

# MODÉLISATION ET DIMENSIONNEMENT DE STATIONS DE RECHARGE DE BUS À HYDROGÈNE – APPLICATION À LA RÉUNION –

*Agnès FRANÇOIS<sup>a,b</sup>, Robin ROCHE<sup>a</sup>, Dominique GRONDIN<sup>b</sup>, Michel BENNE<sup>b</sup>*

*<sup>a</sup> UTBM, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France*

*<sup>b</sup> ENERGY-lab, Université de La Réunion, Saint-Denis, France*

*agnes.francois@utbm.fr*



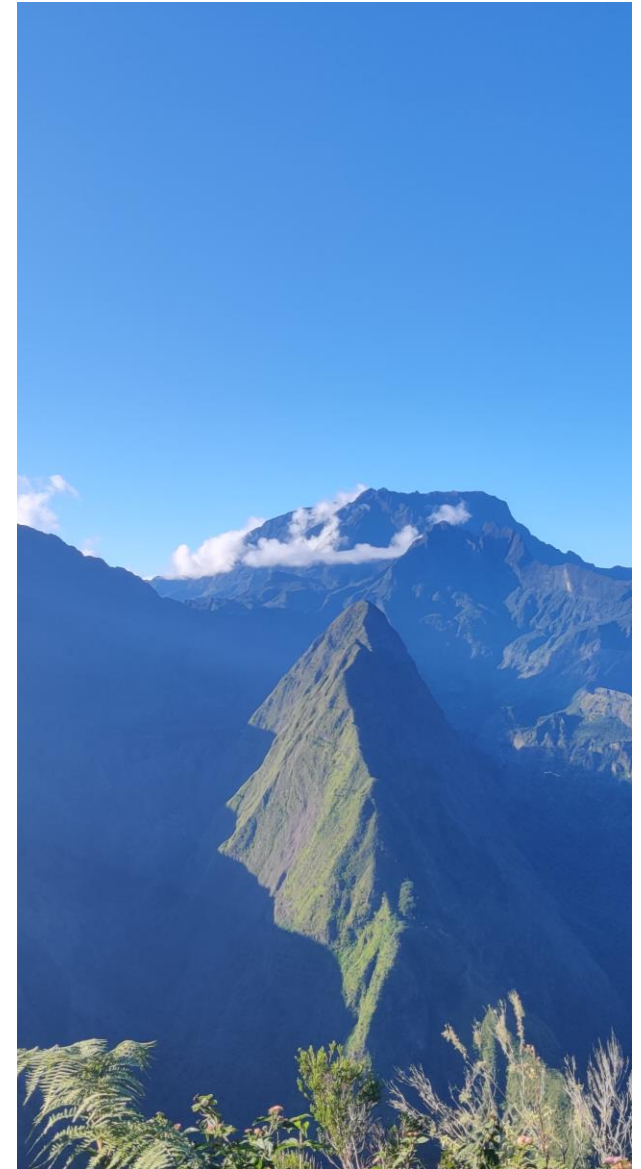
# PLAN

- Positionnement de l'étude
- Contexte
- Méthodologie suivie
- Résultats
- Limites et perspectives



