

Énergies alternatives pour le ferroviaire

Dan Maurel, Maxime Darrambide, Tom Perrin,
Marcoul Robin, Adrien Le Marchand

Les enjeux :

15 000 km de voies non électrifiées en France soit 20 % du trafic
Décarbonation essentielle pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050
Près de 450 trains diesel devraient être renouvelés d'ici 2028/2030

Électricité

+ Technologie maîtrisée, coût de l'énergie accessible, hautes performances déjà atteintes, empreinte carbone basse

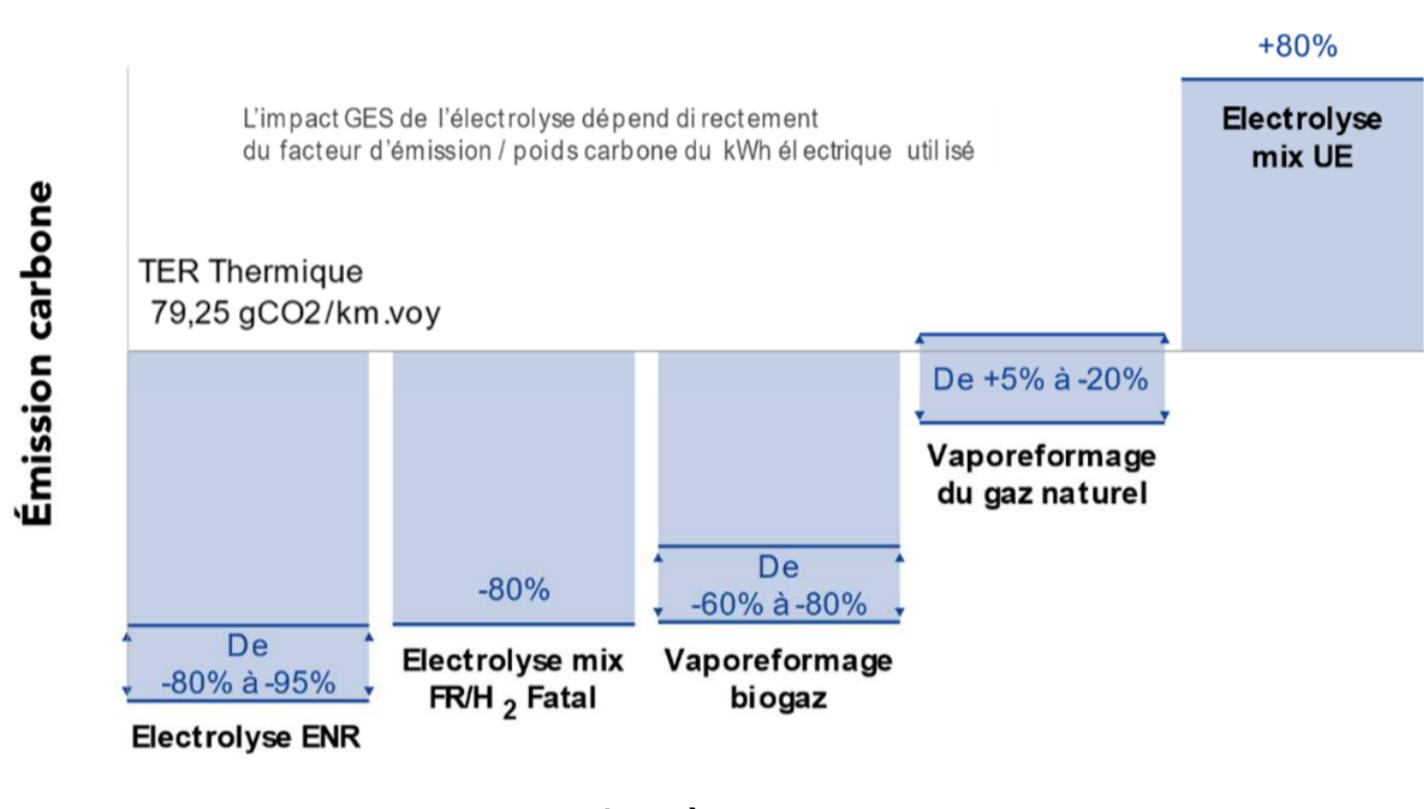
- Empreinte carbone non neutre, coût initial lourd, infrastructures chères en maintenance (caténaires...), électricité pas toujours verte

