

El Hierro, l'île modèle

Un laboratoire des énergies renouvelables



Projet d'option

Lahlou - Le Borgne - Pourouchottamin - Rehbinder

L'île d'El Hierro est située dans l'archipel de Canaries. Cette île est devenue un vrai laboratoire des énergies renouvelables, depuis que cinq éoliennes associées à un système innovant de stockage hydraulique ont été installés sur l'île. Ceux-ci sont venus rajeunir et verdir un système jusque là uniquement basé sur un groupe électrogène diesel, à la production facilement contrôlable mais chère et très polluante. Notre travail a pour but de mettre en évidence le gain écologique associé à cette innovation, et de modéliser de manière simple la manière dont le nouvel ensemble de production électrique répond aux besoins de l'île.

Dans un premier temps nous résumerons les données qui nous ont été utiles pour étudier le cas d'El Hierro. Ensuite nous montrerons, par une étude de type bilan carbone, quel est l'apport de la construction des éoliennes, en prenant en compte le coût écologique de leur construction. Enfin nous présenterons un algorithme simple de répartition de la production électrique, en fonction des données de disponibilité de vent et de demande heure par heure.

Plan

I. Données

- a. Données socio-économiques
- b. Données sur les consommations d'énergie
- c. Données sur les éoliennes et les bassins
- d. Données sur le moteur diesel d'appoint

II. Bilan carbone

III. Simulation informatique – Algorithme Python

- a. Vitesse du vent
- b. Puissance des éoliennes
- c. Implémentation du stockage
- d. Calcul des rendements de stockage et de destockage

IV. Résultats et analyse

- a. Méthodologie des tests
- b. Impact du nombre d'éoliennes
- c. Stabilité suivant le remplissage du stockage du bassin supérieur
- d. Récapitulatif des résultats

Conclusion

Annexes : Algorithme Python

I. Données

I.a. Données socio-économiques

L'île d'El Hierro accueille environ 10000 habitants, avec une population permanente de 8000 habitants et un tourisme important tout au long de l'année. La population d'El Hierro est dans une écrasante majorité (près de 80%) employée dans le secteur des services.

I.b. Données sur les consommations d'énergies

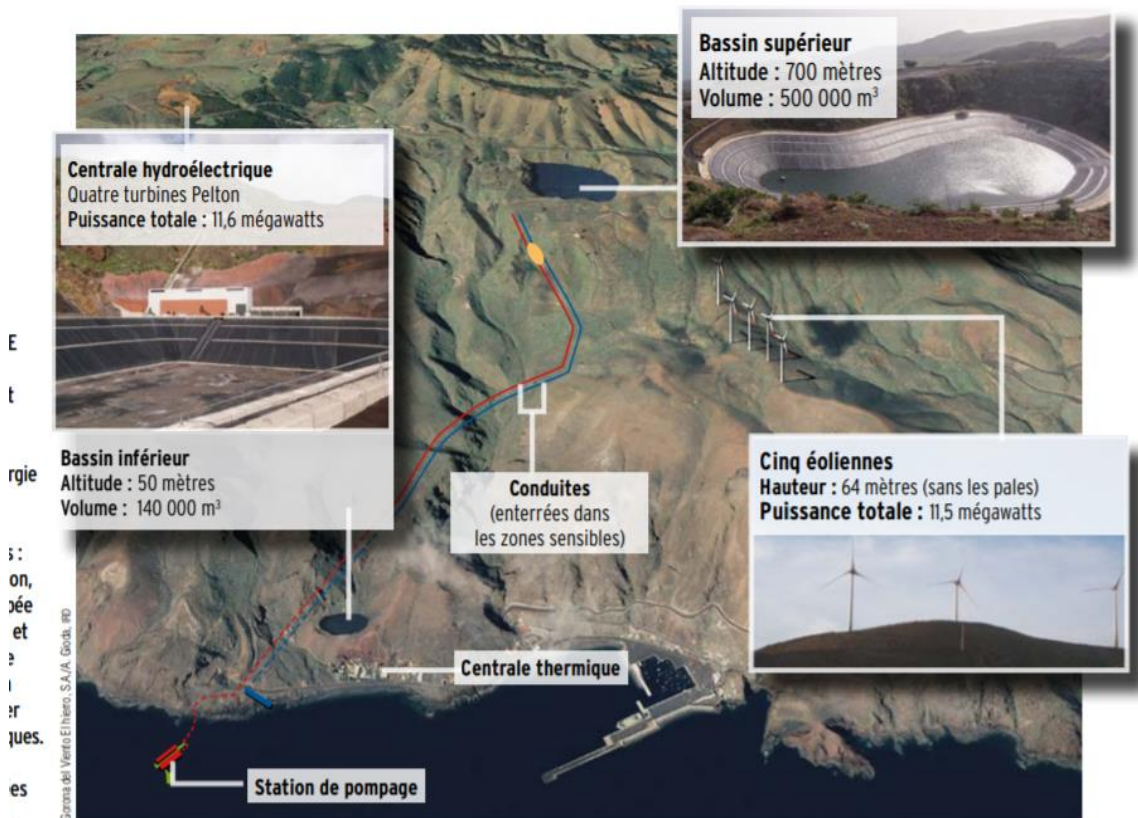
Un poste très important de consommation d'énergie sur l'île est le dessalement de l'eau. L'île obtient de l'eau potable par trois biais : pour moitié à l'aide de ses usines de dessalement, et pour le reste en tirant partie des nappes phréatiques de l'île, ainsi que d'une flore unique capable de capturer l'eau de la rosée (arbres fontaines).

Pour le reste, la consommation d'énergie est liée aux besoins de transport d'électricité. La demande en électricité (usine de dessalement comprise), est d'environ 8 MW en moyenne sur l'année. Auparavant, la demande en électricité était principalement pourvue à l'aide de moteurs diesels, partiellement remplacés depuis par l'action combinée des éoliennes et du stockage hydraulique.

I.c. Données sur les éoliennes et les bassins

Les éoliennes sont au nombre de cinq, toutes du même type : Enercon E-70, pour une puissance totale installée de 11,5 MW. Elles sont situées à mi-hauteur sur l'île, et elles-mêmes ont une hauteur

de 64 mètres.



Deux bassins de rétentions sont creusés, séparés par 650 mètres de dénivelé et reliés par quatre turbines Pelton, d'environ 11,6 MW elles aussi.

Nous reproduisons ici le schéma proposé par Alain Gioda, un des chercheurs qui a travaillé sur le cas d'El Hierro.

I.d. Données sur le moteur diesel d'appoint

Le groupe, d'une puissance nominale de 12,73, est en fait composé de dix petits moteurs fonctionnant au gasoil. Ceux-ci ont pour marques Catterpillar pour sept d'entre eux et Man pour les autres, les spécifications étant disponibles si besoin.

La centrale de production d'électricité est alimentée par un pipeline, qui remplit des cuves de stockages journalières (15 à 70 m3), tandis que deux cuves de 250 m3 permettent de pallier un manque éventuel.

II. Bilan carbone

On se propose dans cette partie d'estimer l'intérêt environnemental de l'innovation que constitue la centrale hydro-éolienne sur El Hierro. Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser l'outil du Bilan Carbone.

1ère étape : définition de l'unité fonctionnelle

Nous avons choisi de faire le bilan des émissions de CO2 induites par la production de 1 MWH électrique utilisable dans le réseau.