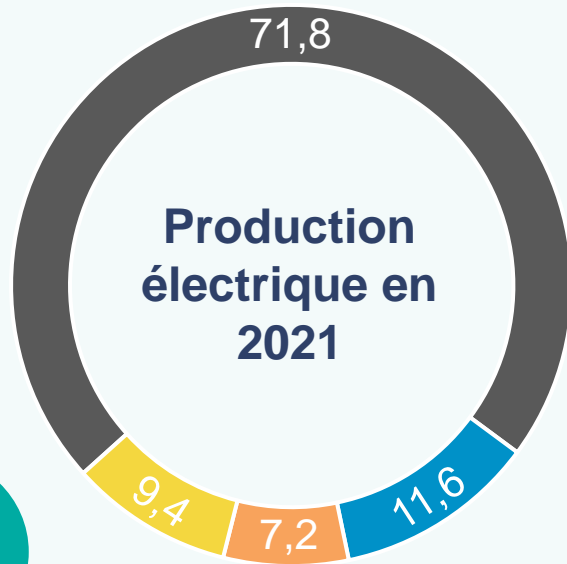
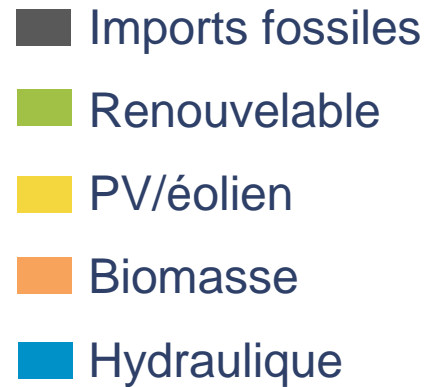
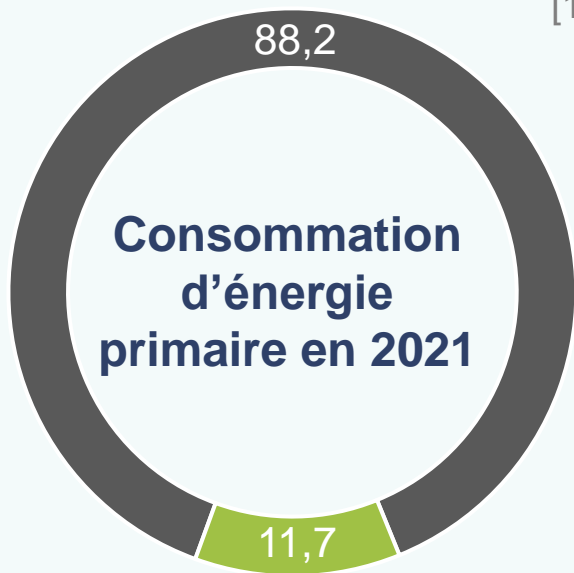
# POSITIONNEMENT ET OBJECTIFS

- Etude locale d'une flotte de bus à hydrogène
- Etude de l'intégration de l'hydrogène à l'échelle de l'île
- Faisabilité d'un réseau de bus à hydrogène à long terme sur l'île
- Quels impacts sur le réseau électrique de l'île ?
- Quelle configuration pour les stations de recharge ?



# CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE RÉUNIONNAIS

[1]



- Aucune interconnexion
- Imports de matières premières par bateau
- Dépendance aux véhicules individuels
- Demande en chaleur négligeable
- Potentiels énergétiques non exploités : géothermie, énergies de la mer, éolien offshore
- Objectif d'autonomie énergétique 2030

# CONTEXTE GÉNÉRAL BUS

- Réglementation : 100 % bus à faibles émissions à partir de 2025
- Bus à hydrogène : 0,05 % du parc français en 2020
- Recharge en hydrogène plus rapide
- Bus à hydrogène avec plus d'autonomie

[2]

- 5 réseaux urbains

- 1 réseau régional



- + 600 bus en exploitation en 2017

- + 5 300 km de lignes (2017)

- + 33 000 000 km parcourus en 2017

- 1,9 % de la consommation du secteur du transport

[3]

