

L'HYDROGÈNE COMME VECTEUR DE LA MOBILITÉ À LA RÉUNION : QUELS IMPACTS ET ALTERNATIVES POSSIBLES ?

Agnès FRANÇOIS



INTRODUCTION

- Membre du projet HyLES
- Doctorante FEMTO-ST, 18 mois effectués à Belfort et 18 mois à La Réunion
- Travail au sein du laboratoire Energy-Lab

Objectifs de ma thèse :

- Modélisation et optimisation d'un réseau électrique insulaire à moyen et long terme
- Intégration de l'hydrogène pour la mobilité et le stockage réseau
- Application au cas de La Réunion

INTRODUCTION



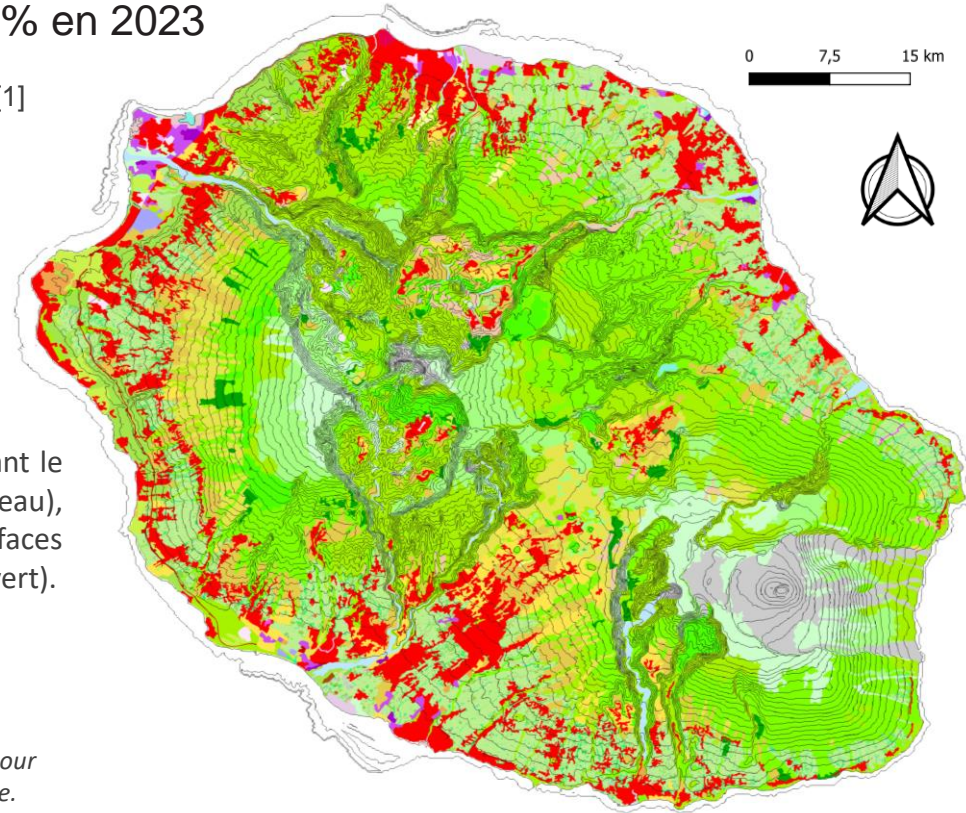
- I. Contexte énergétique à La Réunion
- II. Méthodologie
- III. Cas des autocars à La Réunion
- IV. Cas d'une ligne ferroviaire à La Réunion
- V. Cas des secteurs maritime et aérien
- VI. Conclusion
- VII. Perspectives



CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE

- La Réunion, DROM, Océan Indien
- ZNI de 2 500 km²
- Près de 900 000 habitants
- Taux de dépendance énergétique : 88,6 % en 2023
- Objectif d'autonomie énergétique : 2030^[1]

Carte de La Réunion, représentant le relief (lignes de niveau), l'urbanisation (rouge), les surfaces agricoles (orange) et les forêts (vert).

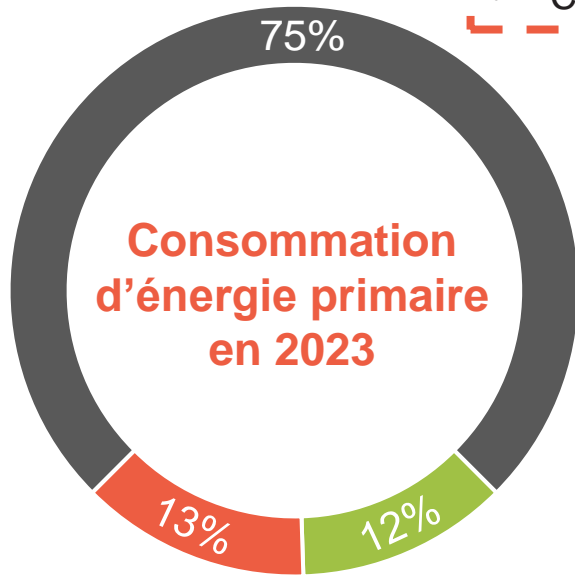


[1] LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte - Article 1, 2015. Ajout article L. 100-4 Code de l'énergie.