2ème étape : définition des scénarii considérés

Deux scénarii sont examinés et comparés :

- production de l'unité fonctionnelle par la centrale électrique au fioul. Les différentes étapes de ce scénario sont : production du fioul, importation depuis l'Espagne (port de Huelva, situé à 1500 km), combustion du fioul et production d'électricité.
- Production de l'unité fonctionnelle par la centrale hydro-éolienne de l'île. Les différentes étapes de ce scénario sont production d'électricité par les éoliennes, un cycle de stockage via la STEP.

Remarque importante : le but de ce bilan carbone est de voir si la création de la centrale hydro-éolienne est bénéfique sur le plan environnemental. On se place dans le situation de l'île lorsque le projet a été envisagé, c'est-à-dire qu'on considère que la centrale au fioul est déjà existante et possède une puissance suffisante pour répondre aux besoins en électricité de l'île. Par conséquent, on ne calculera pas d'amortissement sur le temps de vie de la centrale au fioul des émissions induites par la construction de la centrale ; en revanche, on le fera pour la centrale hydro-éolienne.

3ème étape : hypothèses et compilation des données

De nombreuses hypothèses ont été faites, qu'on détaillera au fur et à mesure des calculs ci-dessous. En outre, les données considérées sont issues de diverses sources, citées en fin de bilan, et notamment le fichier Bilan Carbone reçu en cours.

1er scénario : production d'un Mwh par la centrale électrique au fioul.

A. Production du fioul

On veut déterminer tout d'abord la masse de fioul à produire pour obtenir 1 Mwh à l'issue de l'alternateur de la centrale électrique.

On connaît le PCI du fioul : 12 kWh/kg et on suppose le rendement de la centrale à 35%.

On en déduit donc la masse de fioul nécessaire : $m = 1000 \text{ kWh} / \text{rendement} / \text{PCI} = 238 \text{ kg}$

Une fois qu'on connaît la masse de fioul lourd à produire, on se base sur des estimations :

Tableau 1 - Facteurs d'émissions GES "amont" (WTT) des combustibles fossiles liquides renseignés dans la version existante de la Base Carbone ® (source : documentation Base Carbone ®)

	t de gaz par TJ PCI								Total (tCO2e/TJ PCI)
	Extraction et process		Transport		Raffinage		Distribution		
	CO2	CH4	CO2	CH4	CO2	CH4	CO2	CH4	
Pétrole Brut	5,30	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,3
carburéacteur large coupe (jet B)	5,30	0,00	0,90	0,00	8,60	0,00	0,00	0,00	14,9
essence aviation (AvGas)	5,30	0,00	0,90	0,00	8,60	0,00	0,00	0,00	14,9
Kérosène (jet A1 ou A)	5,30	0,00	0,90	0,00	8,60	0,00	0,00	0,00	14,9
Naphta	5,10	0,00	0,88	0,00	4,35	0,00	1,00	0,00	11,4
Huiles de schistes	5,30	0,00	0,90	0,00	8,63	0,00	1,00	0,00	15,9
Gasoil pur	5,30	0,00	0,90	0,00	8,60	0,00	1,00	0,00	15,9
Essence pure	5,20	0,00	0,90	0,00	7,00	0,00	1,00	0,00	14,2
Fioul domestique	5,30	0,00	0,90	0,00	8,60	0,00	1,00	0,00	15,9
Fioul lourd	5,30	0,00	0,90	0,00	5,13	0,00	1,03	0,00	12,5

Par ailleurs, afin de prendre en compte la particularité de El Hierro (une île située à 1500 km de l'Espagne), on estime les émissions induites par le transport en bateau du fioul grâce au fichier Bilan Carbone :

Fret												
	Aérien interne	Fer interne	Aérien externe	Fer externe	Aérien externe	Fer externe	Aérien externe	Fer externe	Aérien externe	Fer externe	Aérien externe	Fer externe
	Entrant	Sortant	Entrant	Sortant	Entrant	Sortant	Entrant	Sortant	Entrant	Sortant	Entrant	Sortant
490 Essence moteurs terrestres	0	0	0	0	148	876	0	0	0,012	0,072	140	83
491 Huile de schiste	0	0	0	0	708	717	0	0	0,071	0,072	823	83
492	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
493 Paille @10% d'humidité	0	0	0	0	46	0	0	0	0,014	0,000	163	0
494 Combustibles solides par défaut	0	0	0	0	30	0	0	0	0,009	0,000	105	0
495	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
496 Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
497	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
498 2 - Fret maritime entrant, cas des porte-conteneurs	Rappel	Rappel	bateau détenu	capacité en m³	tonnes de	Vitesse	Aids volumiq	tonnes.km	kg fioul	carburant	carburant	carburant
499	Emissions	Emissions	contrôlé, etc ?		fioul/jour	(noeuds)	(t/m³) du fret	effectuées	par tonne.km	amont	combustion	combustion
500	kg équ C	kg équ CO2								kg équ C	kg équ C	kg équ C
501	capacité du bateau en exp	500	0	0	18 300	22	16	0,00000	0	0	0	0
502	1000	0	0	0	36 600	32	17,5	0,00000	0	0	0	0
503	3500	0,30	1,11	0	128 100	112	22,5	1,0	357	0,00087	0	0
504												
505 Total	0,30	1,11										

On peut donc calculer les émissions de CO2 induites par l'extraction, raffinage, transport et distribution du fioul lourd :

Étape	Émissions de CO2 en kg pour 238 kg de fioul lourd
Extraction	5,3*3,6/rendement = 54,5
Raffinage	6.5
Transport	9,3+1,1 = 10,4
Distribution	10.6
Total	82

B. Production d'électricité

Une fois qu'on a tenu compte du rendement de la centrale pour calculer la masse de fioul nécessaire, il suffit de déterminer les émissions de CO2 induites par la combustion de cette masse de fioul.

On sait que le fioul lourd a une proportion massique de carbone de 86%. En supposant que l'ensemble de ce carbone participe à la formation de CO2, on obtient :

$$m_CO2_combu = 0,86 * m_fioul * M_CO2 / M_C$$

$$AN : m_CO2_combu = 751 \text{ kg CO2}$$

C. Total

On fait la somme des émissions, on obtient, pour un MWh électrique en sortie de centrale, **832,7 kg de CO2**.

2ème scénario : production d'un MWh par la centrale hydro-éolienne avec un cycle de stockage hydraulique par la STEP

A. Prise en compte du rendement de stockage

On considère que le rendement de stockage par la STEP (= énergie récupérée en sortie de turbine / énergie transmise aux pompes) est de 80%. On en déduit qu'il nous faut produire 1 MWh / 80% = 1,25 MWh grâce aux éoliennes pour avoir notre unité fonctionnelle de 1 MWh électrique en sortie de stockage.

B. Production d'électricité éolienne

Tout d'abord, il faut prendre en compte la production des éoliennes. Il s'agit d'éoliennes de puissance nominale de 2,3 MW.

En s'appuyant sur une publication canadienne, on exploite ces données relatives aux matériaux utilisés dans la construction d'une éolienne de 3MW :

On insiste ici sur la masse très importante de béton et d'acier nécessaire aux fondations de l'éolienne.