Objectif 2025 : 50% d'électricité verte pour la SNCF (4.5 TWh).
Se fait par des PPA (Power Purchase Agreement) et un plan de production photovoltaïque. A ce jour, 550GWh sûrs.

Hydrogène

L'hydrogène est au cœur de la stratégie Zéro carbone de la France. Cependant son intérêt dépend de la manière dont il est produit. On distingue aujourd'hui :

- l'hydrogène issu de vaporeformage du gaz
- l'hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau dont la teneur en carbone dépend de celle de l'électricité utilisée pour le produire
- L'hydrogène fatal c'est-à-dire co-produit au cours d'une autre réaction (majoritairement dans les raffineries).



Source : France Hydrogène

La technologie hydrogène consiste à remplacer les classiques moteurs diesel par des piles à combustible, des réservoirs d'hydrogène et des batteries pour une traction sans émission de gaz à effet de serre

- Prix encore trop élevé aujourd'hui : 10 € / kg soit 3.3 € / km parcouru pour l'hydrogène vert (par électrolyse ENR)

Problème de volume
Filière de l'hydrogène vert encore non développée

+ Faible temps de recharge
Emport massique intéressant

Par ses coûts de production encore importants, l'hydrogène semble être une solution intéressante surtout pour de petites lignes à faible fréquentation.



Premier exemple de développement :
Le Coradia iLint en Allemagne depuis 2018 mais il fonctionne à base d'hydrogène issu de vaporeformage

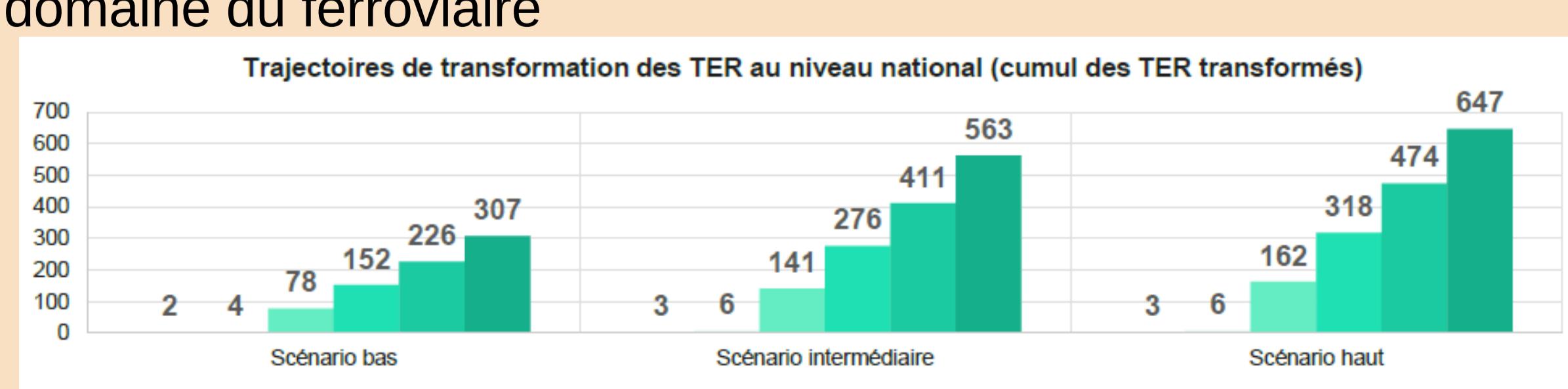
Biogaz

+ Facilité de conversion de moteurs thermiques au GNV/BioGNV, 93% moins d'émissions qu'avec du diesel pour le BioGNV