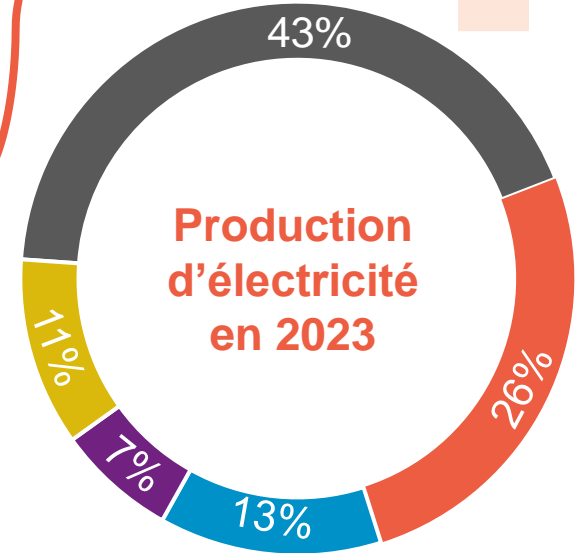
CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE

- Essence
- Gazole
- Fioul lourd
- Kérosène
- Gaz butane
- Charbon

- Biodiesel
- Pellets de bois



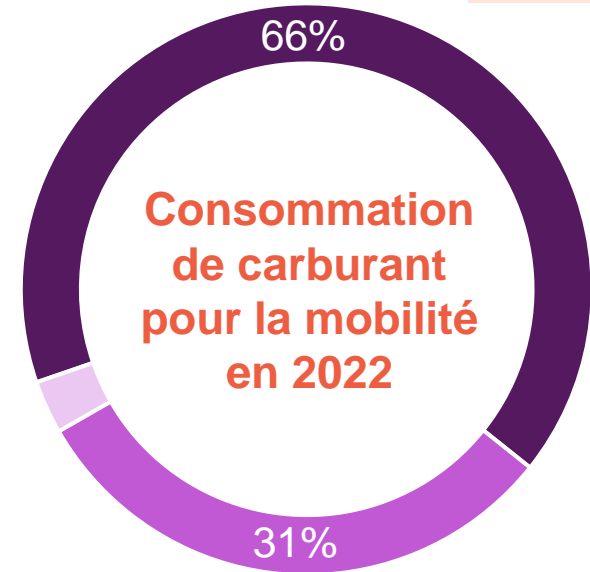
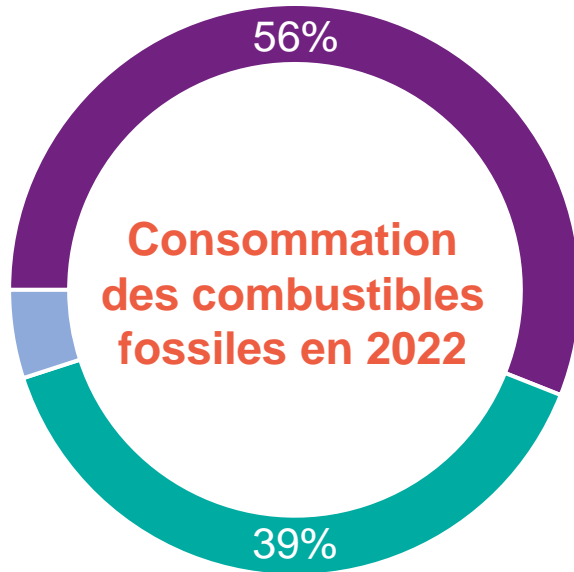
- Importations fossiles
- Importations renouvelables
- Renouvelable local
- Photovoltaïque (PV) + éolien
- Biomasse
- Hydraulique



| | |
|---------------------------------|------------|
| Consommation énergie primaire : | 17 836 GWh |
| Consommation électrique : | 2 728 GWh |

CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE

Sur le secteur de la mobilité en particulier :



→ Le secteur des transports consomme 2/3 de l'énergie finale

→ Consommation de 693 ktep en 2022

→ + de 410 000 voitures particulières en 2022 (pour ~860 000 habitants)

