale
2. La production solaire annuelle totale
3. La production de bioénergie(Méthanol) annuelle totale
4. La puissance de stockage
5. Le taux flexibilité sur la consommation

Afin de pouvoir utiliser ces outils, j'ai développé un serveur qui expose des interfaces web et des API de visualisation des résultats. Ce serveur dispose de deux APIs principales. La première permet de réaliser une simulation avec un jeu de paramètres fixés par l'utilisateur à la demande. La seconde permet de sélectionner une partie des résultats issus de l'outil de simulation paramétrique et de les visualiser. Ces résultats proviennent d'une simulation réalisée en amont.

2 entrées/sorties des outils de simulation

2.1 Données d'entrée de l'outil de simulation simple

2.1.1 Consommation

L'outil de simulation a pour entrée trois types de paramètres de consommation : des courbes de consommation, des facteurs facultatifs de mise à l'échelle de ces courbes et le poids de chaque courbe dans le système complet.

Soit N_{cons} le nombre de consommateurs, pour tout $i \in [0, N_{cons}[$ on a $P_{cons,i,ns}(t)$ la puissance consommée par le consommateur i au cours du temps avant sa mise à l'échelle. S'il y a un facteur de mise à l'échelle pour la courbe i ($S_{cons,i}$), on a :

$$P_{cons,i,s}(t) = S_{cons,i} \frac{P_{cons,i,ns}(t)}{avg(P_{cons,i,ns})}$$

si il n'y a pas de facteur de mise à l'échelle, on a

$$P_{cons,i,s}(t) = P_{cons,i,ns}(t)$$

Pour chaque courbe i , il y a également un facteur de contribution $contrib_i$, qui peut être fixé par l'utilisateur et qui représente la contribution du consommateur i à la consommation totale considérée. Si ce facteur n'est pas fixé, sa valeur par défaut est

$$contrib_i = \frac{1}{N_{cons}}$$

La puissance totale consommée est alors définie telle que :

$$P_{cons,noflex}(t) = \sum_{i=0}^{N_{cons}-1} contrib_i * P_{cons,i,ns}(t)$$

Actuellement une seule courbe de consommation est chargée par l'outil pour les simulations. Cette courbe vient d'un fichier CSV extrait de la base de données de ENEDIS. La source de données initiale est la liste des consommations énergétiques par profil, par catégorie et par demi-heure à l'échelle de la région Bretagne, en Wh :
<https://data.enedis.fr/explore/dataset/conso-inf36-region/table/>

Les profils correspondent aux types de contrats souscrits par les consommateurs, et les catégories différencient les niveaux de puissance pouvant être atteints par le consommateur. Une catégorie spéciale ("P0") contient la somme des puissances de toutes les catégories. (pretraitement/cons_res.py)

Pour chaque pas de temps, on somme les consommations de tous les profils résidentiels.

Afin d'obtenir la puissance consommée à l'échelle de l'heure, on somme les énergies soutirées heure par heure, et l'on divise par le pas de temps total (1h). Finalement, on divise ce que l'on obtient par le nombre de points de soutirage moyens sur l'heure concernée afin d'obtenir un consommateur moyen. (pretraitement/cons_res_moy.py)

Après comparaison avec la consommation totale du secteur résidentiel de Redon+Pontchateau, cette approche surestime légèrement la consommation du secteur résidentiel (203 GWh totaux pour l'année 2020 contre 195 GWh d'après EPV)

2.1.2 Production

Les courbes de production, bien que traitées individuellement par l'outil, sont toutes traitées de la même manière :

On a 4 données d'entrées par courbe de production : Un booléen pour savoir si elle est présente, la courbe de production, un booléen pour savoir si on doit la mettre à l'échelle, la puissance moyenne cible pour la production.