# MÉTHODOLOGIE



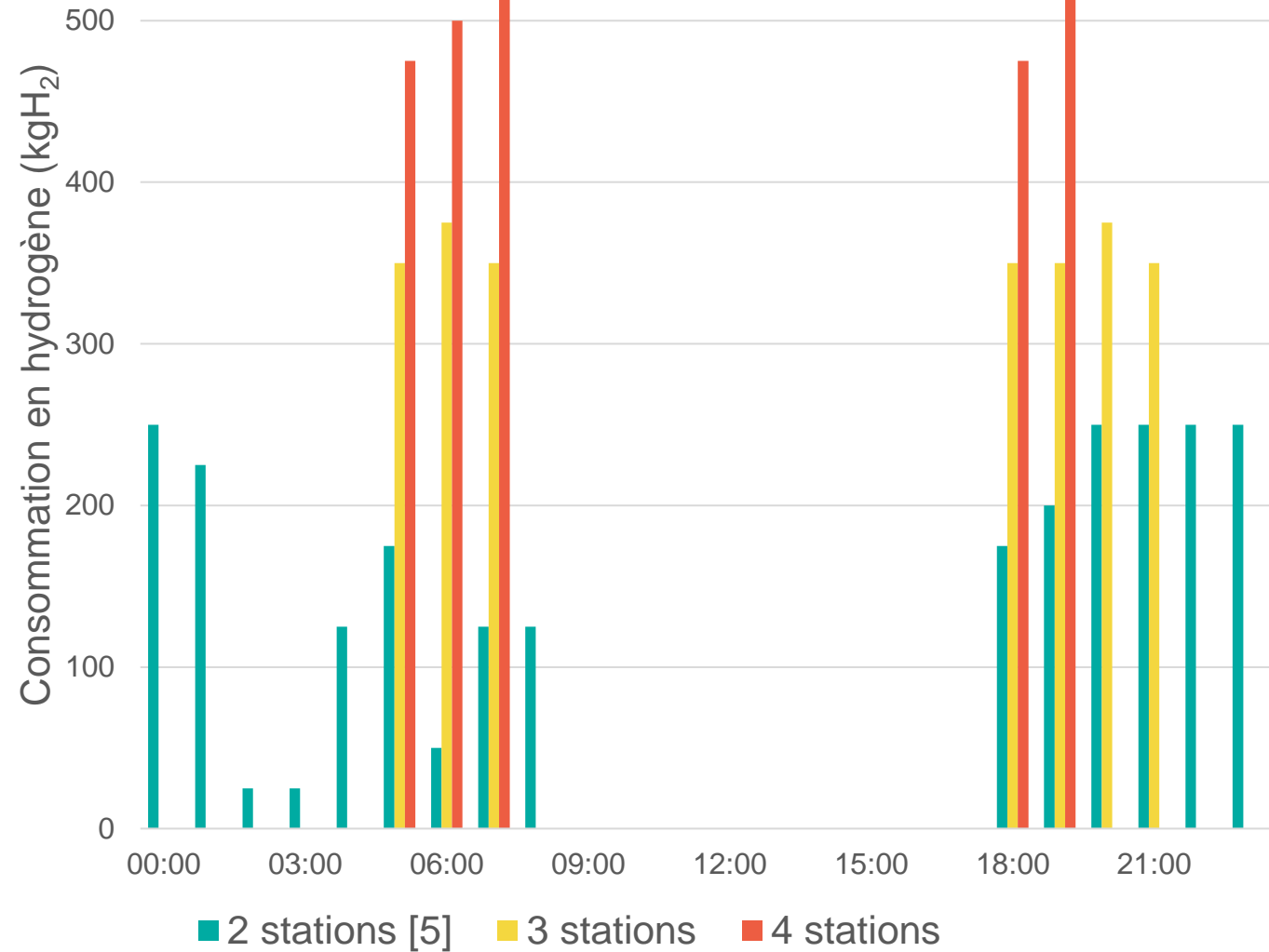
- Horizon 2050
- 17 lignes
- Augmentation de la fréquence de passage des bus
- Augmentation du nombre de bus

Horizon	Kilométrage annuel	Kilomètres jour ouvrable	Kilomètres dimanche	Nombre de bus
Actuel	8 M [3]	24 000	11 200	94 [3]
2050	9 M	27 000	12 600	100

# MÉTHODOLOGIE



- 9 kgH<sub>2</sub>/100 km de consommation en moyenne
- 10 kgH<sub>2</sub>/100 km pour 3 lignes
- 25 kgH<sub>2</sub> par bus par jour
- Recharge à 3,6 kgH<sub>2</sub>/min [4]



# MÉTHODOLOGIE

- Scénario de production électrique optimal
- Distribution des potentiels aux postes sources de l'île [6]
- Localisation des stations en fonction des terminus des lignes

	Puissance (MW)
<b>PV</b>	1 200
<b>Hydraulique</b>	233
<b>Eolien</b>	146
<b>Eolien offshore</b>	40
<b>ETM</b>	30
<b>Géothermie</b>	15
<b>Biomasse</b>	303

