



L'hydrogène issu de l'éolien en mer et usages Power-to-X : Complémentarités inter-sectorielles ou coûts de transaction additionnels ?

Rodica LOISEL, Juliette MOREL, Lionel LEMIALE

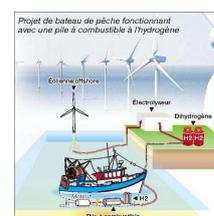
LEMNA, Nantes Université

Sciences économiques

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

PLAN

- Contexte général
- Méthode de dimensionnement du parc éolien + H2
- Résultats
- Prédiction de l'intermittence éolienne en mer :
 quelle fiabilité ?
- Politiques publiques
- Conclusions



*Loisel R, C. Simon, M. Woznicki, M. Guérineau, L. Baranger, E. Schaeffer, L. Lemiale, G. Le Solliec.
Green hydrogen multi-market optimisation: real complementarities or temporary transaction costs?
IEEE 978-1-7281-2317-2/19/ 2019.*

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Contexte général : l'hydrogène vert pour quels usages ?

Marché mondial H2 61 Mt. Objectifs 2050 : 180 Mt_{IRENA}, 650 Mt_{Hydrogen Council}

France 1 Mt H2 (industrie, 2018). Objectifs : 10% **H2 vert** en 2023, 20-40% en 2028 (Stratégie Nationale, 2018).

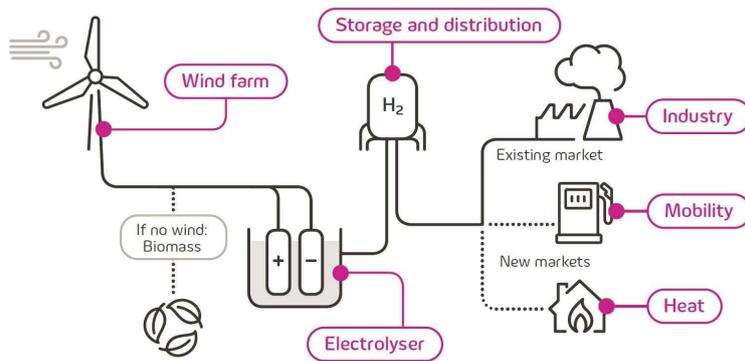


Fig 1. Concept Power-to-X

<https://news.rwe.com/rwe-and-innogy-investigate-production-of-green-hydrogen-in-the-netherlands/>

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Actuellement : H2 mono-usage (peu de récupération résiduelle)

Verrous :

- **Démarrage lent** de l'industrie H2, malgré la maturité des équipements (TRL 9).
- Actuellement, **pas d'économies d'échelle** : risque de surdimensionnement faute d'usages.
- Investissements orientés vers les projets immatures (TRL bas) (100 M€/yr, ADEME).

Solution: adopter H2 par vagues, les transports en priorité :

1. T Maritime (stratégie OMI CO₂, NO_x, SO_x, particules).
 2. Trains (diesel). Routier (bus, VUL, PL). Aviation.
- Plan national H2 : 5,000 VUL pour 2023, 200 PL, 100 stations H2. (50,000 VUL, 2,000 PL pour 2028).

Mono-usage Projets en France:

- **Power-to-Mobility**: train (Alstom), *Febus* parc bus H2-PV; *Zéro Emission Valley stations* des VL à H2 vert; *Hype* parc taxis Paris; *Navibus* Jules Vernes H2 urbain, etc.
- **Power-to-Power**: Myrte PV-H2-Réseau.
- **Power-to-Industry**: Vabhyogaz3 (Albhyon-Hera industrial) H2 issu du biogaz.
- **Power-to-Gas**: *Gryhd* + *Jupiter 1000* H2 dans le réseau de gaz naturel (faible concentration) pour bâtiments, sans modifier l'infrastructure initiale. En projet: **double usage** (station bus, **hythane**); Captage du Carbone des sources industrielles concentrées (méthanation - gaz de synthèse, **syngas**).