Soit $P_{prod,i,ns}(t)$ la i -ème courbe de production non mise à l'échelle, on a : Si la mise à l'échelle est présente :

$$P_{prod,i,s}(t) = S_{prod,i} \frac{P_{prod,i,ns}(t)}{avg(P_{prod,i,ns})}$$

avec $S_{prod,i}$ le facteur de mise à l'échelle (puissance moyenne cible) Si la mise à l'échelle n'est pas présente, on a

$$P_{prod,i,s}(t) = P_{prod,i,ns}(t)$$

Finalement, la production totale est la somme des productions présentes.

$$P_{prod,nobat} = \sum_{i \in [Prod]} P_{prod,i,s}$$

2.1.2.1 Eolien

La source de données utilisée est la production d'une éolienne du parc de Béganne, dont la variation mensuelle a été modifiée par Yves BOULAY afin d'être plus représentative des variations mensuelles a long terme.

2.1.2.2 Photo-voltaïque

La production en photo-voltaïque est extraite de la base de données ENEDIS. Les données sont connues à l'échelle de la demi-heure pour la région Bretagne. Il s'agit de l'énergie produite par catégorie de moyen de production (photovoltaïque, éolien, bioénergie, thermique non renouvelable...).
<https://data.enedis.fr/explore/dataset/prod-region/information> On isole du fichier CSV téléchargé les sources de données qui nous intéressent (ici photo-voltaïque) et on les somme heure par heure, en utilisant la même méthode que pour la consommation.

2.1.3 Puissance de batterie installée

La capacité de batterie installée est une donnée d'entrée. Il s'agit de la quantité d'électricité que l'on peut stocker par habitant (Wh/habitant). Afin de pouvoir avoir une vision sur l'ensemble du territoire, un facteur multiplicatif est réalisé pour l'affichage. Les batteries sont considérées comme des stockage sans limite de puissance échangées et sans perte dans le cadre de cette étude

2.1.3.1 Bioénergie

La production en Bioénergie est extraite de la base de données ENEDIS. Les données sont connues à l'échelle de la demi-heure pour la région Bretagne. Il s'agit de l'énergie produite par catégorie de moyen de production (photovoltaïque, éolien, bioénergie, thermique non renouvelable...).
<https://data.enedis.fr/explore/dataset/prod-region/information> On isole du fichier CSV téléchargé les sources de données qui nous intéressent (ici Bioénergie) et on les somme heure par heure, en utilisant la même méthode que pour la consommation.

2.1.4 Puissance de batterie installée

La capacité de batterie installée est une donnée d'entrée. Il s'agit de la quantité d'électricité que l'on peut stocker par habitant (Wh/habitant). Afin de pouvoir avoir une vision sur l'ensemble du territoire, un facteur multiplicatif est réalisé pour l'affichage. Les batteries sont considérées comme des stockage sans limite de puissance échangées et sans perte dans le cadre de cette étude

2.1.5 Flexibilité

La flexibilité est définie comme la proportion de la consommation que l'on peut déplacer à volonté au sein d'une période donnée. La méthode d'application

de la flexibilité sera définie dans la partie simulation.

2.2 Données de sortie de l'outil de simulation simple

L'outil de simulation simple sort des courbes (Powerdata). Les données sortie sont les suivantes :

- Consommation totale, après application de la flexibilité
- Production totale, incluant la production des batteries. Cela sera détaillé dans la partie "outil de simulation simple"
- Production totale avant l'application des batteries

$$\sum_{i \in [Prod]} P_{prod,i,s}$$

- Puissance exportée, telle que définie dans la partie "outil de simulation simple"
- Puissance importée, telle que définie dans la partie "outil de simulation simple"
- Batteries, contenant la puissance de charge des batteries (peut être négative) ainsi que la charge au cours du temps
- Utilisation de la flexibilité, jour par jour, telle que définie dans la partie "outil de simulation simple"

2.3 Données d'entrée de l'outil de simulation paramétrique

L'outil de simulation paramétrique fait varier 5 paramètres :

- Production éolienne moyenne sur la période concernée
- Production solaire moyenne sur la période concernée
- Production de bioénergie (bio-méthane obtenu par méthanisation des déchets issus de l'élevage par exemple) moyenne sur la période concernée
- Quantité de stockage
- Flexibilité disponible

Chacune de ces données possède une valeur minimale, une valeur maximale et un nombre de points. L'interpolation est faite en utilisant la formule suivante :

$$val(i) = (val_{max} - val_{min}) * \frac{i}{nb_{points} - 1} + val_{min}$$

Dans le cas de la production éolienne, solaire, de bioénergie et dans le cas du stockage, un facteur est appliqué afin d'avoir les données en W/foyer et en Wh/foyer pour la simulation. Ce facteur est un paramètre de l'outil. De plus, un autre paramètre est présent : le nombre de processus de simulations à effectuer en parallèle, afin de pouvoir gérer la proportion des ressources de l'ordinateur de simulation à utiliser.