Component	Item	Wind turbine 1 (850 kW)		Wind turbine 2 (3.0 MW)	
		Weight	Materials	Weight	Materials
Foundation	Reinforced concrete	495 t	480 t concrete 15 t steel	1176 t	1140 t concrete 36 t steel
Tower	Painted steel	70 t	69.07 t steel 0.93 t paint	160 t	158.76 t steel 1.24 t paint
Nacelle	Bedplate/frame	3.35 t	3.35 t steel	13 t	13 t steel
	Cover	2.41 t	2.41 t steel	9.33 t	9.33 t steel
	Generator	1.84 t	1.47 t steel 0.37 t copper	7.14 t	5.71 t steel 1.43 t copper
	Main shaft	4.21 t	4.21 t steel		
	Brake system	0.26 t	0.26 t steel	1.02 t	1.02 t steel
	Hydraulics	0.26 t	0.26 t steel		
	Gearbox	6.2 t	6.08 t steel 0.062 t copper 0.062 t aluminium	24.06 t	23.58 t steel 0.241 t copper 0.241 t aluminium
	Cables	0.42 t	0.18 t aluminium 0.24 t copper	1.63 t	0.69 t aluminium 0.94 t copper
	Revolving system	1 t	1 t steel	3.87 t	3.87 t steel
	Crane	0.26 t	0.26 t steel	1.02 t	1.02 t steel
	Transformer/sensors	1.79 t	0.894 t steel 0.357 t copper 0.357 t aluminium 0.18 t plastic	6.93 t	3.47 t steel 1.38 t copper 1.38 t aluminium 0.7 t plastic
Rotor	Hub	4.8 t	4.8 t steel	19.2 t	19.2 t steel
	Blades	5.02 t	3.01 t fibre glass 2.01 t epoxy	20.07 t	12.04 t fibre glass 8.03 t epoxy
	Bolts	0.18 t	0.18 t steel	0.73 t	0.73 t steel

Cette publication estime les émissions de CO2 relatives à la production et à l'érection d'une éolienne de MW à 5530 tonnes de CO2. En faisant un ratio pour tenir compte de la puissance un peu moindre de nos éoliennes sur El Hierro, on estime les émissions à 5100 tonnes de CO2 par éolienne de 2,3 MW.

En faisant la somme, on détermine que le bilan carbone d'un MWh électrique en sortie de centrale hydro-éolienne se chiffre à **114 kg/MWh**.

Conclusion :

D'après nos estimations, on trouve donc que pour un MWh électrique sur El Hierro, on passe de 832 kg CO₂ à 114 kg CO₂.

Pour une durée de vie de 20 ans et en considérant 1,6 GWh de consommation électrique par an, on réalise une réduction des émissions de CO₂ de 23 000 tonnes de CO₂, soit **1 150 tonnes par an**.

Sources :

Pour les émissions dues à la production de fioul lourd :

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/8176_impact_carbone_well_to_tank_des_carburants_fossiles.pdf

Pour les matériaux et émissions carbone pour une éolienne de 3 MW : C. Crawford, « Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield », Renewable and Sustainable Energy Reviews, n° 113, pp. 2653-2660, 2009.

Pour le bilan carbone du stockage STEP : H. L. Raadal, L. Gagnon, I. S. Modahl et O. J. Hanssen, « Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power », Renewable and Sustainable Energy Reviews, n° 115, pp. 3417-3422, 2011.

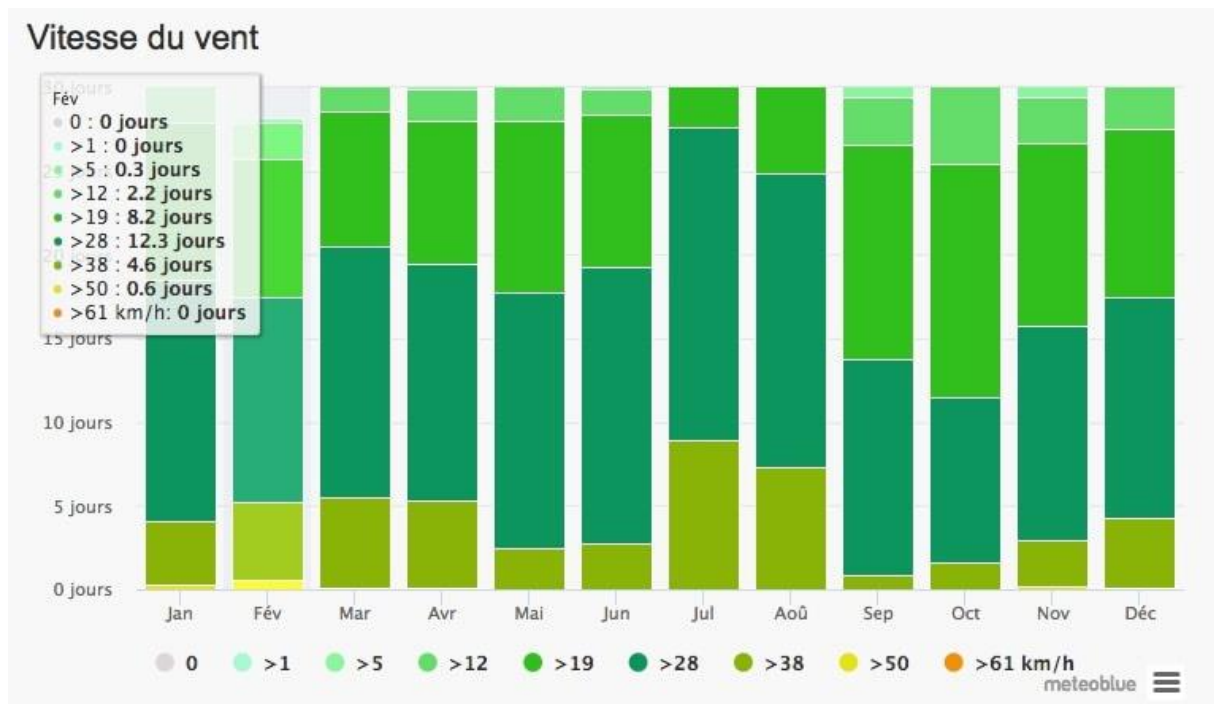
III. Simulation informatique - Algorithme Python

A l'aide des données collectées, nous cherchons à vérifier à quel point l'affirmation d'indépendance énergétique de la part d'El Hierro est vérifiée. Notre démarche est la suivante :

- Détermination des valeurs heure par heure de la vitesse du vent sur une année
- Déduction de la puissance fournie par les éoliennes
- Calcul des rendements de stockage et de destockage

III.a. Vitesse du vent

Nous n'avons pas pu avoir accès aux données précises de vitesse du vent au niveau de l'île d'El Hierro. Nous avons donc dû nous servir des seules données dont nous disposions, à savoir celles du site meteoblue.com, qui se présentent comme suit (ici pour le mois de février) :



Nous avons donc imaginé un modèle pour obtenir des données heure par heure. Les données de départ ne nous donnent que des bornes inférieure et supérieure de vitesse, ainsi que le nombre de journées associé à cette valeur. Nous avons choisi de prendre comme valeur la moyenne des 2 bornes. Par exemple, s'il est indiqué ">5 : 0,3 jours" et ">12 : 2,2 jours", on considère qu'on a 0,3 jours à 9 km/h.