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Caractéristiques de la demande d'H2 : différentiation du produit H2 par segment de marché

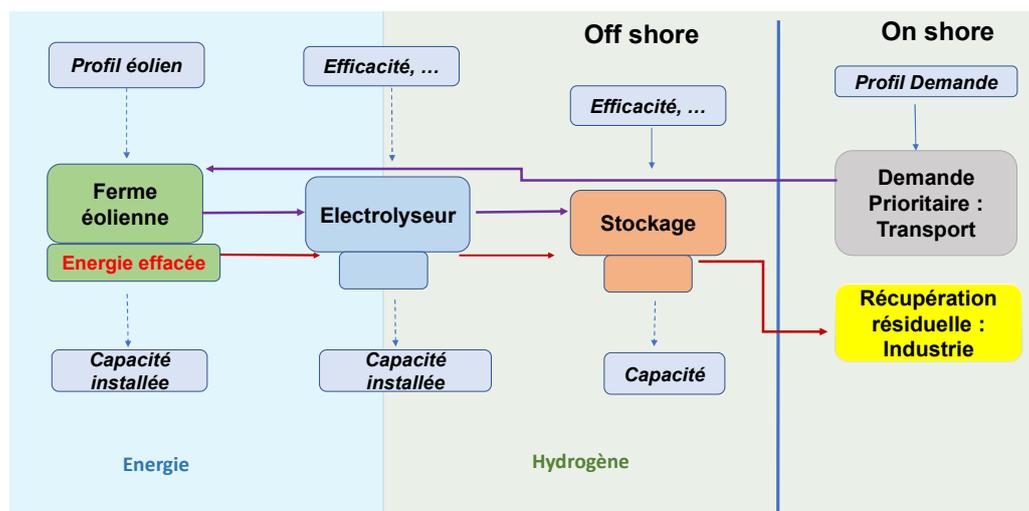
- Diversité des usages implique l'**hétérogénéité** de l'H2 :
 - **Taille** des usages / demande : H2 en vrac, industriel vs en détail pour le stockage /secteur élec;
 - **Type** de demande : compression forte pour sect transport vs faible sect élec + chauffage;
 - **Fréquence** de distribution : quasi-quotidienne pour station service vs en continu acier, métallurgie.
- Régulations distinctes selon le segment de marché :
 - Production H2 – Directive Européenne Seveso III (2012/18/EU)
 - Permis, licences pour les sites classes pour la protection de de l'environnement (ICPE 4715):
 - Pas de prévision particulière pour un stockage < 100 kg H2,
 - **déclaration** nécessaire pour un stockage entre 100-1 000 kg H2,
 - **permis** ou **autorisation** et une étude d'impact des risques pour stocker > 1 t H2,
 - **autorisation pour stocker > 50 t of H2.**

Peu de complémentarités entre segments de marché H2.

Power-to-X implique des coûts de transaction liés à la réglementation et à l'harmonisation des produits H2.

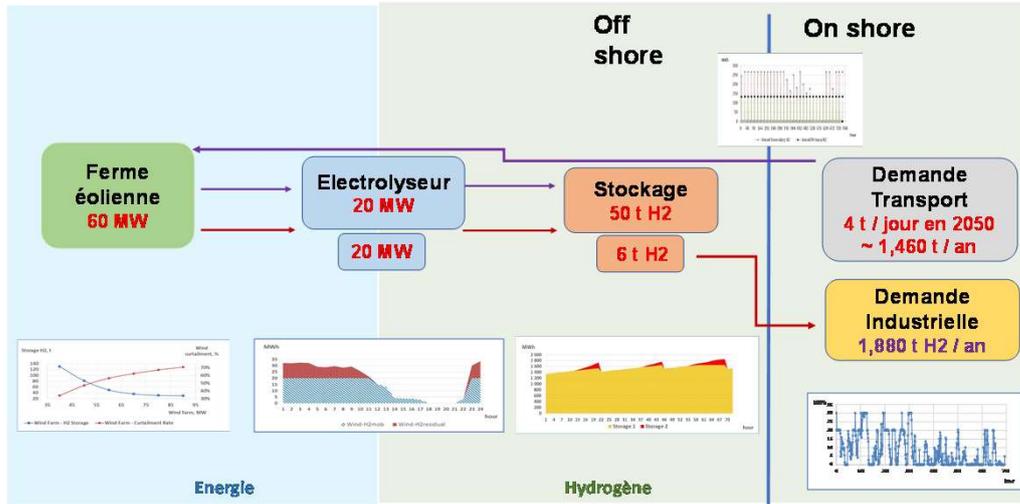
Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Cas d'étude : ferme éolienne en mer dédiée à la production de l'H2



Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Résultat modèle MHWIND 2050: dimensionnement H2-Eolien en mer



Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

2. Méthode : le modèle MHWIND

1. La demande (Power-to-X = Demande Prioritaire + Demande Secondaire)

Demand Prioritaire

Transport maritime, routier, aviation.