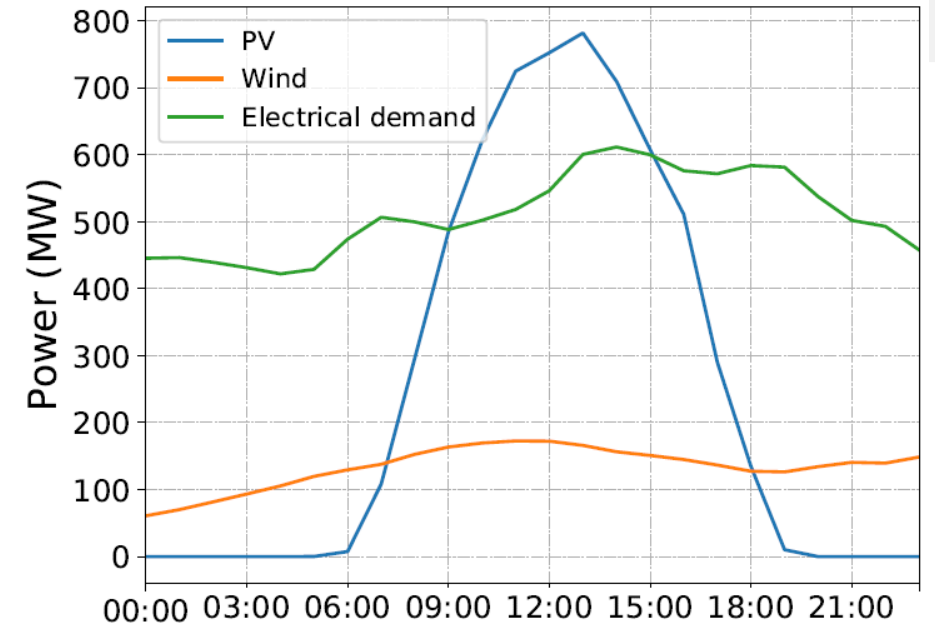
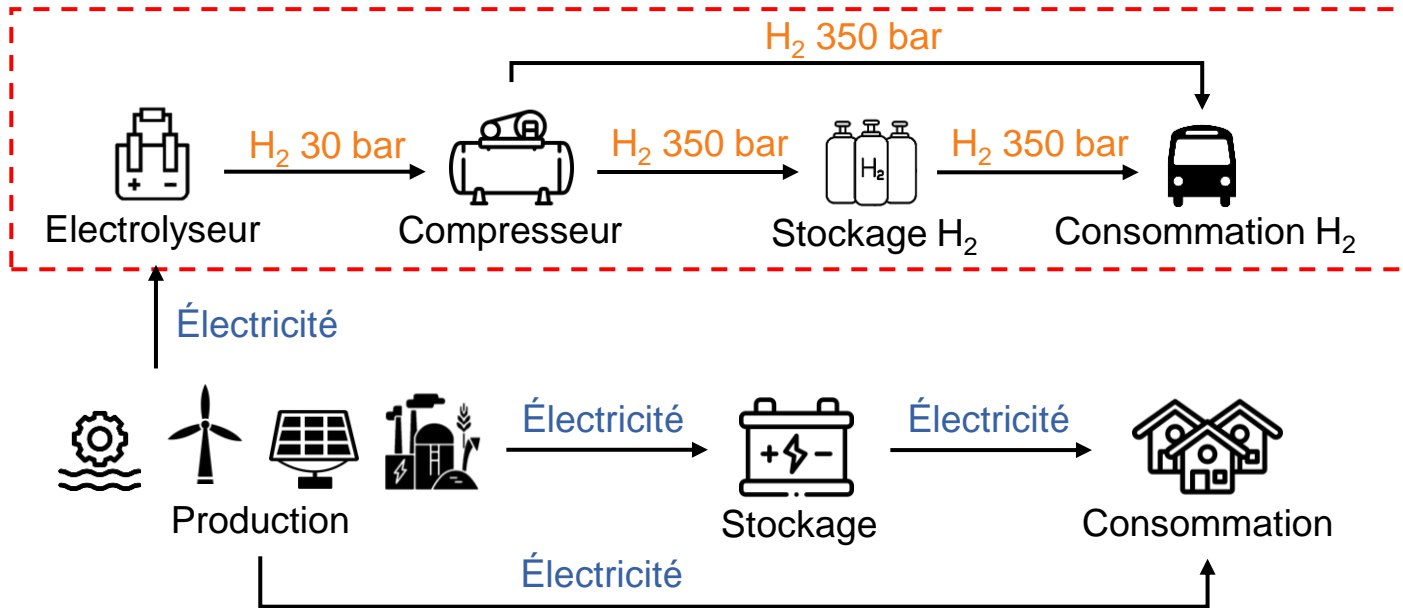
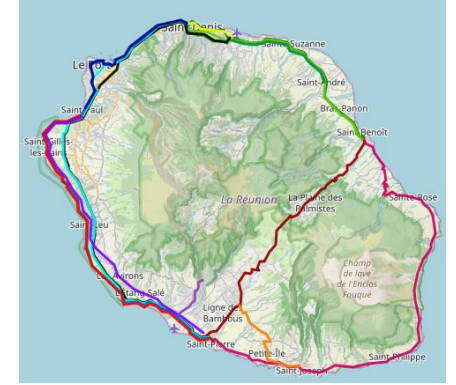
[6, 7]