Nous avons ensuite converti ce nombre de jours en nombre d'heures en multipliant par 24, et converti les vitesses en m/s. Ci-dessous les données obtenues pour le mois de janvier :

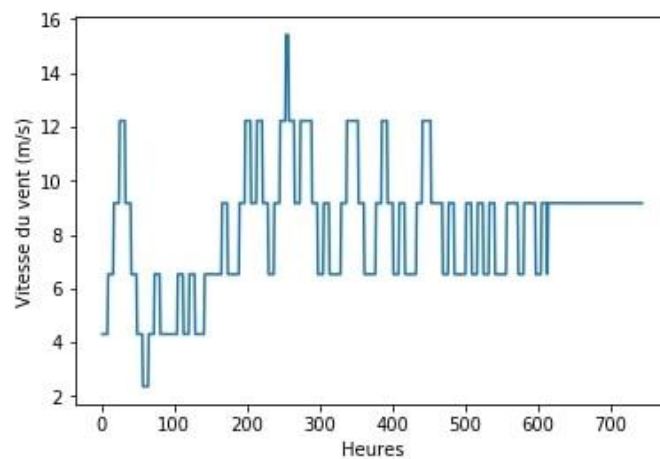
```
[0.833333, 0.000000, 0.000000],
[2.361111, 0.300000, 7.000000],
[4.305556, 2.900000, 70.000000],
[6.527778, 9.400000, 225.000000],
[9.166667, 14.400000, 347.000000],
[12.222222, 3.800000, 91.000000],
[15.416667, 0.200000, 4.000000]]
```

On voit par exemple que le vent a eu une vitesse de 6,52 m/s pendant 9,4 jours, soit 225 heures. Les valeurs ont été arrondies pour obtenir un nombre d'heure entier, facilitant le traitement des données.

Restait alors à répartir ces valeurs de vitesse sur les 744 heures du mois de janvier. Nous avons choisi de diviser le mois en périodes de 8 heures, durant lesquelles la vitesse du vent reste constante. La première valeur est choisie aléatoirement parmi les 6 possibles. Ensuite, elle peut passer à la valeur immédiatement supérieure ou inférieure, avec une probabilité respective de ½. Voici un exemple illustrant cette répartition (la première colonne représentant l'heure à laquelle on se trouve, et la deuxième la vitesse du vent en m/s) :

```
[87.000000, 12.222222],
[88.000000, 12.222222],
[89.000000, 12.222222],
[90.000000, 12.222222],
[91.000000, 12.222222],
[92.000000, 9.166667],
[93.000000, 9.166667],
[94.000000, 9.166667],
[95.000000, 9.166667],
[96.000000, 9.166667],
[97.000000, 9.166667],
[98.000000, 9.166667],
[99.000000, 9.166667],
[100.000000, 6.527778],
[101.000000, 6.527778],
[102.000000, 6.527778],
[103.000000, 6.527778],
[104.000000, 6.527778],
```

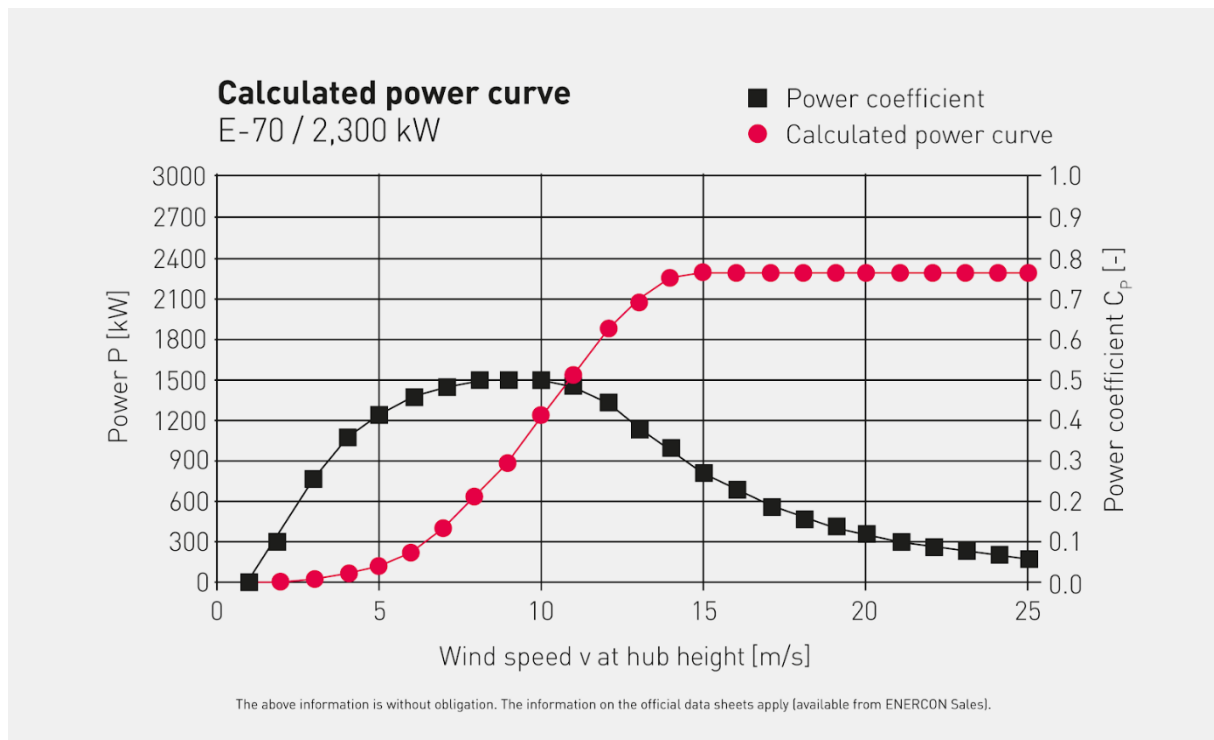
Finalement, on obtient le profil de vent suivant pour le mois de janvier :



Il est à noter que ce modèle est basé sur l'aléatoire, ce qui aura une incidence sur l'exploitation de l'algorithme, qui nécessitera de moyenner sur un grand nombre d'essais.

III.b. Puissance des éoliennes

Pour déduire de la vitesse du vent la puissance fournie par les éoliennes, on exploite la courbe de puissance fournie par le constructeur ENERCON :



La puissance fournie nous est donnée en fonction de la vitesse au niveau du hub de l'éolienne - qui se trouve à 64m d'altitude. Or, les données météorologiques de vitesse du vent sont données à 10m d'altitude. Nous avons donc effectué une équivalence pour estimer la puissance de l'éolienne en fonction du vent à 10m d'altitude. Pour cela, nous avons adopté le modèle suivant :

Roughness Class	Roughness Length (m)	Landscape Type
0	0.0002	Water surface
0.2	0.0005	Inlet water
0.5	0.0024	Completely open terrain with a smooth surface, e.g. concrete runways in airports, mowed grass, etc.
1	0.03	Open agricultural area without fences and hedgerows and very scattered buildings. Only softly rounded hills
1.5	0.055	Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approximately 1250 metres
2	0.1	Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approximately 500 metres
2.5	0.2	Agricultural land with many houses, shrubs and plants, or 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approximately 250 metres
3	0.4	Villages, small towns, agricultural land with many or tall sheltering hedgerows, forests and very rough and uneven terrain

$$v \approx v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

where:

- v = velocity to be calculated at height z
- z = height above ground level for velocity v
- v_{ref} = known velocity at height z_{ref}
- z_{ref} = reference height where v_{ref} is known
- z_0 = roughness length in the current wind direction (see chart below)

Le facteur de rugosité z_0 dépend du type de terrain sur lequel on se trouve. Dans notre cas, nous avons pris $z_0 = 0,03m$, ce qui correspond à un terrain agricole ouvert sans barrières et légèrement vallonné.