€ Coût de conversion relativement faible estimé à 750,000€ selon le scénario intermédiaire, soit ~1330€ par rame

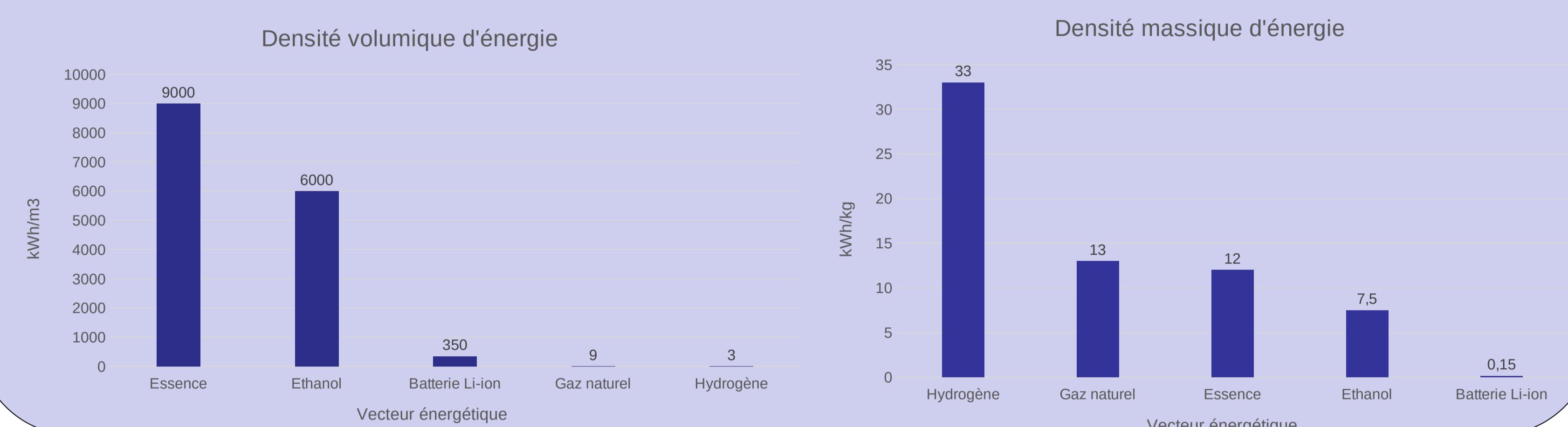
- Énergie encore très marginale en France, nouvelle dans le domaine du ferroviaire



Source: gaz-mobilite.fr

Plusieurs alternatives au diesel sont envisagées : électrification, batteries portatives, hydrogène, biogaz et biocarburants. Quels sont leurs intérêts et inconvénients au regard des enjeux actuels ?

Quelques chiffres sur les différentes alternatives:



Batteries

	CO2	Coût
Électricité	1.7 g/km.voy + empreinte électrique	1M€/km + 0.5€/km d'énergie + 39 600€/km/an en entretien
Batteries (lithium-ion)	200 t/train + 1.7 g/km.voy	10 centimes/km en coût de batteries
Biogaz	3.2 à 4 g/km.voy	0.61 à 0.98 € / km (TER)
Biodiesel (seconde génération)	3.2 kg/km	~50 €/ km de biocarburant
Hydrogène (électrolyse ENR)	4 g/km.voy	~ 700 000 € / train + 3.3 € / km

+ masse embarquée en batteries acceptable
+ l'électrification locale peut permettre de réduire la masse des batteries emportées
+ abondance en ressources, durabilité et recyclabilité accrues pour des technologies autres que le lithium-ion
+ infrastructures et planification ferroviaires propices aux batteries
- nécessité de développer les industries appropriées
- l'amortissement des coûts sera sur le long terme
- arbitrage entre vitesse ou environnement