2.4 Données de sortie de l'outil de simulation multiple/paramétrique

Étant donné le grand nombre de simulations que l'outil de simulation paramétrique va effectuer, il n'est pas raisonnable de stocker les résultats de l'outil de simulation simple pour chaque jeu de paramètres (on fait varier 5 paramètres, donc même en ne prenant que 10 points par paramètre, on a 10^5 simulations à effectuer, ce qui fait un nombre déraisonnable de données à stocker). On stocke donc juste des "indicateurs" ou "métriques" à la place, 1 de chaque pour chaque jeu de paramètres et ces métriques sont stockées dans un fichier CSV afin de pouvoir être exploitées a posteriori.

Ces métriques, déterminées en collaboration avec EPV et ENEDIS sont les suivantes :

- Taux d'utilisation de la flexibilité : proportion de la consommation déplaçable utilisée afin d'atteindre l'objectif défini pour la flexibilité
- Taux d'utilisation du stockage : on s'intéresse ici à la puissance échangée avec le stockage. La puissance théorique maximale qui peut être échangée avec celui-ci est une séquence de charge complète sur un pas de temps suivi d'une décharge complète au pas d'après. La capacité de la batterie étant ici définie comme la quantité totale d'énergie (C_{bat}) que la batterie peut contenir à un instant donné, la puissance théorique maximale que la batterie peut échanger avec le réseau au cours d'une période donnée T , avec une période de discrétisation τ est de

$$E_{exc,bat,max} = C_{bat} * \frac{T}{\tau}$$

Or toute l'énergie fournie par la batterie au réseau a été fournie à la batterie avant par le réseau, donc on peut faire l'approximation

$$E_{exc,bat} \approx 2 * E_{fournie,bat}$$

Le taux d'utilisation du stockage est défini :

$$taux_{bat} = \frac{E_{exc,bat}}{E_{exc,bat,max}} = 2 * \frac{E_{fournie,bat}}{E_{exc,bat,max}}$$

Or

$$2 * \frac{E_{fournie,bat}}{E_{exc,bat,max}} = 2 * \frac{P_{fournie,bat,moy} * T}{C_{bat} * \frac{T}{\tau}}$$

donc

$$taux_{bat} = 2 * \frac{P_{fournie,bat,moy} * \tau}{C_{bat}}$$

- Moyenne d'import : Il s'agit de la moyenne de la puissance que l'on doit importer sur le territoire afin de satisfaire la demande
- Moyenne d'export : Il s'agit de la moyenne du surplus de production.
- Taux temporel d'import : Il s'agit de la proportion du temps où l'on doit importer de l'énergie afin de satisfaire la demande

- Taux temporel d'export : Il s'agit de la proportion du temps ou il reste de l'énergie à exporter une fois la demande satisfaite
- Les 5e et 95e pourcentiles de consommation et d'import
- Les maximum d'import et d'export
- Taux de couverture : il s'agit de la capacité d'autoproduction

$$\frac{avg(P_{prod})}{avg(P_{cons})}$$

- Moyenne de couverture : Il s'agit de la moyenne temporelle de

$$\frac{P_{prod}(t)}{P_{cons}(t)}$$

- Taux d'autoconsommation : il s'agit de la part de la production consommée par le territoire. Pour le calculer, on utilise la formule suivante :

$$taux_{autoconso} = \frac{\sum_t P_{prod}(t) - P_{exp}(t)}{\sum_t P_{prod}(t)}$$