# MODÉLISATION

- 25 postes sources
- 500 km de lignes HTB 63 kV (aériennes, souterraines, sous-marines)



# OPTIMISATION

## Variables d'optimisation :

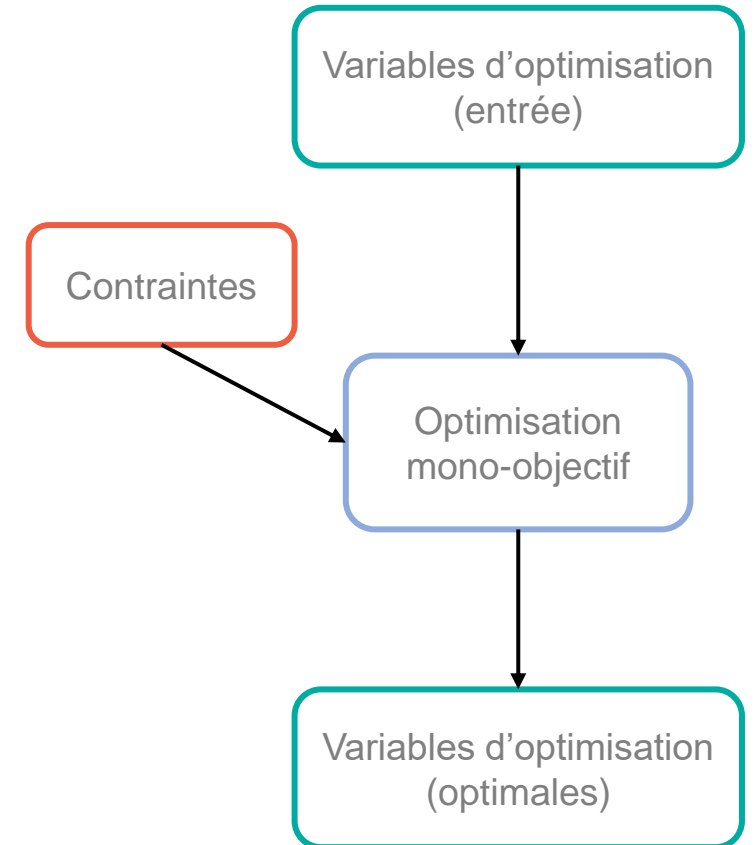
- Puissance horaire des technologies de production électrique ( $g_{n,s,t}$ )
- Taille des stockages et énergie stockée horaire ( $\bar{h}_{n,s,t}, h_{n,s,t}$ )
- Taille électrolyseurs - compresseurs et puissance horaire ( $\bar{g}_{n,s,t}, g_{n,s,t}$ )
- Investissements sur le réseau électrique ( $F_l$ )

## Optimisation mono-objectif, minimisation des coûts d'investissement et d'exploitation :

[8] 
$$\sum_{n,s} c_{n,s} \bar{g}_{n,s} + \sum_{n,s} c_{n,s} \bar{h}_{n,s} + \sum_l c_l F_l + \sum_t [\sum_{n,s} o_{n,s,t} g_{n,s,t} + \sum_{n,s} o_{n,s,t} h_{n,s,t}]$$

## Contraintes :

- Satisfaction de la demande électrique et hydrogène
- Fonctionnement électrolyseurs - compresseurs 80 % de l'année
- $\sum_t g_{n,s,t} \leq ProdMax$  pour les filières hydraulique et biomasse