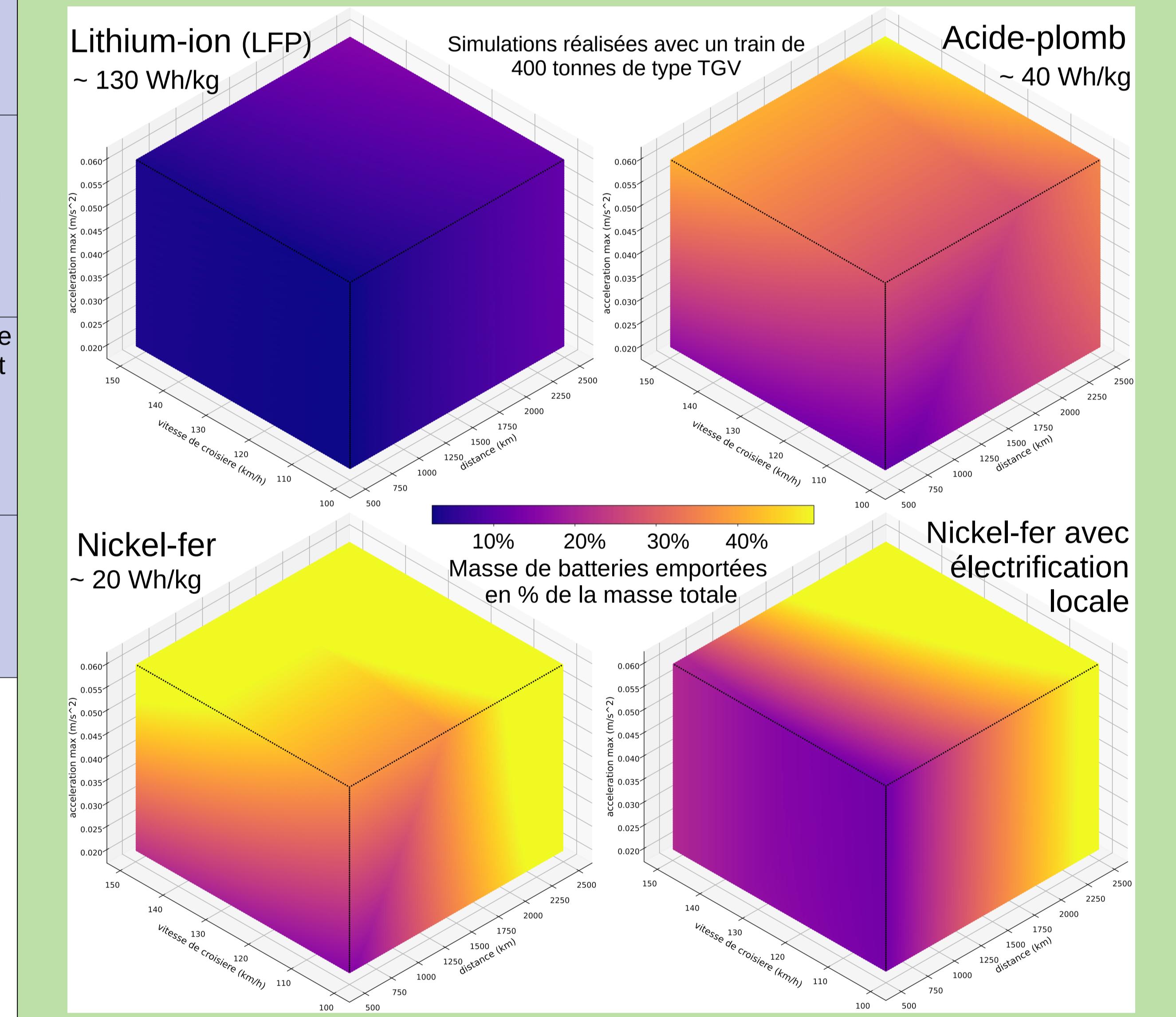
$$\text{loi de Peukert} \quad \frac{\mathcal{E}^k}{I^k H^{k-1} U_0^k} \quad R = \alpha \sqrt{\frac{m}{\mathcal{E}}} + \beta M V + \kappa(k_1 S + k_2 p L) V^2$$