On obtient ainsi le tableau de puissance suivant :

Vitesse du vent au niveau du hub (m/s)	Vitesse du vent à 10 m d'altitude (m/s)	Puissance fournie (kW)
0,00	0,00	0,00
3,02	2,29	16,62
4,06	3,08	58,17
4,97	3,76	116,34
5,97	4,53	207,75
6,98	5,29	390,58
7,92	6,00	651,57
8,96	6,79	872,58
10,00	7,58	1229,90
11,01	8,34	1529,10
12,05	9,13	1878,10
12,99	9,84	2061,00
13,96	10,58	2235,50
14,97	11,34	2285,30
16,01	12,13	2277,00
17,05	12,92	2277,00
18,09	13,71	2277,00
19,06	14,45	2277,00
20,00	15,16	2277,00
21,08	15,97	2277,00
22,05	16,71	2277,00
23,06	17,47	2277,00
24,10	18,26	2277,00
25,00	18,95	2277,00

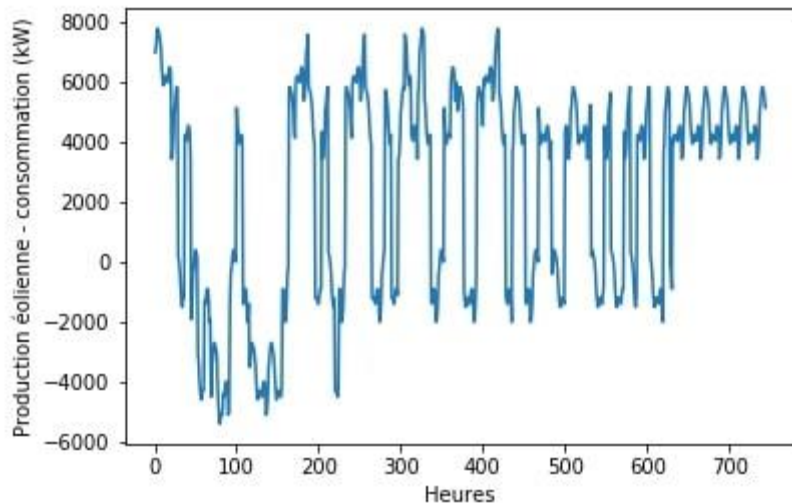
Avec ce tableau de puissance et le modèle de vent construit, nous possédons finalement toutes les données nécessaires à notre expérience. Les données de consommation, obtenues sur le site du gestionnaire de réseau électrique espagnol (REE), nous donnent accès aux consommations heure par heure d'une journée-type de chaque mois (voir tableau ci-dessous pour le mois de janvier)

```

0      4.4
1      4.2
2      3.8
3      3.6
4      3.7
5      3.8
6      4.0
7      4.3
8      4.9
9      5.3
10     5.5
11     5.2
12     5.2
13     5.2
14     5.3
15     5.4
16     5.1
17     4.9
18     4.9
19     5.1
20     6.0
21     5.9
22     5.4
23     4.5
Name: Janvier, dtype: float64

```

En faisant parcourir à notre algorithme les 744 heures qui constituent le mois de janvier nous avons obtenu la courbe (puissance - demande) suivante :



Les valeurs obtenues sont, selon la période, négatives ou positives. Cela justifie le recours au stockage STEP.

III.c. Implémentation du stockage

Nous avons construit notre algorithme autour du système de priorisation d'énergie suivant : dès que cela est possible, on utilise l'énergie issue des éoliennes, en stockant le surplus. Si la puissance produite est insuffisante, on utilise en priorité l'eau stockée pour produire l'électricité nécessaire. Enfin, s'il n'y a pas assez d'eau stockée pour couvrir les besoins, on active la centrale diesel.

Fonctionnement du stockage en pseudo-code :

Si (prod-cons) > 0 :

*niveau = niveau + (prod-cons)*r_stockage*

Si (prod-cons) < 0 :

*niveau = niveau + (prod-cons)*r_destockage*

activ_diesel = True

Avec :

- $r_stockage = 0,4 \text{ m}^3/\text{kWh}$
- $r_destockage = 0,69 \text{ m}^3/\text{kWh}$

Les rendements de stockage et de stockage sont estimés en fonction des performances des différents appareils hydrauliques et des pertes de charge. Leur calcul est détaillé dans la partie suivante :

III.d. Calcul des rendements de stockage et de déstockage

Stockage hydraulique

Deux bassins :

- un à 700 m de hauteur, d'une capacité de 380 000 m³
- un autre 650 m plus bas, à 50 m de hauteur, de capacité 150 000 m³ (*pourquoi plus petit ?*)

Les deux bassins sont reliés par 3 km de conduites.

Au bas, 8 pompes sont installées :

- 6 * 500 W
- 2 * 1500 W

On a donc une capacité de stockage en puissance de 6 MW.

Lorsqu'on relâche l'eau, 4 turbines sont actionnées, pour une puissance maximale de 11.3 MW. (On rappelle que la puissance max délivrée par les éoliennes est de 11.5 MW, et que les besoins de l'île ne dépassent jamais 7 MW.)

Le rendement en énergie de la station de stockage se situe entre 70% et 85%.

Calcul de l'énergie stockée :