# OPTIMISATION

## Optimisation mono-objectif, minimisation des coûts d'investissement et d'exploitation :

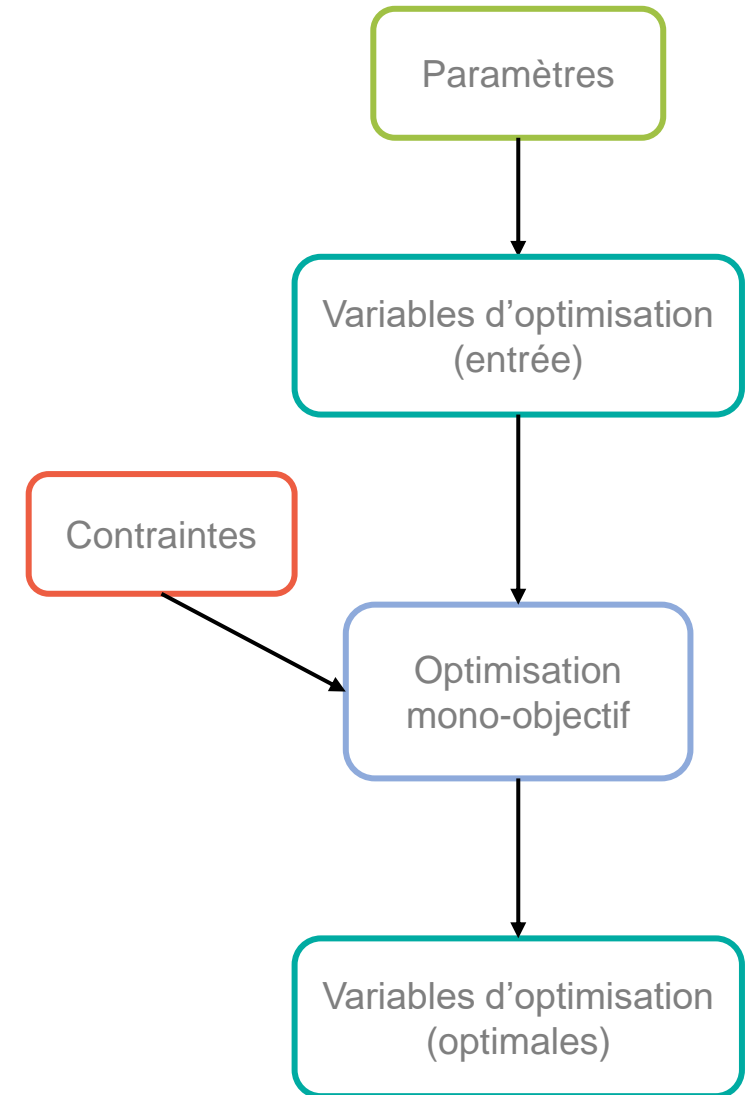
$$[8] \quad \sum_{n,s} c_{n,s} \bar{g}_{n,s} + \sum_{n,s} c_{n,s} \bar{h}_{n,s} + \sum_l c_l F_l + \sum_t [\sum_{n,s} o_{n,s,t} g_{n,s,t} + \sum_{n,s} o_{n,s,t} h_{n,s,t}]$$

### Contraintes :

- Satisfaction de la demande électrique et hydrogène
- Fonctionnement électrolyseurs - compresseurs 80 % de l'année
- $\sum_t g_{n,s,t} \leq ProdMax$  pour les filières hydraulique et biomasse

### Paramètres :

- Puissances installées, demande électrique et hydrogène
- Données réseau (postes, lignes, etc.)
- Données techniques et économiques (dont  $c_{n,s}$ ,  $c_l$ ,  $o_{n,s,t}$ )
- Modèles de fonctionnement PV et éolien
- Données météorologiques