SOMMAIRE

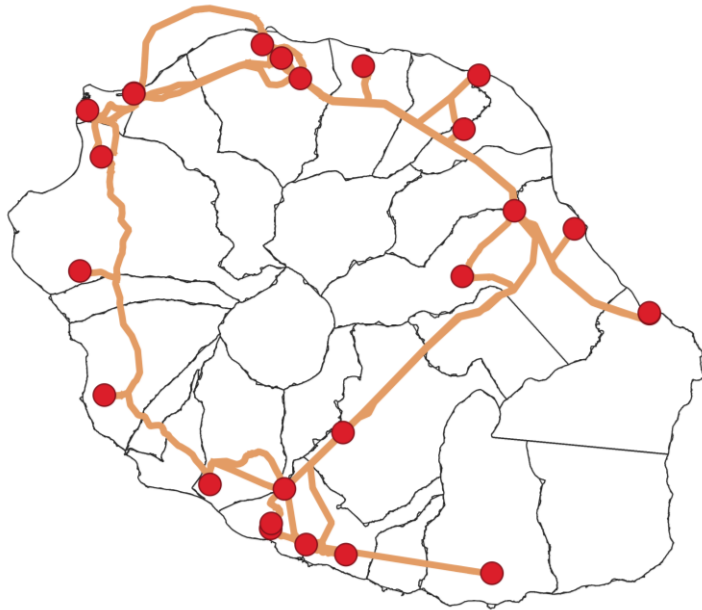
- I. Contexte énergétique à La Réunion
- II. **Méthodologie**
- III. Cas des autocars à La Réunion
- IV. Cas d'une ligne ferroviaire à La Réunion
- V. Cas des secteurs maritime et aérien
- VI. Conclusion
- VII. Perspectives

MÉTHODOLOGIE

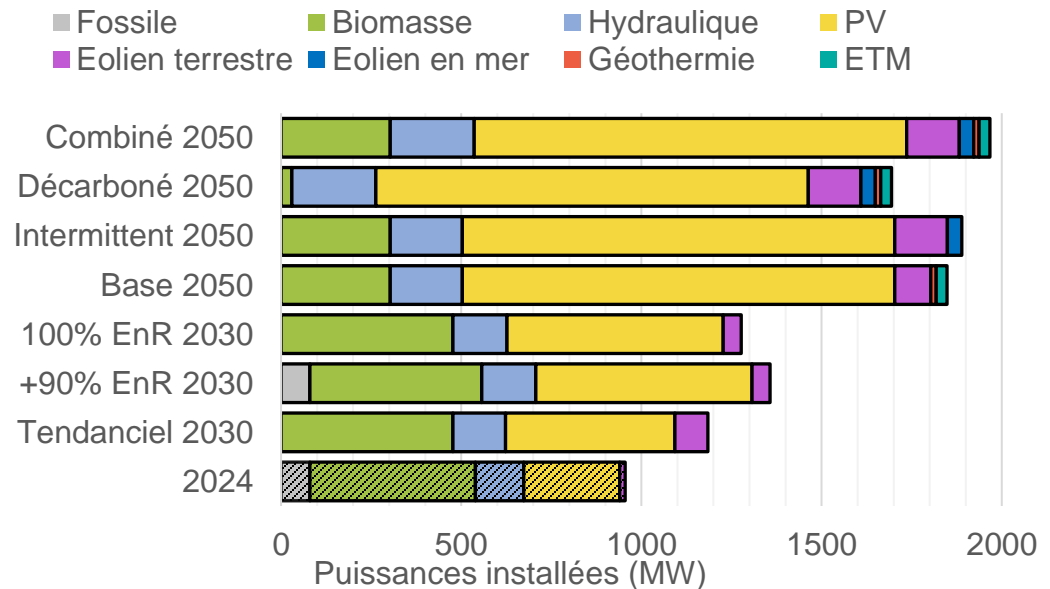
- Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau avec une électricité peu carbonée

→ Modélisation du réseau électrique de La Réunion

→ Projections de scénarios électriques à moyen et long terme



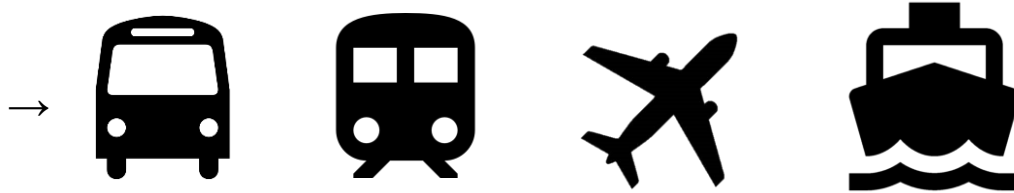
Carte des lignes HTB et des postes source.



Différents scénarios de puissances installées testés.