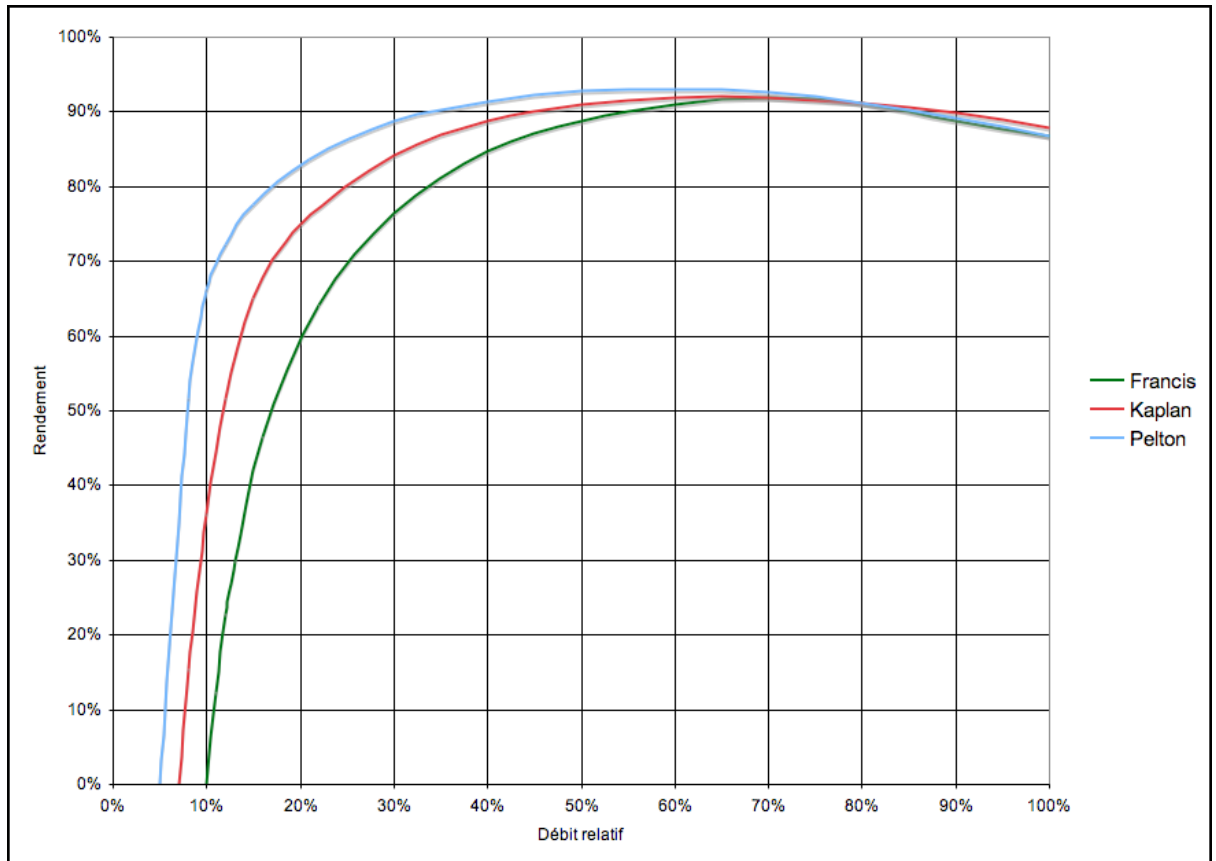
L'énergie stockée est de l'énergie potentielle de pesanteur : $E_{pp} = m * g * h$

Il faut également tenir compte des rendements des différentes étapes :

- pompes : rendement estimé : 0.75
- conduites (avec pertes de charges : $H = H_0 - \Delta H$, avec ΔH hauteur théorique due aux pertes de charges, $H / H_0 = 1 - a * f * L * D^{-5} * Q^2$)
 - avec a un coeff de proportionnalité
 - f facteur de friction
 - L longueur de conduite
 - D diamètre de la conduite
 - Q débit massique
- ou : $\Delta H = 0.0011 * Q^{1.89} * D^{-5} * L$

Estimation : $\Delta H = 0.03$ m : on peut apparemment négliger les pertes de charges.

- turbines



Le débit relatif est le débit relatif au débit nominal.

- alternateur : 95% à 98%
- transformateur : 99%

Première estimation du stockage maximal possible en énergie :

Juste avec la formule de Epp :

$$\begin{aligned}
 E_{pp} &= 150 * 10^6 * 9.81 * 650 \\
 &= 956.5 * 10^9 \text{ J} \\
 &= 265 \text{ MWh}
 \end{aligned}$$

Ce qui correspond à 44 heures à 6 MW, soit 1.8 jours.

Si on applique un rendement global de 80%, on obtient une disponibilité totale max en énergie de 212 MWh. (soit un ratio de 1.4 kWh disponible / m3 pompé)

Rendement de stockage :

$$E_{stockée} = E_{pp} = E_{conso} * r_{stock}$$

$$\text{avec } r_{stock} = 0.75 * 0.95 = 0.71 \text{ (} r_{pompes} * r_{pertescharges} \text{)}$$

$$E_{conso} = E_{pp} / r_{stock} = E_{stockée} / r_{stock}$$

$$= 2.5 \text{ kWh / m3 d'eau stockée : pour un mètre cube monté, on a consommé 2.5 kWh elec.}$$

Rendement de déstockage :

$$\begin{aligned} E_{\text{recup}} &= E_{\text{pp}} * r_{\text{recup}} \\ &= m * g * h * r_{\text{recup}} \\ &= \rho * V * g * h * r_{\text{recup}} \text{ avec } r_{\text{recup}} = 0.95 * 0.9 * 0.97 * 0.99 = 0.82 \\ &\quad (r_{\text{pertescharges}} * r_{\text{turbine}} * r_{\text{alternateur}} * r_{\text{transformateur}}) \end{aligned}$$

On estime avec cette formule que pour 1 m³ d'eau relâché, on obtient 1.45 kWh

Donc avec 150 000 m³ d'eau, à une puissance moyenne de 5 MW, on peut répondre à la demande en électricité pendant 36 heures.

Rendement global :

Le rendement global est $r_{\text{global}} = 0.82 * 0.71 = 0.58$ ($r_{\text{stock}} * r_{\text{recup}}$)

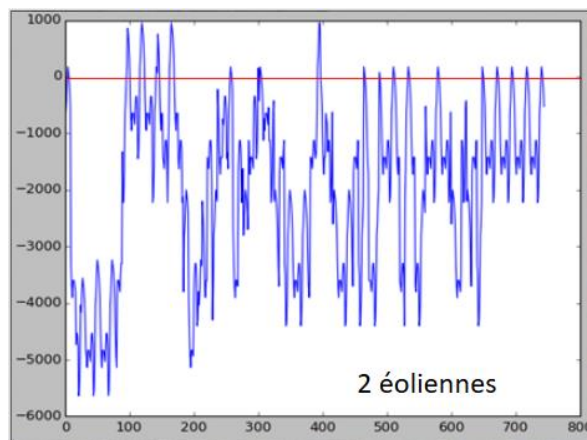
Cela signifie que pour 1 kWh utilisé en entrée de stockage, on peut en retirer 0.58 kWh en sortie.

IV. Résultats et analyse

IV.a.Méthodologie des tests

Afin d'obtenir des résultats statistiquement fiables, chaque chiffre présenté ici est le résultat de 500 simulations indépendantes, ce qui nous permet de les assumer comme représentatifs du comportement du modèle.

(Une limite éventuelle est cependant qu'elles ont toutes été effectuées sur la même machine)



IV.b. Impact du nombre d'éoliennes

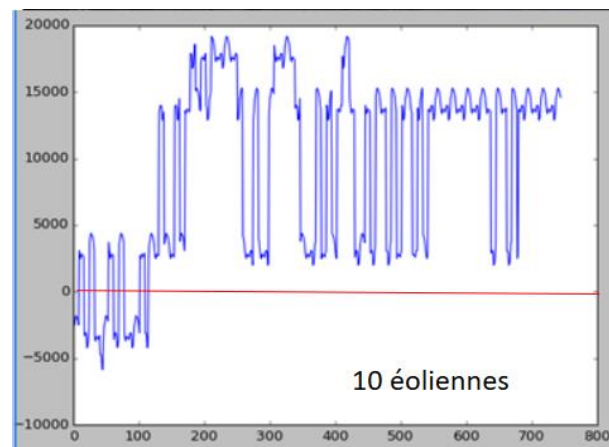
On peut voir qu'au fur et à mesure que l'on augmente le nombre d'éoliennes, la part de l'éolien devient de plus en plus importante dans le mix énergétique. Cependant, cette croissance se fait de plus en plus faible, et un calcul de rentabilité est alors à prendre en compte.