- Taux d'auto-production : il s'agit de la part de la consommation auto-produite, c'est à dire la part de la consommation qui est satisfaite par la production du territoire. Pour la calculer, on utilise la formule suivante :

$$taux_{autoprod} = \frac{\sum_t P_{cons}(t) - P_{imp}(t)}{\sum_t P_{cons}(t)}$$

3 Outil de simulation simple

3.1 Étapes de simulation

La première étape de simulation est de calculer la puissance consommée et produite étant donné les facteurs de la simulation en cours ($P_{cons,noflex}$ comme défini dans le 2.1.1 et $P_{prod,nobat}$ comme défini dans le 2.1.2). Ensuite, on applique la flexibilité sur la consommation afin d'obtenir le P_{cons} comme défini ci-après. Finalement on simule les batteries pour calculer le P_{prod} comme défini ci-après.

3.2 Définition de la flexibilité énergétique/flexibilité sur la consommation

Dans le cadre de cette étude, la flexibilité est définie de la manière suivante : Il s'agit de la proportion de la consommation considérée qu'il est possible de déplacer dans le temps, sur une période donnée. Par exemple si la période considérée est 24h, la consommation connue est découpée en périodes de 24h. Sur chacune des périodes concernées, on calcule la quantité d'énergie totale consommée et l'on multiplie ce résultat par le taux de flexibilité afin de connaître la quantité total d'énergie consommée que l'on peut déplacer.

$$E_{flex} = E_{24h} * \text{taux}_{flex}$$

Ensuite, afin de pouvoir avoir une répartition optimale de la consommation, on calcule la différence entre la consommation sans flexibilité et la production avant les batteries :

$$P_{diff,noflex,nobat}(t) = P_{conso,noflex}(t) - P_{prod,nobat}(t)$$

Lorsque $P_{diff,noflex,nobat}(t)$ est positif, on consomme plus que l'on ne produit, cette valeur correspond alors à la puissance importée. Lorsque cette valeur est négative, le territoire est exportateur de $-P_{diff,noflex,nobat}$.

On choisit ensuite une fonction $index(t)$ bijective telle que

$$P_{diff,noflex,nobat}(index(t))$$

soit triée par ordre croissant pour chaque période de flexibilité. On appelle cette courbe locale "monotone de puissance", ou dans ce cas, "monotone de différence de puissance".

La flexibilité sera appliquée de manière à minimiser le carré de la valeur d'importation, l'objectif sera donc d'aplanir cette monotone de différence de puissance.

Pour atteindre cet objectif, on va commencer par diminuer le point de plus haute différence et le mettre à la hauteur du second point de plus haute différence, puis on répète l'opération avec les deux points de plus haute différence, etc... Jusqu'à épuisement de la consommation flexible disponible. Si la courbe devient une constante, on considère l'objectif atteint et on calcule le taux de flexibilité utilisé, mais on continue le calcul par soucis de simplicité d'implémentation. Si la quantité restante de consommation flexible disponible ne permet pas de diminuer les k derniers points à la hauteur du point précédent, on ne les descend que de la flexibilité restante répartie entre les k points. Une fois la flexibilité descendante épuisée, on a diminué la consommation totale de la flexibilité disponible. Il faut donc ré-augmenter la consommation afin de conserver la même consommation totale sur la période. On va donc ajouter en répartissant de manière analogue la consommation qu'on a enlevée sur le premier point, puis les 2 premiers, etc... de la monotone de différence entre la consommation et la production.

Afin de simplifier le calcul, quelque soit le cas, on utilisera toute la flexibilité disponible "à la baisse", puis on utilisera toute la flexibilité disponible "à la hausse".

Le taux de flexibilité utilisée est soit 1 si toute la flexibilité a été consommée sans atteindre l'objectif d'aplanir la monotone de différence.