MÉTHODOLOGIE

- Étude de l'intégration de l'hydrogène sur différentes applications



→ Estimation de la consommation des applications

→ Simulation d'une production d'hydrogène sur le réseau électrique

- Résultats attendus

→ Dimensionnement des technologies hydrogène

→ Renforcement nécessaire du réseau électrique

→ Estimation d'impacts économiques et/ou environnementaux

SOMMAIRE

- I. Contexte énergétique à La Réunion
- II. Méthodologie
- III. Cas des autocars à La Réunion
- IV. Cas d'une ligne ferroviaire à La Réunion
- V. Cas des secteurs maritime et aérien
- VI. Conclusion
- VII. Perspectives

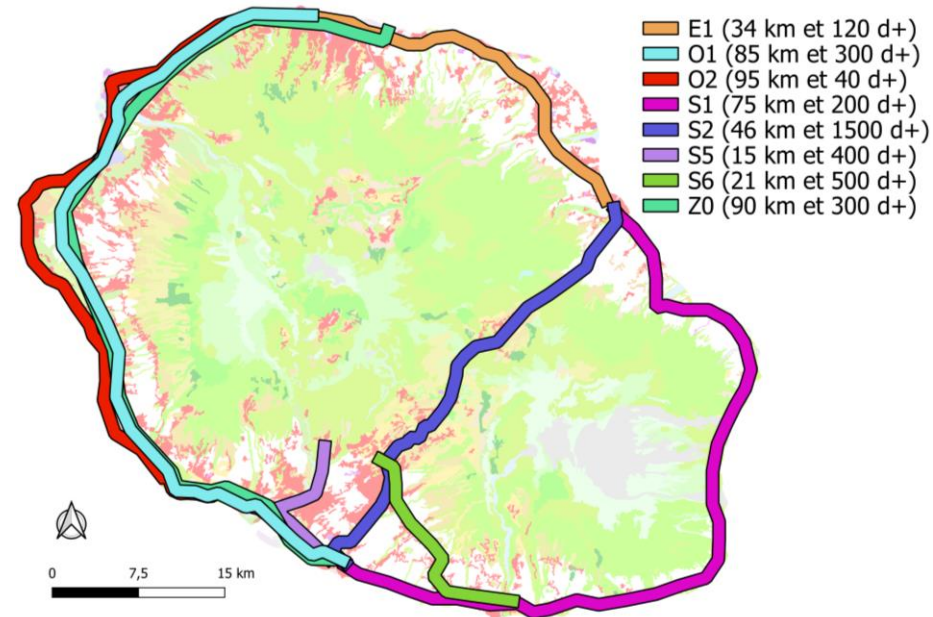
CAS DES AUTOCARS

Objectifs :

- Comparer une solution électrique à batterie à une solution hydrogène
- Estimer les besoins énergétiques, les coûts et les impacts environnementaux de chaque solution

Cas d'étude :

- 94 autocars pour 17 lignes, 8 millions de kilomètres parcourus en 2017
- Jusqu'à 400 km par véhicule par jour
- 1 ligne avec 1 500 mètres de dénivelé positif
- 1 ligne avec 80 km sans arrêts



Carte des principales lignes du réseau régional d'autocars.

CAS DES AUTOCARS

Objectifs :

- Comparer une solution électrique à batterie à une solution hydrogène
- Estimer les besoins énergétiques, les coûts et les impacts environnementaux de chaque solution

Comparaison de différentes solutions :

- Rétrofit moteur électrique + batterie
- Nouvel autocar moteur électrique + batterie
- Rétrofit moteur électrique + PAC + stockage H₂
- Nouvel autocar moteur électrique + PAC + stockage H₂