Le choix de 5 éoliennes est alors le plus cohérent, puisque ce nombre correspond (environ) au point d'inflexion de la courbe.

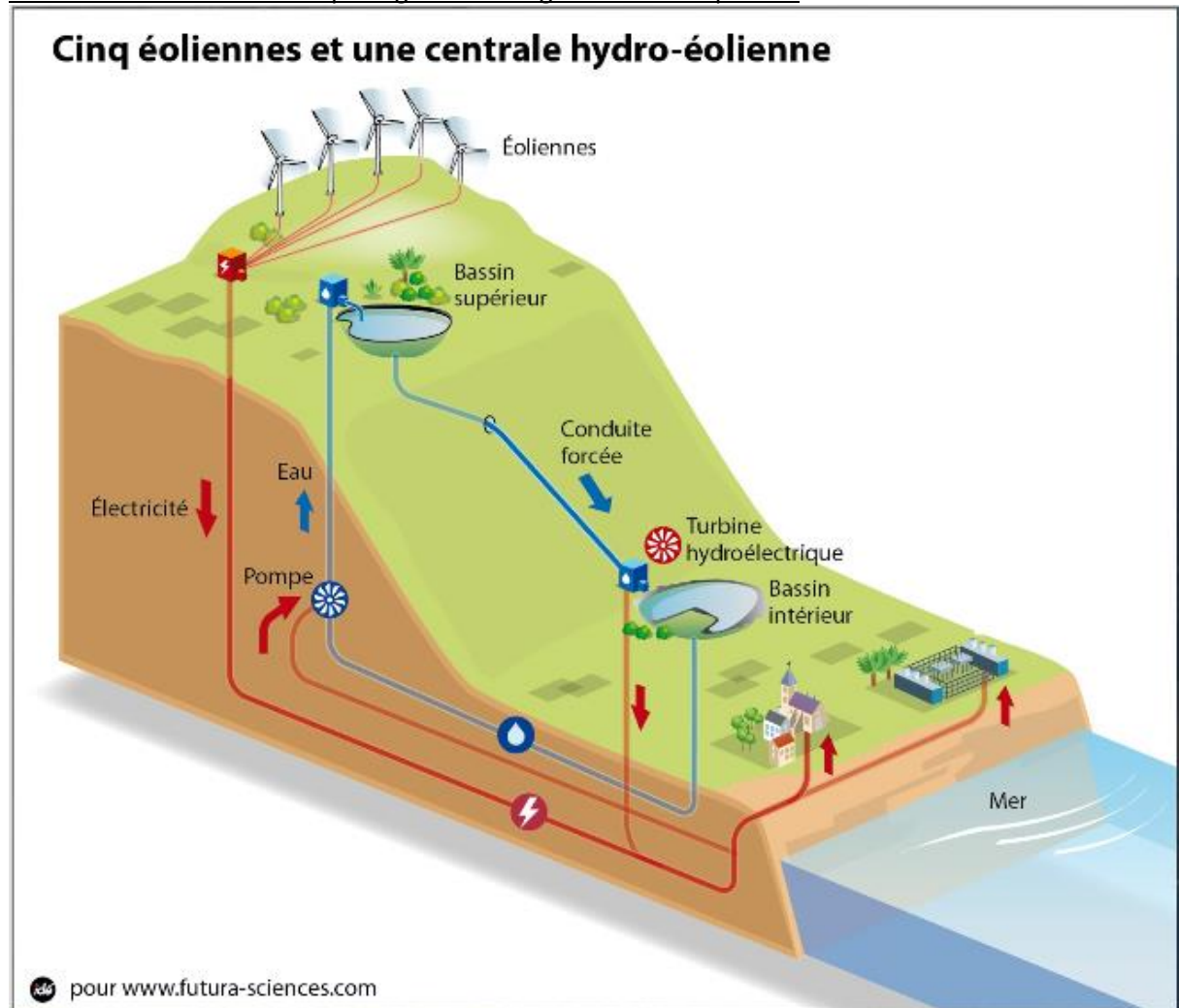
Il est de plus à noter que, quel que soit le nombre d'éoliennes installées, on n'arrive jamais au tout éolien.

(Tests effectués avec le bassin supérieur existant de 250 000 m3)

Nombre d'éoliennes	Temps moyen d'utilisation de la centrale thermique
2	86.4%
3	25%
4	7.4%
5	5.2%
6	3.95%
7	2.9%
8	2.24%
9	1.93%
10	1.8%
20	1.16%



IV.c. Stabilité suivant le remplissage du stockage du bassin supérieur



On peut voir que plus l'on augmente le volume de remplissage du bassin de stockage supérieur, plus l'on s'approche du tout renouvelable.

Seuil (m ³)	Pourcentage des cas où l'on atteint l'autosuffisance
200 000	81.2%
250 000	91.6%
275 000	98%
300 000	100%

Ainsi, un remplissage de bassin de 300 000 m³ permet de se trouver en constante indépendance vis à vis des énergies carbonées.

Cependant, cette valeur n'est quasiment jamais atteinte, car elle demande une production très supérieure à la demande pendant un temps trop long pour survenir de façon régulière.

Le maximum général de remplissage du bassin étant de 250 000 m³, on se retrouve quand même à terme avec un très respectable 91.6% d'énergie totale utilisée issue exclusivement de l'éolien, grâce au stockage via la STEP.

(Tests effectués avec 5 éoliennes, soit le cas présent sur site)

IV.d. Récapitulatif des résultats

On a pu mettre à jour, grâce aux tests effectués, que l'installation d'El Hierro présente un compromis écologico-économique des plus intéressants, et que, même si elle pourrait être encore plus efficace si un bassin plus grand pouvait être construit, elle permet de déplacer la barre des 90% d'énergie renouvelable pour la consommation électrique de l'île.

Il apparaît aussi que la grandeur limitante semble être le remplissage initial du bassin supérieur. Ainsi, une stratégie de pilotage consistant à remplir ce dernier au deux tiers quitte à utiliser du fioul dans un premier temps pourrait permettre, sur le long terme, d'améliorer encore plus la part de renouvelable, une fois cette surconsommation initiale d'énergie carbonée "amortie".

Conclusion

Le système développé sur l'île d'El Hierro fait avant tout office de démonstrateur à grande échelle. S'il ne permet pas de fournir suffisamment d'électricité renouvelable pour rendre l'île auto-suffisante, la production des éoliennes couplée au stockage dans les bassins hydrauliques permet de couvrir une part importante de sa consommation.

Notre algorithme a permis de confirmer les choix de dimensionnement établis (en particulier pour le nombre d'éoliennes), tandis que l'estimation du Bilan Carbone de l'opération valide la pertinence du projet sur le plan écologique.

Reste à présent à espérer que cette expérience ait convaincu les industriels et les pouvoirs publics de dupliquer ce système, notamment dans des espaces isolés disposant de conditions favorables tels qu'El Hierro. Cela n'est pas forcément acquis, au vu du coût de l'opération – non évalué dans cette étude –, largement couvert par le gouvernement espagnol.