Demand Secondaire / Résiduelle

Industrie (chariots élévateurs, ammoniac), énergie (gaz, élec), bâtiment (chaleur). T&D < 300 km

Méthode

Parc éolien + Electrolyseur dimensionnés pour satisfaire la Demande Primaire.

Demande Résiduelle change la taille et l'usage du stockage et du transport H2, en fonction de l'arbitrage entre la fréquence de livraison et la taille du stockage H2.

Hypothèses implicites

4t H2/ jour en 2050 : les politiques de régulation, les codes et standards existent.

Renouvelables : 100% H2 vert en France si ENR = 60% du mix élec (~2035, Ademe 2018).

FR	
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	133
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0
25	0
26	0
27	0
28	0
29	0
30	133.3
31	0
32	0
33	0
34	0
35	0
36	0
37	0
38	0
39	0
40	0
41	0
42	0
43	0
44	0
45	0
46	0
47	0
48	0

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Dimensionnement de l'infrastructure tiré par la Demande

Equations – Demande Prioritaire:

Eq 1: Objective function - resource waste minimization:

$$Excess_s = \sum_1^{B_s} Min_{d,h} \sum_{h=1}^{d=t_s} Wind_{d,h} - WindH2_{d,h}$$

Eq 2: Dynamics of the storage reservoir dedicated to the primary H2 supply:

$$RP_{d,h} = RP_{d,h-1} + PS_{H2_{d,h}} - D1_{H2_{d,h}}$$

Eq 3: Hydrogen production:

$$PS_{H2_{d,h}} = WindH2_{d,h} \cdot eff$$

Eq 4: The wind farm capacity:

$$K_W = Max_{d,h} (WindH2_{d,h})$$

Eq 5: The electrolyzer capacity:

$$K_{El} = Max_{d,h} (PS_{H2_{d,h}})$$

Constraints

Eq 6: The capacity of storage for primary H2 supply:

$$K_{RP} = Max_{d,h} (RP_{d,h})$$

Eq 7: The capacity of the cargo:

$$K_C = Max_{d,h} (D1_{H2_{d,h}})$$

Eq 8: Conditions that reservoirs are filled-in up to their capacity:

$$RP_{d,h} \leq K_{RP}$$

$$RS_{d,h} \leq K_{RS}$$

Eq 9: The electrolyzer works in the range [0.05 - 1] of its rated power:

$$WindH2_{d,h} > \frac{0.05 \cdot K_{El}}{eff}$$

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

3. Résultats

3.1. Quelle capacité pour le parc éolien ?

Choix de la taille du parc éolien :
fonction du stockage H2 + du taux
d'effacement d'énergie acceptable
pour l'opérateur éolien.

Un marché H2 à faible demande :
fort taux d'effacement, faible
attractivité pour un opérateur
éolien.

Plus la taille de la ferme éolienne
est élevée, plus le stockage H2 est
faible, et plus l'effacement d'éolien
est élevé (> 30%).

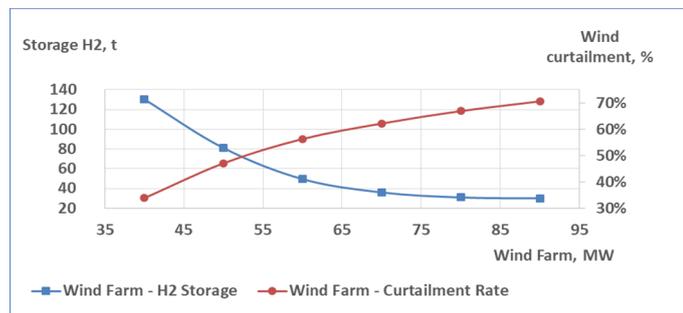


Fig1. Capacité du parc éolien VS stockage H2 en 2050

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

3.2. Résultats des échéances par port, à taux d'effacement éolien de 51%

- 2 t H₂ /jour en 2040 au port de Saint Nazaire : Parc éolien = 30 MW (3 turbines X10 MW).
- **Les Décideurs publics** doivent dimensionner **ex-ante** la taille de la demande d'H₂ : ajuster ex-post la taille du parc éolien devient coûteux, le chantier en mer est un investissement global, pas à la marge de la demande additionnelle.