Si l'objectif est atteint, le taux de flexibilité utilisée est :

$$\text{taux}_{flexutilisee} = \frac{E_{flex,desc,utilisee} + E_{flex,hausse,utilisee}}{2 * E_{flex}}$$

3.3 Batteries

Le modèle utilisé pour les batteries est le plus simple possible : on a une capacité de stockage d'énergie qui peut se remplir ou se vider intégralement en un pas de temps, sans aucune perte. On vient charger/décharger la batterie avec $-P_{diff,flex}$. On calcule la charge de batterie à $t + \tau$ en partant du principe qu'elle n'est pas limitée en capacité (τ est le pas de temps de la simulation). soit $E_{bat}(t)$ l'énergie stockée dans la batterie à l'instant t :

$$E_{bat,init}(t + \tau) = E_{bat}(t) - \tau * P_{diff,flex}(t)$$

On va ensuite borner E_{bat} afin d'avoir la charge réelle de la batterie :

$$E_{bat}(t + \tau) = \text{Min}(\text{Max}(E_{bat,init}(t + \tau), 0), C_{bat})$$

Ensuite on calcule la puissance échangée par la batterie, en convention consommateur (cette puissance est négative quand la batterie fournit de l'énergie au réseau).

$$P_{bat}(t) = \frac{E_{bat}(t + \tau) - E_{bat}(t)}{\tau}$$

Finalement, on peut calculer la courbe de production totale :

$$P_{prod}(t) = P_{prod,nobat}(t) - P_{bat}(t)$$

La moyenne de $P_{bat}(t)$ étant quasi-nulle, on considère que les batteries ne font que déplacer une partie de la production au moment plus opportuns de manière analogue à la flexibilité.

Il est important de noter que ce modèle de batterie ne correspond pas forcément à un stockage électrochimique, il peut tout aussi bien s'agir de stockage de bio-méthane.

3.4 Utilisation

Cet outil est utilisable soit au moyen d'une interface web (voir interface web), soit directement en tant que module Python. Pour l'utiliser en tant que module python, il faut lui fournir un objet SimParams. Cet objet est constitué de :

- `has_solar` : booléen qui détermine la présence de production photovoltaïque dans la simulation,
- `has_wind` : booléen qui détermine la présence de production éolienne dans la simulation,
- `has_bioenergy` : booléen qui détermine la présence de production de bio-énergie dans la simulation,
- `has_piloted_bioenergy` : booléen non utilisé,
- `has_battery` : booléen qui détermine la présence de batteries dans la simulation,
- `has_flexibility` : booléen qui détermine la présence de flexibilité dans la simulation,

- `has_solar_scaling` : booléen qui détermine si la production solaire doit être mise à l'échelle,
- `has_wind_scaling` : booléen qui détermine si la production éolienne doit être mise à l'échelle,
- `has_bioenergy_scaling` : booléen qui détermine si la production de bio-énergie doit être mise à l'échelle,
- `has_piloted_bioenergy_scaling` : booléen non utilisé,
- `has_consumer_scaling` : booléen ou liste de booléen qui détermine si la consommation du consommateur i doit être mise à l'échelle. Si il n'y a qu'un seul booléen, tous les consommateurs partagent la même décision quand à la mise à l'échelle de la consommation,
- `solar_power` : flottant, valeur moyenne cible de la production solaire,
- `wind_power` : flottant, valeur moyenne cible de la production éolienne,
- `bioenergy_power` : flottant, valeur moyenne cible de la production de bioénergie,
- `battery_capacity` : flottant, capacité de stockage installé,
- `piloted_bioenergy_power` : flottant, non utilisé,
- `flexibility_ratio` : flottant, ratio de la consommation que l'on peut décaler ($1 = 100\%$),
- `consumer_power` : flottant ou liste de flottants qui détermine la consommation du consommateur i , si elle doit être mise à l'échelle. Si il n'y a qu'un seul flottant, tous les consommateurs partagent la même consommation,,
- `consumer_contrib` : flottant, facteur de contribution du consommateur i ($contrib_i$),
- `solar_curve` : `PowerData`, courbe de production solaire. En cas d'absence, l'outil vérifie que le booléen `has_solar` est bien faux et lève une exception si ce n'est pas le cas. au moins une des courbes de productions doit être renseignée
- `wind_curve` : `PowerData`, courbe de production éolienne. En cas d'absence, l'outil vérifie que le booléen `has_wind` est bien faux et lève une exception si ce n'est pas le cas. au moins une des courbes de productions doit être renseignée
- `bioenergy_curve` : `PowerData`, courbe de production de bioénergie. En cas d'absence, l'outil vérifie que le booléen `has_bioenergy` est bien faux et lève une exception si ce n'est pas le cas. au moins une des courbes de productions doit être renseignée
- `consumer_curves` : `PowerData` ou liste de `PowerData`, courbe de consommation. En cas d'absence, l'outil lève une exception.
- `begin` : `datetime`, date de début de la simulation. si absent, le début correspond au début des données les plus restrictives
- `end` : `datetime`, date de fin de la simulation. si absent, la fin correspond à la fin des données les plus restrictives
- `scale_before_slice` : booléen qui détermine si la mise à l'échelle doit être faite sur les données globales ou sur les données qui sont comprises entre la date de début et la date de fin