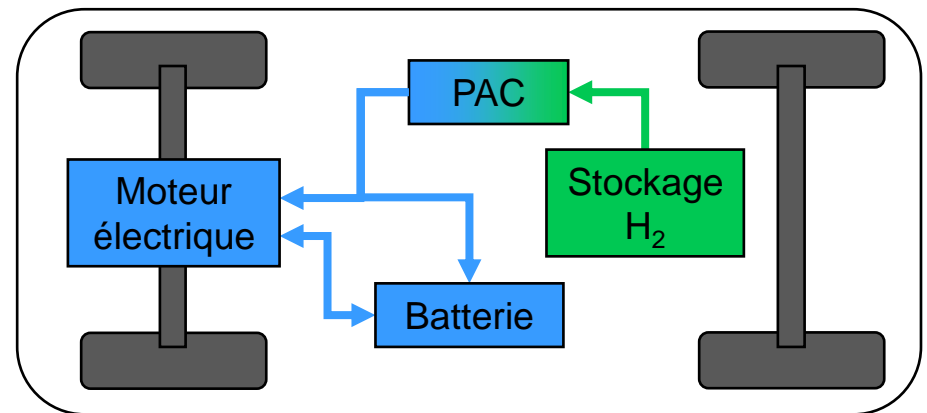
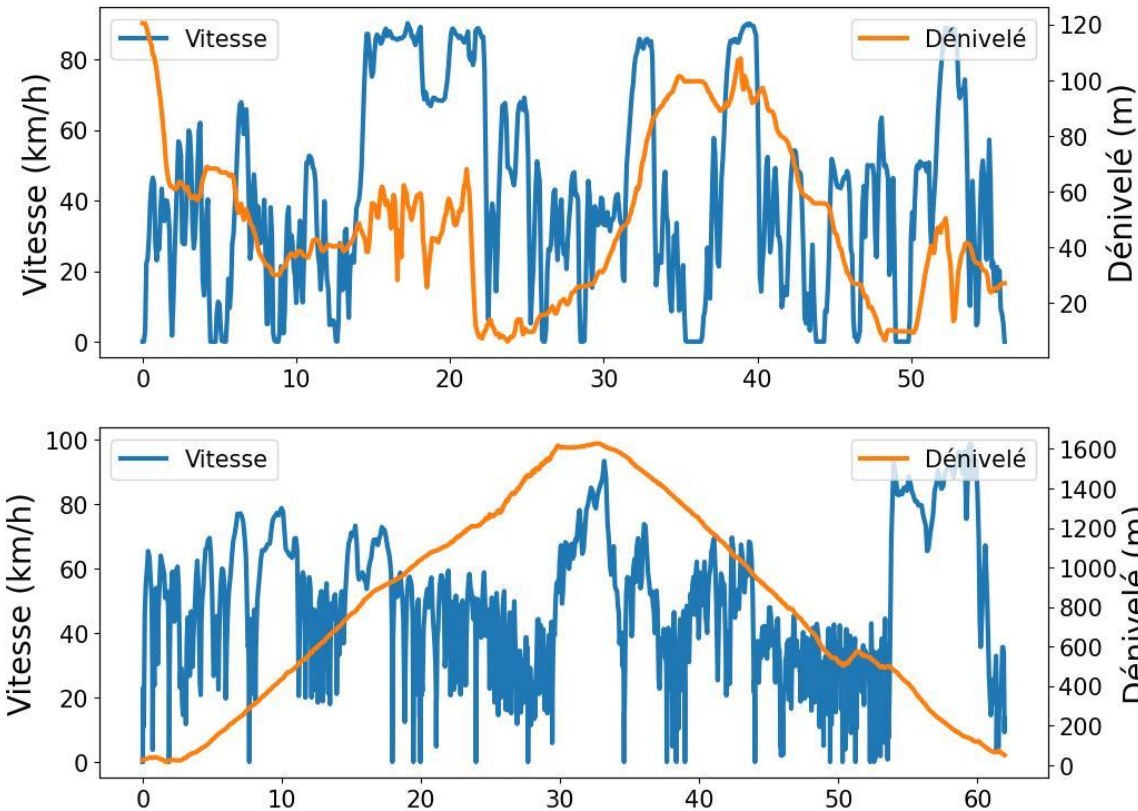


Schéma des technologies constituant un véhicule à PAC.

CAS DES AUTOCARS

1^{ère} étape : Estimation de la consommation énergétique



Profil de vitesse et de dénivelé de deux lignes du réseau.

Ligne qui longe le littoral :

- Conso électrique : **152,1 kWh/100km**
- Conso hydrogène : **9,7 kgH₂/100km**

Ligne qui traverse l'île :

- Conso électrique : **206,7 kWh/100km**
- Conso hydrogène : **13,2 kgH₂/100km**

CAS DES AUTOCARS

2^{ème} étape : Estimation de l'autonomie des véhicules

| | <u>Neuf</u> | <u>Retrofit</u> |
|--|---------------|-----------------|
| <u>Ligne qui longe le littoral :</u> | | |
| → Conso électrique : 152,1 kWh/100km | 210 km | 110 km |
| → Conso hydrogène : 9,7 kgH2/100km | 750 km | 370 km |
| <u>Ligne qui traverse l'île :</u> | | |
| → Conso électrique : 206,7 kWh/100km | 180 km | 80 km |
| → Conso hydrogène : 13,2 kgH2/100km | 550 km | 270 km |

CAS DES AUTOCARS

3^{ème} étape : Dimensionnement des infrastructures

Ligne qui longe le littoral :

→ Conso électrique :
152,1 kWh/100km

→ Conso hydrogène :
9,7 kgH₂/100km

Ligne qui traverse l'île :