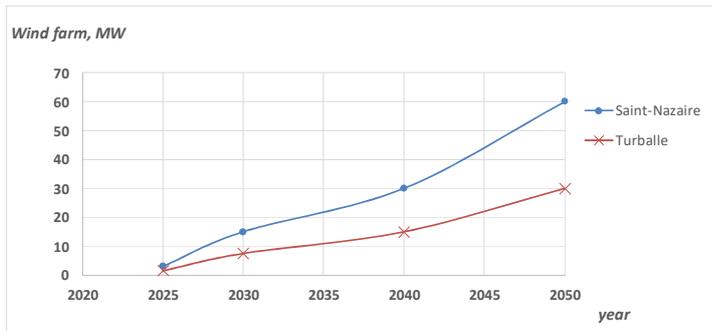


Fig2. Capacité du parc éolien par port, tirée par la demande d'H₂

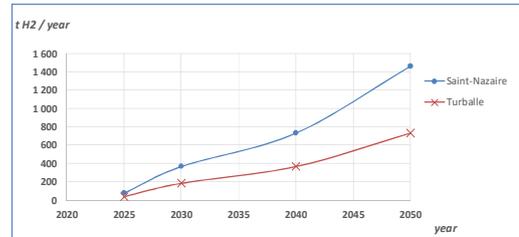


Fig3. Demande H₂ de transport maritime par port, t H₂ / an

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

3.3. Comment dimensionner l'électrolyseur ?

L'énergie éolienne est dédiée à la production H₂-to-mobility; le résidu éolien est ensuite affecté à la demande H₂ secondaire.

L'électrolyseur est dimensionné par le vecteur H₂-to-mobility = on minimise la capacité de l'électrolyseur qui satisfait la demande sur l'année ; on peut ensuite sous-dimensionner pour augmenter le taux d'usage de l'électrolyseur.

Fig: Besoin d'une capacité additionnelle de l'électrolyseur pour récupérer toute l'énergie éolienne.

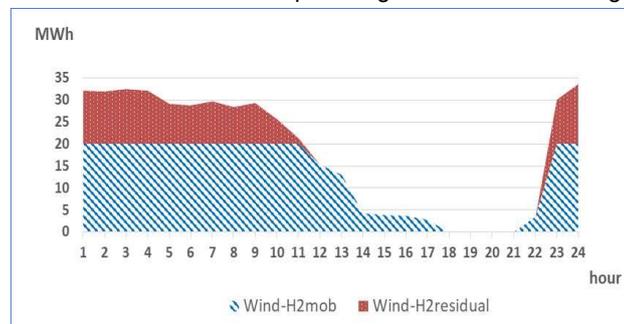


Fig4. Production H₂ couplée au parc éolien de 60 MW, par usage (Demande Prioritaire + Résiduelle) sur une journée

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

3.4. Quel usage du surplus éolien ? (1/3)

Eviter l'effacement éolien nécessite une **infrastructure additionnelle électrolyseur-stockage-transport**.

La taille de l'électrolyseur additionnel depend des statistiques en termes de :

- fréquence
- amplitude.

Table. H2 résiduel annuel, par intervalle de potentiel

H2 Production, MWh	Number of events	t H2 / year
(0, 10)	6 030	1 071
(10, 20)	2 098	469
(20, 30)	608	158

Un électrolyseur de 20 MW pourrait répondre à la demande de transport (H2-to-mobility). Avec 10 MW en plus on pourrait éviter l'effacement de 1,071 t H2. La taille maximale de l'électrolyseur serait de 40 MW pour absorber tout le surplus éolien (taux d'usage 16% pour 40 MW VS 28% pour 20 MW).

Les critères de sélection dépendent du taux d'effacement de l'éolien accepté socialement en cas de tarif d'achat garanti ou par l'investisseur s'il est sujet au marché; et des objectifs de l'opérateur H2 en termes de coût ou de taux d'usage; et de la planification de l'espace maritime ou encore des opportunités de marché de la demande résiduelle.

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

3.4. Quel usage du surplus éolien ? (2/3)

La taille du **stockage additionnel** depend de trois facteurs :

- le potentiel éolien horaire,
- l'état du stockage net (après satisfaction de la demande de transport),
- la fréquence de passage du navire de transport H2 (qui lui affecte l'état du stock).