Pour effectuer une simulation, importer le module `sim.py` qui fournit toutes les fonctions nécessaires, initialiser les objets `PowerData` et remplir le `SimParams`, puis lui appliquer la fonction `check_and_convert_params` et lancer la simulation en passant cet objet à la fonction `simulate_scenario`. Un tutoriel vidéo sera disponible

4 Outil de simulation paramétrique

5 Interface web

5.1 Outil de simulation simple

L'outil de simulation simple utilise des jeux de données d'une taille importante. Afin de limiter les transferts de données, il est séparé en 2 parties. L'une, prévue pour effectuer des simulations sur de grandes périodes temporelles (1an), effectue les calculs et n'exporte qu'une image pour la visualisation de la forme de la courbe. L'autre est prévue pour visualiser en détail les résultats de la simulation sur de plus courtes périodes (1 mois). L'outil de simulation simple est ici pré-chargé avec les courbes de production et de consommation, et l'on fera varier les paramètres suivants afin d'obtenir la simulation qui correspond à nos attentes. Les résultats seront affichés en W/foyer. Pour les simulations, il est considéré que la région Redon + Pontchâteau contient un total de 50951 foyers (source : ENEDIS, année 2020)

- Puissance moyenne de la production solaire : puissance moyenne de la production solaire sur la période simulée
- Puissance moyenne de la production bioénergétique : puissance moyenne de la production bioénergétique sur la période simulée
- Puissance moyenne de la production d'une éolienne : puissance moyenne de la production **d'une** éolienne sur la période simulée (à multiplier par le nombre d'éoliennes pour avoir la puissance totale produite par le parc éolien sur la période concernée)
- Nombre d'éoliennes : nombre d'éoliennes du parc simulé.
- Stockage présent : si coché, le stockage sera simulé. Si non il ne le sera pas pour des raisons de vitesse de simulation
- Stockage installé : stockage considéré dans la simulation si le paramètre stockage présent est coché
- Moyenne glissante : Si ce paramètre est coché, une moyenne glissante sur la période spécifiée sera effectuée **après** la simulation, afin de faciliter la visualisation des résultats
- Période de moyenne glissante : période sur laquelle la moyenne glissante sera effectuée si elle est présente
- Date de départ de la simulation : Date de départ souhaitée de la simulation. La simulation ne considérera que les données présentes pour les dates plus grandes que la date de départ.

- Date de fin de la simulation : Date de fin souhaitée de la simulation. La simulation ne considérera que les données présentes pour les dates plus petites que la date de fin.
- Simuler sur toutes les données : si ce paramètre est coché, la restriction des dates se fait après la simulation. A utiliser si l'on veut zoomer sur une période sans changer la simulation.
- Mise à l'échelle sur toutes les données : si ce paramètre est coché, la restriction des dates se fait après la mise à l'échelle des données de simulation. A utiliser si l'on veut effectuer une simulation sur la période choisie avec des conditions initiales nulles (batteries non chargée)
- Flexibilité présente : si coché, la flexibilité sera simulée. Si non elle ne le sera pas pour des raisons de vitesse de simulation.
- Flexibilité des utilisateurs : si la flexibilité est présente, il s'agit du taux de consommation que l'on autorise l'outil à décaler sur 24h.
- Pourcentage de la consommation 'RES' : taux de la consommation labélisée RES (Résidentiel) que l'on utilise, après mise à l'échelle. Cela permet de simuler, par exemple, une augmentation de 10% de la consommation du panel résidentiel (110 dans le paramètre).
- Pourcentage de la consommation 'PRO' : taux de la consommation labélisée PRO (Professionnel) que l'on utilise, après mise à l'échelle. Cela permet de simuler, par exemple, une augmentation de 10% de la consommation du panel professionnel (110 dans le paramètre).
- Pourcentage de la consommation 'ENT' : taux de la consommation labélisée ENT (Entreprise) que l'on utilise, après mise à l'échelle. Cela permet de simuler, par exemple, une augmentation de 10% de la consommation du panel d'entreprise du territoire (110 dans le paramètre).