$$\text{condition d'adhérence} \quad \gamma = \sqrt{\frac{b^2 - 4ac}{4c^2}}$$

$$\text{équation du mouvement} \quad T \leq \mu mg \quad \dot{V} + cv^2 + bv + a = 0$$

$$\text{accélération} \quad V(t) = \gamma \tanh \left(c \gamma t + \operatorname{arctanh} \left(\frac{b}{2c \gamma} \right) \right) - \frac{b}{2c}$$

$$\text{freinage} \quad V(t) = \gamma \tan \left(-c \gamma (t - t_d) + \operatorname{arctan} \left(\frac{V_i}{\gamma} + \frac{b}{2c \gamma} \right) \right) - \frac{b}{2c}$$



L'électrification locale concerne ici typiquement quelques km en sortie de gare afin d'accélérer sans batteries. Ce n'est pas l'électrification «frugale» testée par la SNCF et consistant à ne pas électrifier de courts tronçons pour des raisons de coût, de difficulté d'accès et/ou de maintenance.

Biocarburants

Il en existe deux types:

Le biocarburant de première génération, synthétisé par transestérification d'huiles végétales (palme, colza, amandes, ou encore de déchets graisseux). On mélange ensuite le produit à hauteur de quelques pourcentages avec du gasoil classique, car il n'est pas possible d'utiliser uniquement le biocarburant de première génération dans un moteur diesel moderne.



- Les infrastructures industrielles nécessaires à la production sont déjà présentes
- Permet de réduire la consommation de gasoil fossile sans impacter la qualité du carburant (7 à 10% du volume de gasoil peut être remplacé par du biocarburant)
- Pas besoin de nouvelles motrices



- ne réduit quasiment pas les émissions de GES ou de polluants quand il est utilisé avec du gasoil fossile
- Utilise des denrées alimentaires comme matières premières
- Nécessiterait de changer certaines pièces des motrices pour être utilisé comme carburant

- Ne constitue pas une alternative qui permet de réduire suffisamment les émissions pour s'inscrire dans un objectif de neutralité carbone

- Nécessiterait de mobiliser un nombre considérable de terres arables si l'on voulait faire tourner toutes les locomotives diesel au biocarburant (37% des terres arables en France)
- Le bilan carbone d'une transition au biocarburant pourrait s'avérer négatif en raison du déplacement nécessaire de certaines cultures à usage alimentaire

Le biocarburant de seconde génération, synthétisé à partir de biomasse souvent constituée de déchets agricoles par traitement thermochimique ou enzymatique. Le biocarburant de seconde génération peut lui être utilisé comme carburant à part entière dans un moteur diesel moderne.



- N'utilise pas de matières premières qui pourraient être destinées à l'alimentation
- Pas besoin de nouvelles motrices
- Remplace entièrement le gasoil fossile
- Réduit les émissions de gaz à effet de serre et polluants (cf. tableau)



- Nécessité d'infrastructures coûteuses pour en produire, qui ne sont pas nombreuses en France
- Bilan énergétique assez mauvais pour sa production

Conclusion

Finalement on ne peut pas dire qu'il existe une alternative meilleure que d'autres. Il faut regarder quelle solution technique est la plus pertinente au regard de la ligne que l'on souhaite verdier. Cela en fonction de la portion de ligne non électrifiée, de sa topographie, de sa fréquence de passage, de sa longueur... De plus les technologies étant en perpétuelle évolution, il faut se garder de tout jugement définitif. Ainsi même si aujourd'hui les technologies via batteries et électrification frugale semblent plus intéressantes dans plusieurs cas de figure, la technologie hydrogène pourraient devenir bien plus compétitive une fois arrivée à maturité.