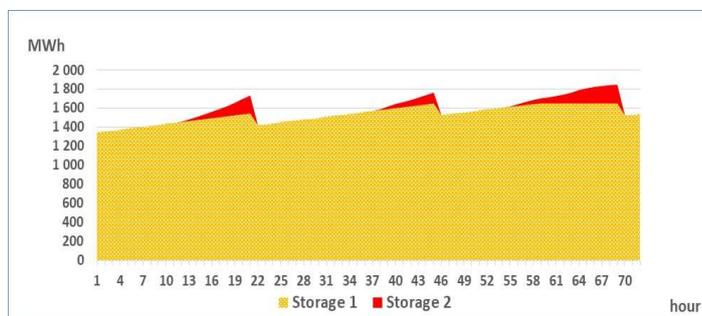


Fig5. La dynamique du stockage pour la demande primaire H2 (Storage 1) et du stockage additionnel (Storage 2)

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

3.4. Quel usage du surplus éolien ? (3/3)

La capacité du navire H2 nécessaire pour satisfaire la demande quotidienne H2 : 4 t H2 / day (or 133 MWh).

Doubler la capacité du navire ou la fréquence de son passage (deux fois par jour) peut faire diminuer la taille du stockage.

Fig. A noter l'**intermittency de l'H2 résiduel** (=due à l'éolien) est repercutée sur l'usage du navire utilisé en priorité pour la **demande primaire qui nécessite de la régularité**.

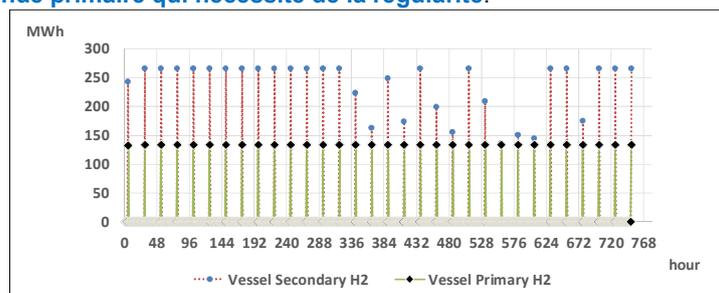


Fig6. Traffic quotidien du navire H2 pour la demande de Transport (Vessel Primary H2) et pour l'H2 résiduel (Vessel Secondary H2), sur un mois

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

3.5. L'intermittence de l'éolien est repercutée sur la Demande Résiduelle

L'intermittence de l'éolien est repercutée sur l'électrolyseur, le stockage H2 et l'usage du navire H2.

Le marché H2 résiduel est le dernier maillon de la chaîne H2 qui supporte l'intermittence.

P-to-H2 résiduel = c'est la variable d'ajustement qui optimise l'économie de l'éolien et de l'infrastructure H2.

Verrou: identifier **les consommateurs flexibles** en termes de temps de livraison et de volume (irrégulier). Ou installer du **stockage à terre** pour assurer la livraison régulière pendant une journée ou plusieurs jours.

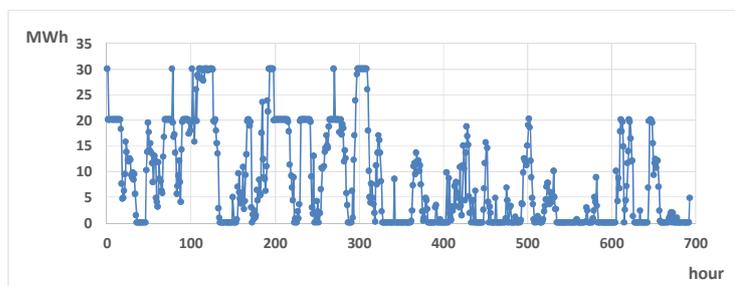
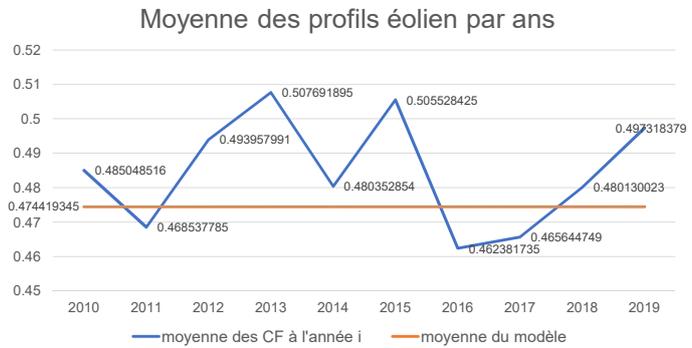
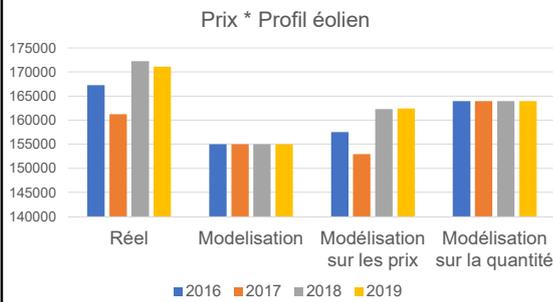