5.1.1 Visualisation de simulation sur une longue durée

L'outil est découpé en 3 parties encadrées en rouge et numérotées sur la figure 2 ci-dessous.

La première (1) contient deux figures extraites de la simulation effectuée : dans l'une on a les imports/exports d'énergie en W/foyer heure par heure, tandis que l'autre contient le taux d'énergie importé afin de satisfaire la demande.

La seconde (2) contient les paramètres de simulation. Après chaque changement de ces paramètres, l'outil va automatiquement envoyer une demande de simulation au serveur.

La troisième (3) contient les résultats agglomérés de la simulation lancée (la sortie que l'outil de simulation paramétrique aurait donné pour ce jeu de paramètres).

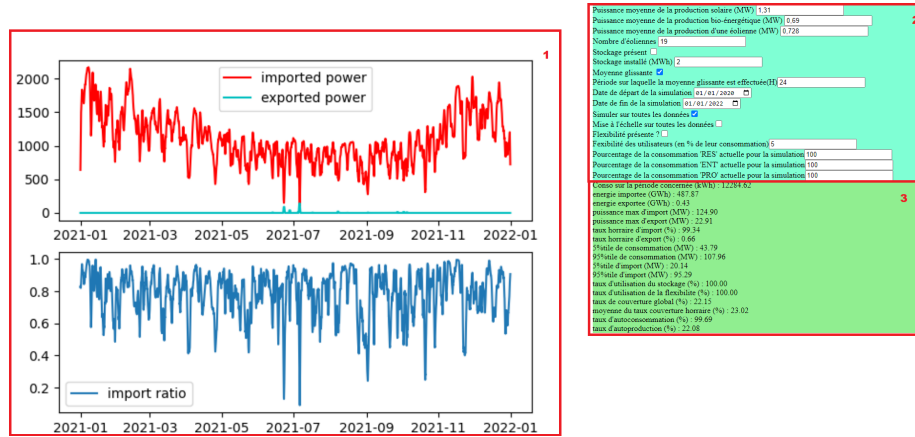


FIGURE 2 – Interface web de l’outil de simulation simple sur une longue durée

5.1.2 Visualisation de simulation sur une courte durée

L’outil est découpé en 3 parties encadrées en rouge et numérotées sur la figure 3 ci-dessous.

La première (1) contient une figure interactive extraite de la simulation effectuée. En bleu, on a les imports d’énergie sur la période concernée et en orange on a les exports d’énergie, le tout en W/foyer.

La seconde (2) contient les paramètres de simulation. Après chaque changement de ces paramètres, l’outil va automatiquement envoyer une demande de simulation au serveur.

La troisième (3) contient les résultats agglomérés de la simulation lancée (la sortie que l’outil de simulation paramétrique aurait donné pour ce jeu de paramètres).