→ Conso électrique :
206,7 kWh/100km

→ Conso hydrogène :
13,2 kgH₂/100km

Consommation hydrogène moyenne

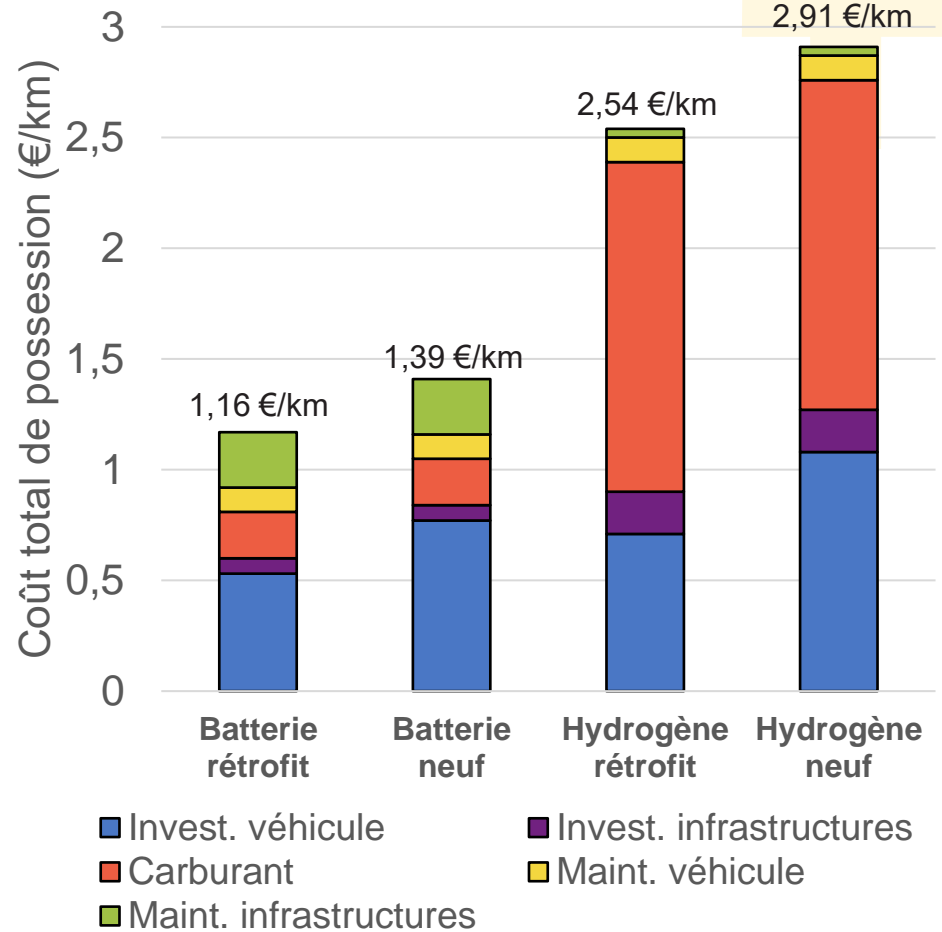
- 2 stations de ravitaillement
- Électrolyseur 3 MW
- Stockage H₂ 2,2 tH₂
- ~ **50 GWh** annuels
- ~ **16 GWh** annuels

CAS DES AUTOCARS

4^{ème} étape : Comparaison sur différents critères

Critère comparé :
coût total de possession

- Coûts d'investissement, du carburant, de maintenance
- Nombre de kilomètres parcourus
- Critère en €/km



Critère économique.

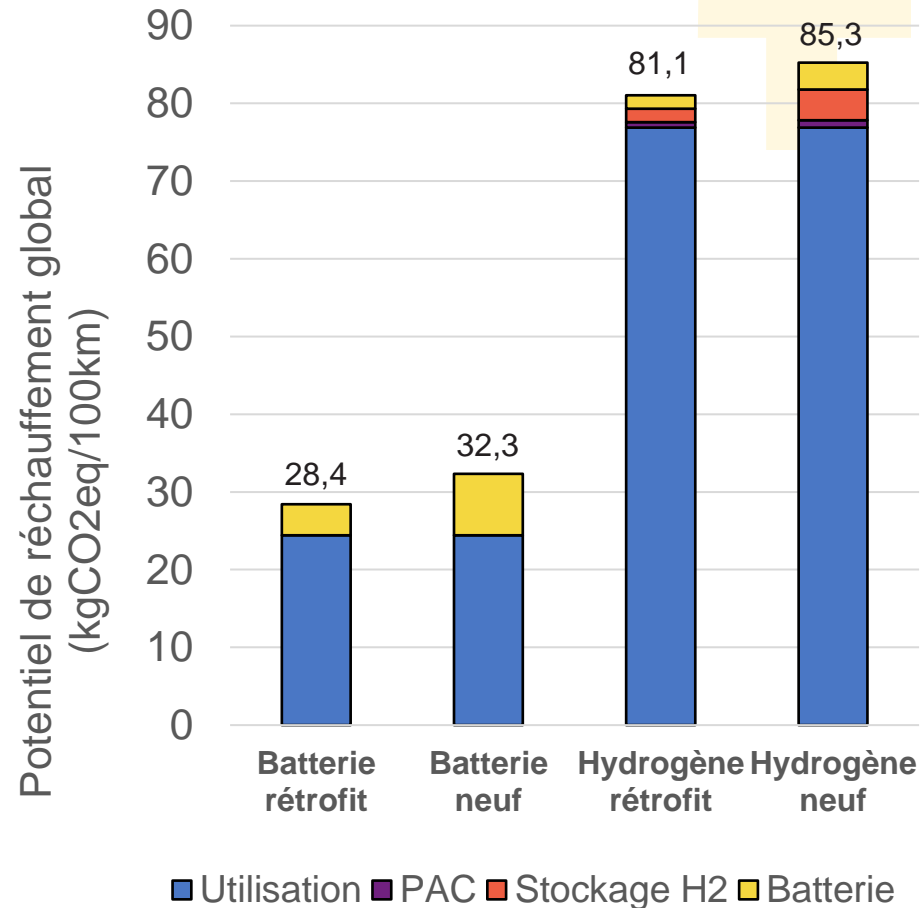
CAS DES AUTOCARS

4^{ème} étape : Comparaison sur différents critères

Critère comparé :

potentiel de réchauffement global

- PAC, batteries et stockages H₂ embarqués
- Extraction des matières premières, production, transport, recyclage, fin de vie
- Utilisation des véhicules (impact mix électrique)
- Critère en kgCO₂eq/100km



Critère environnemental.