Fig7. H2 résiduel pendant un mois

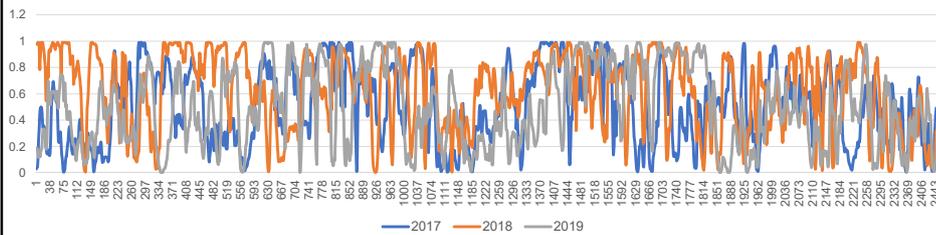
Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

4. Prédiction de l'intermittence éolienne en mer: quelle fiabilité ?

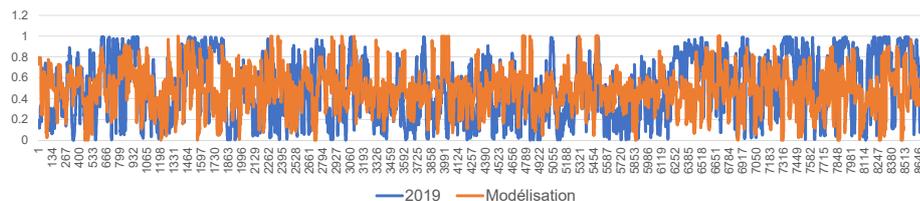


Certaines années auront un profil éolien moyen à l'heure beaucoup plus élevé que d'autre. La moyenne horaire du modèle équilibre ces différences.

Evolution du **profil éolien** de janvier à avril de 2017 à 2019



Evolution du **profil éolien** par heure sur une année – Comparaison entre modélisation et données réelles de 2019



Fluctuations différentes, valeurs qui peuvent se retrouver à l'opposé => La modélisation du profil éolien ne pourra pas être totalement fiable.

**Moyenne du profil éolien en 2019 : 49.73%
Moyenne du profil éolien sur la modélisation : 47.44%
=> Différence de 2.29% entre le réel et la modélisation**



Méthode

1. Estimation du profil éolien

$$\widehat{CF}_t = \underbrace{-3.10^{-6}t + 0,499}_{\text{Tendance}} + \underbrace{\left(\frac{\overline{CF}_t}{\overline{CF}_m} - 1\right)}_{\text{Saisonnalité}} \times \overline{CF}_m + \underbrace{(\lambda_i \times P^{t[i]})}_{\text{Marge d'erreur}} \times M$$

2. Estimation du prix spot

$$\widehat{P}_t = \underbrace{-1,2.10^{-3}t + 44,569}_{\text{Tendance}} + \underbrace{\left(\frac{\overline{CF}_m}{\overline{CF}} - 1\right)}_{\text{Saisonnalité}} \times \overline{CF} + \underbrace{\varepsilon_t}_{\text{Marge d'erreur}}$$

Tendance : Méthode d'ajustement des moindres carrées (modèle de type linéaire). *Excel*

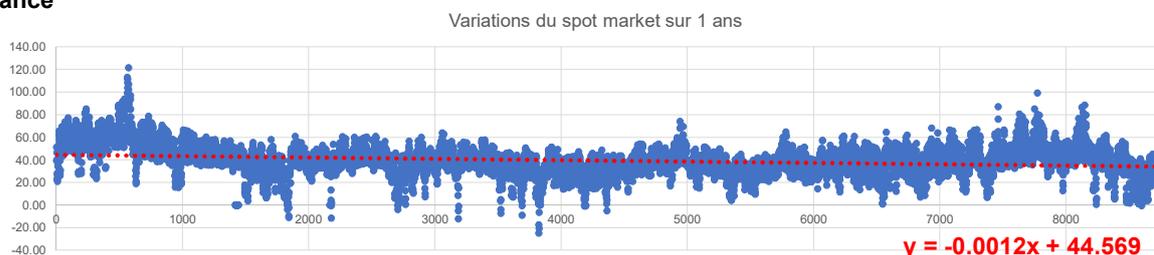
Saisonnalité : De combien dépasse-t-on la moyenne mensuelle à une heure donnée ? *Excel*