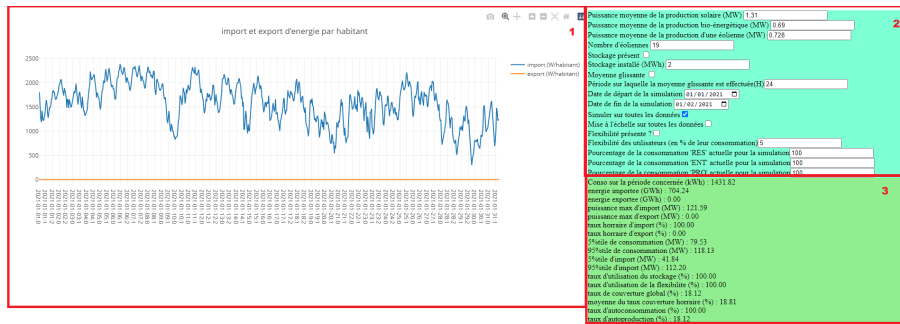


FIGURE 3 – Interface web de l’outil de simulation simple sur une courte durée

5.2 Outil de simulation paramétrique

5.2.1 Visualisation de la variation de 2 paramètres (3D)

5.2.2 Visualisation de la variation d'un paramètres (2D)

6 Nomenclature

- N_{cons} Le nombre de profils différents de consommateurs considérés.
- $P_{cons,i,ns}$ La puissance consommée par le consommateur i au cours du temps avant sa mise à l'échelle.
- $S_{cons,i}$ La puissance moyenne consommée par le consommateur i au cours de la période de temps considérée.
- $P_{cons,i,s}$ La puissance consommée par le consommateur i au cours du temps après sa mise à l'échelle.
- $contrib_i$ Il s'agit d'un facteur d'échelle supplémentaire. Le but est d'avoir $P_{cons,i,s}$ comme étant la consommation réelle et de pouvoir s'intéresser à ce qu'il se passe lorsqu'on double la consommation ($contrib_i = 2$) on qu'on la divise par 2 ($contrib_i = \frac{1}{2}$)
- $P_{cons,noflex}$ La puissance totale consommée au cours du temps par le panel avant l'application de la flexibilité.
- P_{cons} La puissance totale consommée au cours du temps par le panel après l'application de la flexibilité.
- $P_{prod,i,ns}$ La puissance produite par le i -ème producteur au cours du temps avant sa mise à l'échelle.
- $S_{prod,i}$ La puissance moyenne produite par le i -ème producteur au cours de la période de temps considérée.
- $P_{prod,i,s}$ La puissance produite par le i -ème producteur au cours du temps après sa mise à l'échelle.
- $P_{prod,nobat}$ La puissance totale produite au cours du temps par le panel avant l'application des batteries.
- P_{prod} La puissance totale produite au cours du temps par le panel après l'application des batteries.
- $P_{diff,noflex,nobat}$ La différence entre la puissance consommée et la puissance produite avant l'application des batteries et de la flexibilité.
- $P_{diff,flex}$ La différence entre la puissance consommée et la puissance produite avant l'application des batteries, mais après l'application de la flexibilité.
- P_{diff} La différence entre la puissance consommée et la puissance produite après l'application des batteries et de la flexibilité.
- τ Pas de temps de la simulation
- E_{flex} Énergie flexible disponible pour le pas de 24h considéré.
- E_{24h} Énergie consommée par le panel sur 24h
- $taux_{flex}$ Proportion de la consommation totale qui est flexible
- $E_{flex,desc,utilisee}$ Énergie flexible utilisée afin d'atteindre l'objectif (La courbe P_{diff} est plate sur le pas de 24h considéré) qui a servit à diminuer

- les points de plus haute consommation. Si l'objectif n'est pas atteint,
 $E_{flex,desc,utilisee} = E_{flex}$
- $E_{flex,haute,utilisee}$ Énergie flexible utilisée afin d'atteindre l'objectif (La courbe P_{diff} est plate sur le pas de 24h considéré) qui a servit à augmenter les points de plus basse consommation. Si l'objectif n'est pas atteint,
 $E_{flex,hausse,utilisee} = E_{flex}$
 - C_{bat} La capacité de stockage considérée (en Wh). Il ne s'agit pas forcément de stockage électrochimique.
 - E_{bat} La quantité d'énergie présente dans le stockage.
 - $E_{bat,init}$ valeur intermédiaire de calcul, basée sur la charge de la batterie si elle n'était pas bornée.
 - P_{bat} Puissance d'entrée de la batterie, en convention récepteur (si P_{bat} est négative, la batterie fournit de l'énergie au réseau)