CAS DES AUTOCARS

En conclusion :

| | <i>Autonomie</i> | <i>Temps de recharge</i> | <i>Impact économique</i> | <i>Impact environnemental</i> |
|---------------------------|---------------------|---|--------------------------|-------------------------------|
| Batterie rétrofit | Faible | Lent ou pic de puissance important | Faible | Faible |
| Batterie neuf | Moyen faible | Lent ou pic de puissance important | Faible | Faible |
| Hydrogène rétrofit | Moyen élevé | Rapide | Élevé | Élevé |
| Hydrogène neuf | Élevé | Rapide | Élevé | Élevé |

- Véhicule PAC : meilleure autonomie et temps de recharge (dans le cas présent)
- Véhicule batterie : avantage économique et environnemental
- Solutions : optimiser les lignes, mix des technologies

SOMMAIRE

- I. Contexte énergétique à La Réunion
- II. Méthodologie
- III. Cas des autocars à La Réunion
- IV. Cas d'une ligne ferroviaire à La Réunion**
- V. Cas des secteurs maritime et aérien
- VI. Conclusion
- VII. Perspectives

CAS LIGNE FERROVIAIRE

Objectifs :

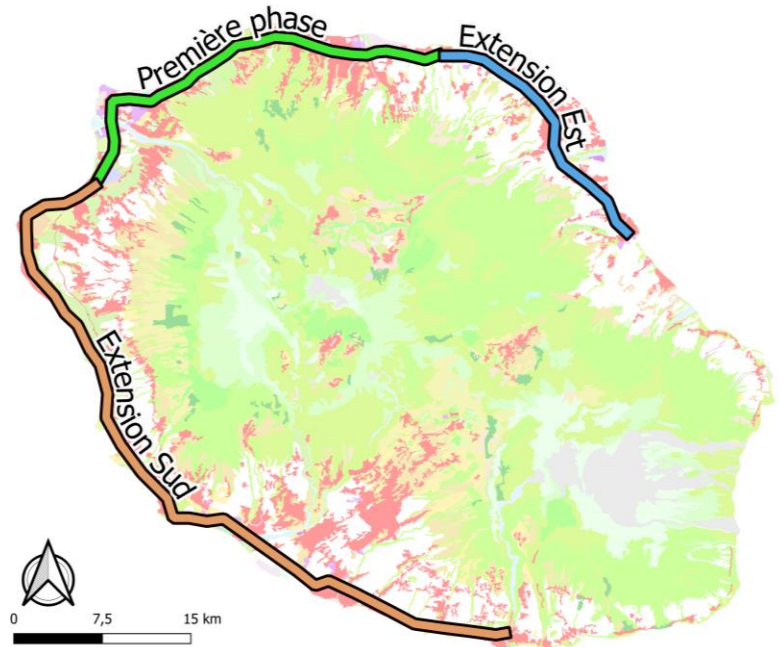
- Comparer une solution électrique à batterie à une solution hydrogène
- Estimer les besoins énergétiques, les coûts et les impacts environnementaux de chaque solution

Cas d'étude :

- Une ligne de 146 km
- 11 000 km parcourus par jours

Comparaison de différentes solutions :

- Électrique relié
- PAC + stockage H₂ + batterie



Tracé du projet de tram-train abandonné en 2010.

CAS LIGNE FERROVIAIRE

Objectifs :

- Comparer une solution électrique à batterie à une solution hydrogène
- Estimer les besoins énergétiques, les coûts et les impacts environnementaux de chaque solution

| | Conso. moyenne | Autonomie | Conso. annuelle | Impact économique | Impact environnemental |
|------------------|----------------------------|-----------|-----------------|-------------------|------------------------|
| Électrique relié | 500 kWh/100km | - | | | |
| Hydrogène | 20 kgH ₂ /100km | | | | |

- Fortes incertitudes sur les coûts locaux
- Évolution future des trains électriques à batterie ?