Terme d'erreur : Partie aléatoire du modèle. *Python*

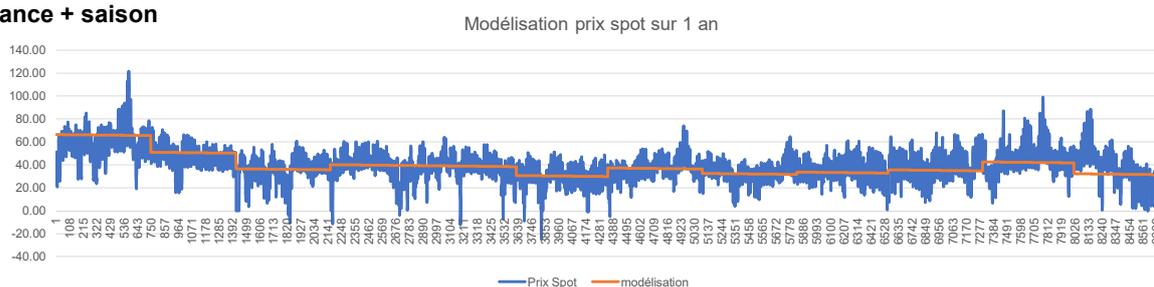
Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Méthode

Tendance



Tendance + saison



Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

5. Politiques publiques

Le dilemme de l'œuf et de la poule : le consommateur n'investit pas tant que l'infrastructure n'existe pas, et inversement, le producteur ne démarre pas une affaire tant qu'il n'y a pas de demande, donc de garanties de vente.

Offre

Beaucoup d'acteurs : industrie des composants, opérateur T&D H2, constructeurs voitures, intermédiaires H2.

Aversité au risque des investisseurs pour un déploiement à grande échelle : manque d'opportunité d'affaires à court-terme. Facteurs de viabilité commerciale :

Contrats de long-term (PPA) pour sécuriser les revenus,

Marché à grande échelle, gigawatts, pour réduire les coûts, améliorer la densité énergétique du stockage, la vie technique, BoP.

Demande

Usager : local (< 100-300 km) gros consommateurs industriels et de transport.

Priorité aux secteurs générateurs d'économies d'échelle et faibles coûts d'infrastructure : raffineries, métallurgie, chimie, production de méthanol, bâtiments, transport (PL, navires, bus, trains).

H2 hétérogène par usage (qualité et infrastructure) : priorisation stratégique des segments de marché H2.

Déploiement de l'H2 par vagues d'opportunité (volume).

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

Conclusions

- **Contrats fixes** (volume + délais de livraison): on surdimensionne l'offre. L'intermittence de l'éolien exacerbe le problème.
- La perte d'énergie éolienne (> 30% du potentiel) = **profil irrégulier**. Quels marchés ? :
 - **Marchés liquides, profonds, capables d'absorber une offre intermittente à tout moment** (marché spot d'électricité, de gaz naturel).
 - Besoin de **contrats flexibles** sur le segment *day-ahead*.
 - **Exploiter l'infrastructure existante** (réseau gaz, T&D élec) + nouveaux besoins (H2 T&D, PAC, etc).

P-to-H2 business model = **transactions complexes**, longue chaîne de parties prenantes, mentions légales, permis et autorisations, compétences multiples par marché visé et par trading. Coûts de transaction élevés qui peuvent dépasser les économies d'échelle obtenues d'un usage varié de l'H2 : **restreindre le modèle d'affaires à un seul usage**, au moins pendant la période de maturité de la demande.

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023

L'hydrogène issu de l'éolien en mer et usages Power-to-X



Contact

Rodica LOISEL
Rodica.loisel@univ-nantes.fr

Juliette MOREL
Juliette.morel@etu.univ-nantes.fr

Lemna
 Laboratoire d'Économie et de
 Management Nantes-Atlantique

Journées scientifiques de Nantes Université - 5 juin 2023