In []:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math
np.set_printoptions(formatter={'float_kind': '{:f}'.format})
import random

liste_vitesse_vent = [3,8.5,15.5,23.5,33,44,55.5]
stat_vent_janvier = [0,0.3,2.9,9.4,14.4,3.8,0.3]

def gener_stat_vent(stat_vent):
    A = np.zeros([7,2])
    for i in range(7):
        A[i][0] = liste_vitesse_vent [i]/3.6
        A[i][1] = stat_vent [i]
    return A

vent_janvier_0 = gener_stat_vent(stat_vent_janvier)
vent_janvier_0

# Conversion de vent_janvier_0 en nombre d'heures

def conv_nb_heure(A):
    s = 0
    # On commence par corriger l'erreur d'arrondi
    for i in range (7) :
        # (par ex : la somme des fractions de jours vaut
        parfois 31,1 jours au lieu de 31)
        s += A[i][1]
    erreur = round(s)-s
    k = random.randint(0,6)
    while A[k][1] == 0 :
        k = random.randint(0,6)
    B = np.copy(A)
    B[k][1] += erreur
    C = np.zeros ([7,3])
    for i in range (7):
        C[i][0] = B[i][0]
        C[i][1] = B[i][1]
        C[i][2] = B[i][1]*24
    return C

vent_janvier_1 = conv_nb_heure(vent_janvier_0)
vent_janvier_1

#Arrondi pour obtenir des nombres d'heure entiers

def arrondi(A):
    B = np.copy(A)
    erreur = 0
    for i in range (7):
        x = B[i][2]
        B[i][2] = math.floor (x)
        erreur += x - B[i][2]
    while erreur > 0.1 :
        #l'erreur est un nombre entier, mais j'ai des pro
        blèmes quand je compare à 0
        k = random.randint(0,6)
        #à cause du zéro machine
        B[k][2] += 1
        erreur -= 1
    return B

vent_janvier_2 = arrondi(vent_janvier_1)
```

```

vent_janvier_2

# On peut à présent répartir le vent selon le nombre d'heure correspondant.
# Pour ça, on divise chaque journée en 3 périodes de 8h. Durant une période le v
ent garde une vitesse fixe
# Pour éviter de trop grands écarts, on considère qu'on ne peut passer d'une pér
iode à une vitesse donnée
# qu'à une période à une vitesse immédiatement supérieure ou inférieure

np.set_printoptions(threshold=np.nan)
np.set_printoptions(formatter={'float_kind': '{:f}'.format})

def heure_par_heure(A):
    total_heures = 0
    for i in range(7):
        total_heures += A[i][2]
    total_heures = int(total_heures)
    B = np.copy(A)
    C = np.ones([total_heures, 2])
    for i in range(total_heures):
        C[i][0] = i+1
    h_restantes = total_heures
    curseur = 0
    k = random.randint(0, 6)
    while h_restantes > 0.5 :
        Flag = False
        if k == 0 :
            k += 1
            Flag = True
        if k == 6 :
            k -= 1
            Flag = True
        if ((k > 0) and (k < 6)) and (Flag is False) :
            r = random.choice([-1, 1])
            k += r
        x = int(B[k][2])
        if x < 8 :
            for i in range(curseur, curseur + x) :
                C[i][1] = B[k][0]
            curseur += x
            h_restantes -= x
            B[k][2] -= x
        if x >= 8 :
            for i in range(curseur, curseur + 8) :
                C[i][1] = B[k][0]
            curseur += 8
            h_restantes -= 8
            B[k][2] -= 8
    return C

vent_janvier_final = heure_par_heure(vent_janvier_2)
vent_janvier_final

plt.plot(vent_janvier_final[:, 0], vent_janvier_final[:, 1] )
plt.xlabel('Heures')
plt.ylabel('Vitesse du vent (m/s)')

plt.show()

# Consommations en MW

```



```

import gspread
from oauth2client.service_account import ServiceAccountCredentials
import numpy as np
import pandas as pd

scope = ['https://www.googleapis.com/auth/drive']

credentials = ServiceAccountCredentials.from_json_keyfile_name('ElHierroImportat
ion419aa2837bbd.json', scope)

gc = gspread.authorize(credentials)
wks = gc.open('Données à importer dans Python').sheet1

A = wks.get_all_records()

Jour = np.zeros([24,2])
Jour
for i in range(24) :
    Jour[i][0] = i+1

df = pd.DataFrame.from_dict(A)
df_cons = df['Janvier'].str.replace(',', '.').astype(float)
print(df_cons)

df_vent_eol = df['Vitesse du vent à 10 m d altitude (m/s)'].str.replace(',', '.')
).astype(float)
print(df_vent_eol)

df_puis_eol = df['Puissance fournie (kW)'].str.replace(',', '.').astype(float)
print(df_puis_eol)

def prodeolien(vent): #passer du vent à la prod electrique (pour 1 éolienne)
    flag = False
    k = 0
    while flag is False and (k <= 15) :
        if (df_vent_eol[k] <= vent) and (df_vent_eol[k+1] >= vent):
            flag = True
        else :
            k += 1
    if k >= 14:
        return df_puis_eol[14]
    else :
        x1 = df_vent_eol[k]
        x2 = df_vent_eol[k+1]
        y1 = df_puis_eol[k]
        y2 = df_puis_eol[k+1]
        return (y1 + (y2-y1)/(x2-x1) * (vent-x1))

rdmstock = 0.4
rdmrecup = 0.69

def stockage(niveau, limites, vent, heure): #savoir si on peut stocker/récupérer
de l'électricité, et jusqu'à quel point."
    prod = prodeolien(vent)*5 #on a 5 éoliennes
    conso = df_cons[heure]*1000
    demande = prod-conso
    Flag = False #devient True quand on devra utiliser la centrale diesel
    if demande == 0 :
        return (demande, niveau, 0, Flag)

```

```

if demande > 0 : #cas où on veut stocker
    volumsup = demande*rdmstock
    niveau += volumsup
    excès = 0
    if niveau > limites[1]:
        niveau = limites [1]
        excès = (niveau - limites[1])/rdmstock
    return (demande, niveau, excès, Flag)
if demande < 0 : #cas où on veut récupérer de l'énergie
    volumminus = demande*rdmrecup
    niveau += volumminus #déjà en négatif
    manque = 0
    if niveau < limites[0]:
        niveau = limites[0]
        manque = (limites[0] - niveau)/rdmrecup
        Flag = True
    return (demande,niveau, manque, Flag)

def résultats (niv,lim):
    eol = np.zeros([744,4])
    dem = 0
    nb_h_diesel = 0
    nb_h_manque = 0
    for i in range(744):
        eol[i][0] = i+1
        h = i%23
        vent = vent_janvier_final[i][1]
        eol[i][1] = stockage(niv, lim, vent, h)[0]
        eol[i][2] = stockage(niv, lim, vent, h)[1]
        eol[i][3] = stockage(niv, lim, vent, h)[2]
        dem += eol[i][1]
        if stockage(niv, lim, vent, h)[3] is True:
            nb_h_diesel += 1
        if eol[i][1] < 0 :
            nb_h_manque +=1
        niv = eol[i][2]
    plt.xlabel('Heures')
    plt.ylabel('Niveau du bassin de stockage (m^3)')
    plt.plot(eol[:,0], eol[:,2])
    plt.show()
    print ("La demande totale (production - consommation) est de :", dem, "kW" )
    print ("La consommation est supérieure à la production pendant", nb_h_manque
, "heures")
    print ("La centrale diesel devra être activée pendant", nb_h_diesel, "heure
s")

résultats (0,(0,500000))

```