SOMMAIRE

- I. Contexte énergétique à La Réunion
- II. Méthodologie
- III. Cas des autocars à La Réunion
- IV. Cas d'une ligne ferroviaire à La Réunion
- V. Cas des secteurs maritime et aérien
- VI. Conclusion
- VII. Perspectives

CAS SECTEURS MARITIME/AÉRIEN

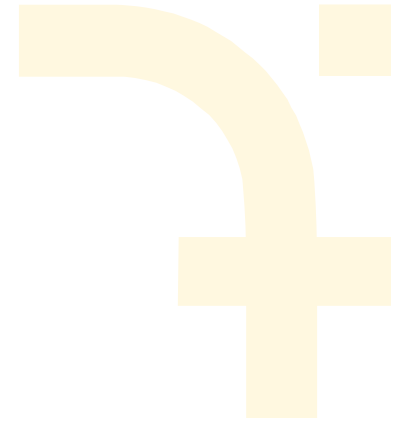
Objectifs :

- Estimer les besoins énergétiques futurs des 2 secteurs
- Évaluer les impacts sur le réseau électrique

Hypothèses :

| Secteur maritime | Secteur aérien |
|--|--|
| → Consommation -25% | → Consommation stable |
| → E-ammoniac (hydrogène + diazote) | → E-kérosène (hydrogène + CO ₂) |
| | → Capture de CO ₂ dans l'air |
| → Consommation énergétique : 1,82 MWhé/MWh | → Consommation énergétique : 2,75 MWhé/MWh |
| → Consommation différenciée selon le mois de l'année | |
| → Consommation identique chaque heure de chaque mois | |

CAS SECTEUR MARITIME/AÉRIEN



Secteur maritime :

- + 240 GWhé par an
- Demande pouvant être satisfaite localement
- 30 à 40 MW d'électrolyseur, 20 à 40 tonnes de stockage hydrogène

Secteur aérien :

- + 6 840 GWhé par an
- Demande **ne** pouvant **pas** être satisfaite localement
- Plusieurs solutions possibles :
 - a. Ajout de nouveaux moyens de production d'électricité
 - b. Réduction de la consommation du secteur aérien

CAS SECTEUR MARITIME/AÉRIEN

Secteur aérien :

- + 6 840 GWhé par an
- Demande **ne** pouvant **pas** être satisfaite localement
- Plusieurs solutions possibles :
 - a. Ajout de nouveaux moyens de production d'électricité
 - b. Réduction de la consommation du secteur aérien

Exemple de l'optimisation d'un parc éolien offshore :

- 4,3 GW d'éolien offshore, 20 % des lignes du réseau à renforcer
- 800 MW d'électrolyseur et 4,1 ktH2 stockage H2

Estimation de la quantité d'e-kérosène pouvant être produite localement :

- 5 ktep d'e-kérosène, soit -97% par rapport à 2019
- 84 MW d'électrolyseur et 10 tH2 stockage H2

SOMMAIRE

- I. Contexte énergétique à La Réunion
- II. Méthodologie
- III. Cas des autocars à La Réunion
- IV. Cas d'une ligne ferroviaire à La Réunion
- V. Cas des secteurs maritime et aérien
- VI. Conclusion
- VII. Perspectives

CONCLUSION

| | Autocars | Train | Maritime | Aérien |
|--|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| <i>Consommation annuelle électricité</i> | 50 GWh | 44 GWh | 240 GWh | 6 840 GWh |
| <i>Consommation annuelle eau</i> | 10 600 m ³ | 9 400 m ³ | 65 000 m ³ | 1 400 000 m ³ |
| <i>Taille électrolyseur</i> | 6 MW | 5,4 MW | 30-50 MW | 800 MW |
| <i>Taille stockage H₂</i> | 4,5 tH ₂ | 4,5 tH ₂ | 20-40 tH ₂ | > 500 tH ₂ |
| <i>Impact réseau</i> | Faible | Faible | Faible | Fort |

Besoins journaliers en eau (eau potable, irrigation, industrie): **1 500 000 m³** en 2016

CONCLUSION

- Mobilité terrestre : consommation énergétique doublée des solutions hydrogène
- Des technologies en constante évolution
- Besoin de repenser la mobilité localement
- Nécessité de revoir l'objectif d'autonomie énergétique pour le secteur aérien

SOMMAIRE

- I. Contexte énergétique à La Réunion
- II. Méthodologie
- III. Cas des autocars à La Réunion
- IV. Cas d'une ligne ferroviaire à La Réunion
- V. Cas des secteurs maritime et aérien
- VI. Conclusion
- VII. Perspectives

PERSPECTIVES

L'hydrogène comme stockage réseau :

- Simulations sur 5 ans entre 2000 et 2019
- Utilisation de l'hydrogène dans le cas de sécheresses énergétiques
- Jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes d'hydrogène à stocker
- Moins d'une utilisation /an
- Alternatives possibles : STEP, vehicle-to-grid
- Thèse débutée sur le sujet

L'hydrogène pour la fabrication d'engrais azotés localement :

- ~ 32 000 tonnes d'engrais minéraux et de synthèse importés par an

MERCI DE VOTRE ATTENTION

L'HYDROGÈNE COMME VECTEUR DE LA MOBILITÉ À LA RÉUNION : QUELS IMPACTS ET ALTERNATIVES POSSIBLES ?

Agnès FRANÇOIS
agnes.francois@yahoo.fr