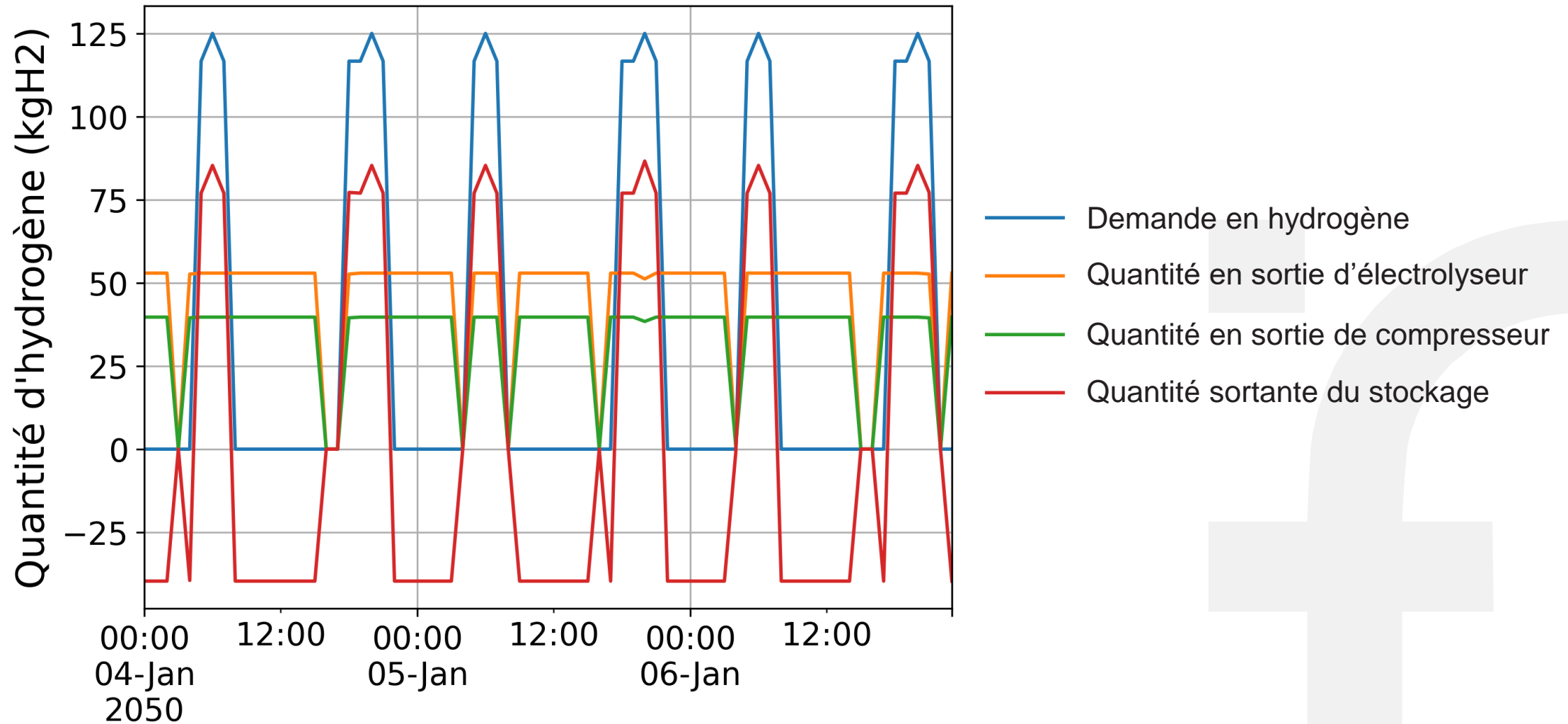


# RÉSULTATS

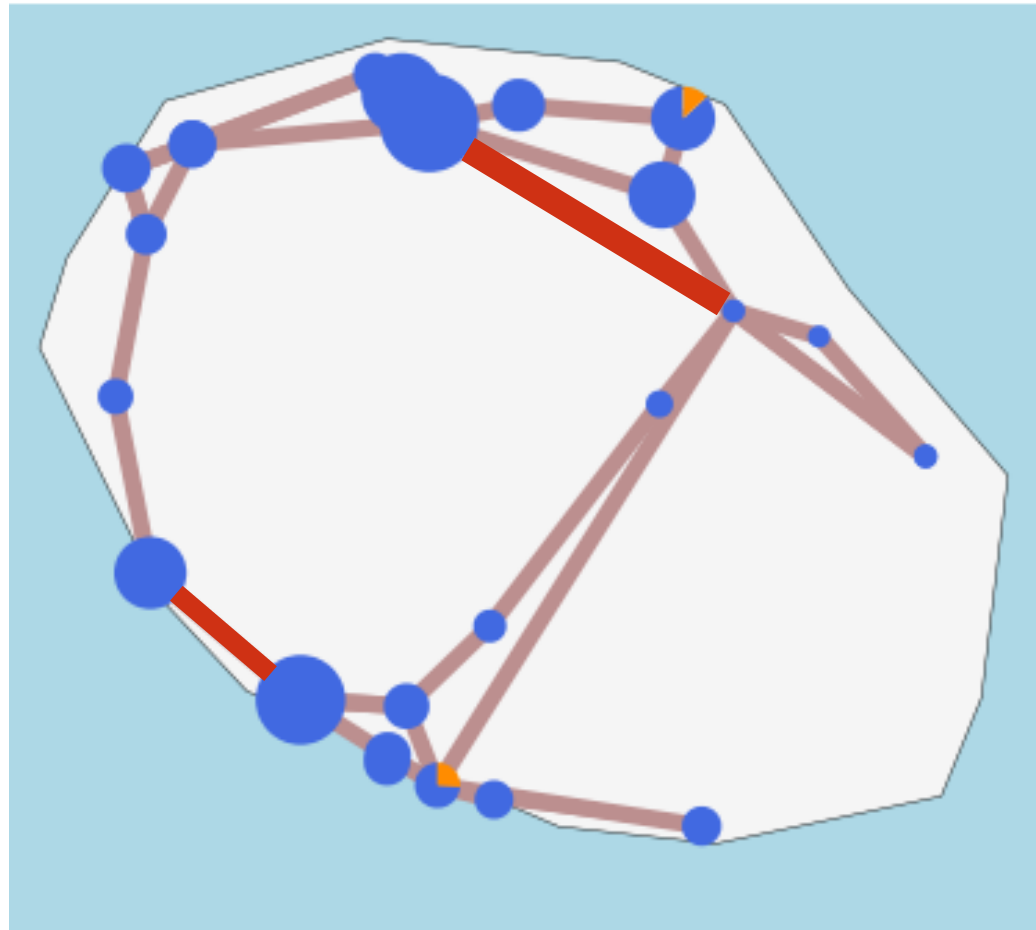
	Taille des électrolyseurs	Taille des compresseurs	Taille des stockages H <sub>2</sub>	Taille des batteries	Renforcement des lignes électriques
<b>2 stations</b>	3,78 MW	2,65 MW	15,88 MWh (total à 31,72 MWh, soit 952 kgH <sub>2</sub> )	1 980 MWh	+5 MVA et +2 MVA
<b>3 stations</b>	2,52 MW	1,76 MW	10,58 MWh (total à 31,74 MWh, soit 952 kgH <sub>2</sub> )	1 980 MWh	+4 MVA et +2 MVA
<b>4 stations</b>	1,89 MW	1,32 MW	9,52 MWh (total à 38,08 MWh, soit 1 143 kgH <sub>2</sub> )	1 980 MWh	+3 MVA et +2 MVA

- Taille des électrolyseurs, des compresseurs et des batteries pour toute l'île égale
- Stockages hydrogène + importants dans le cas de 4 stations
- Analyse de sensibilité : évolution de la consommation des bus proportionnelle à la taille des installations

# RÉSULTATS



# RÉSULTATS



Lignes électriques :

- 26 MVA
- 44 MVA

Stockages électriques :

- 50 MWh
- 100 MWh

- hydrogène
- électricité

# RÉSULTATS

- Utilisation des batteries : recharge le jour, décharge la nuit
- Taux horaire moyen de pénétration des énergies intermittentes : 38,5 %
- Coûts optimisés sur l'année proches pour 2 ou 3 stations (1 600 M€)
- Empreinte au sol des stations similaire
- Plus de restrictions réglementaires pour 2 stations (1 250 kgH<sub>2</sub> par jour)



# CONCLUSION ET LIMITES

- Installation de stations hydrogène faisable techniquement dans le cas présenté
- Peu d'impact sur le réseau mais des besoins en stockages électriques importants
- Test avec un seul scénario de production optimal
- Une seule pompe modélisée par station
- Optimum économique qui ne tient pas compte des contraintes locales
- Bus avec un faible kilométrage





---

# PERSPECTIVES

---

- Etude et optimisation de la courbe de recharge
- Travail similaire pour un train à hydrogène
- Optimisation avec stockages hydrogène à chaque poste source
- Prise en compte de critères environnementaux dans l'optimisation



**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

[agnes.francois@utbm.fr](mailto:agnes.francois@utbm.fr)