

Décarboner le ferroviaire

Enjeux et initiatives de la SNCF

26 mars 2026

Sommaire

1. Présentation du groupe SNCF

2. Découverte du système ferroviaire

2.1. Description du réseau et de son alimentation électrique

2.2. Notions d'exploitation ferroviaire

3. Enjeu de la décarbonation

3.1. Objectifs

3.2. Des solutions déjà déployées

4. Trains avec des batteries au lithium

4.1. Présentation des batteries au lithium

4.2. Présentation du TER à batteries AGC BEMU

4.3. Domaine de pertinence des trains à batteries – perspectives

5. Trains à Hydrogène

5.1. Présentation de la chaîne de traction

5.2. Présentation pile à combustible / stockage H2

5.3. Contraintes infrastructure

5.4. Sécurité en exploitation

5.5. Perspective d'innovation (ICE, LH2)

6. Panorama et usages

6.1. Solutions développées à la SNCF et dans le monde

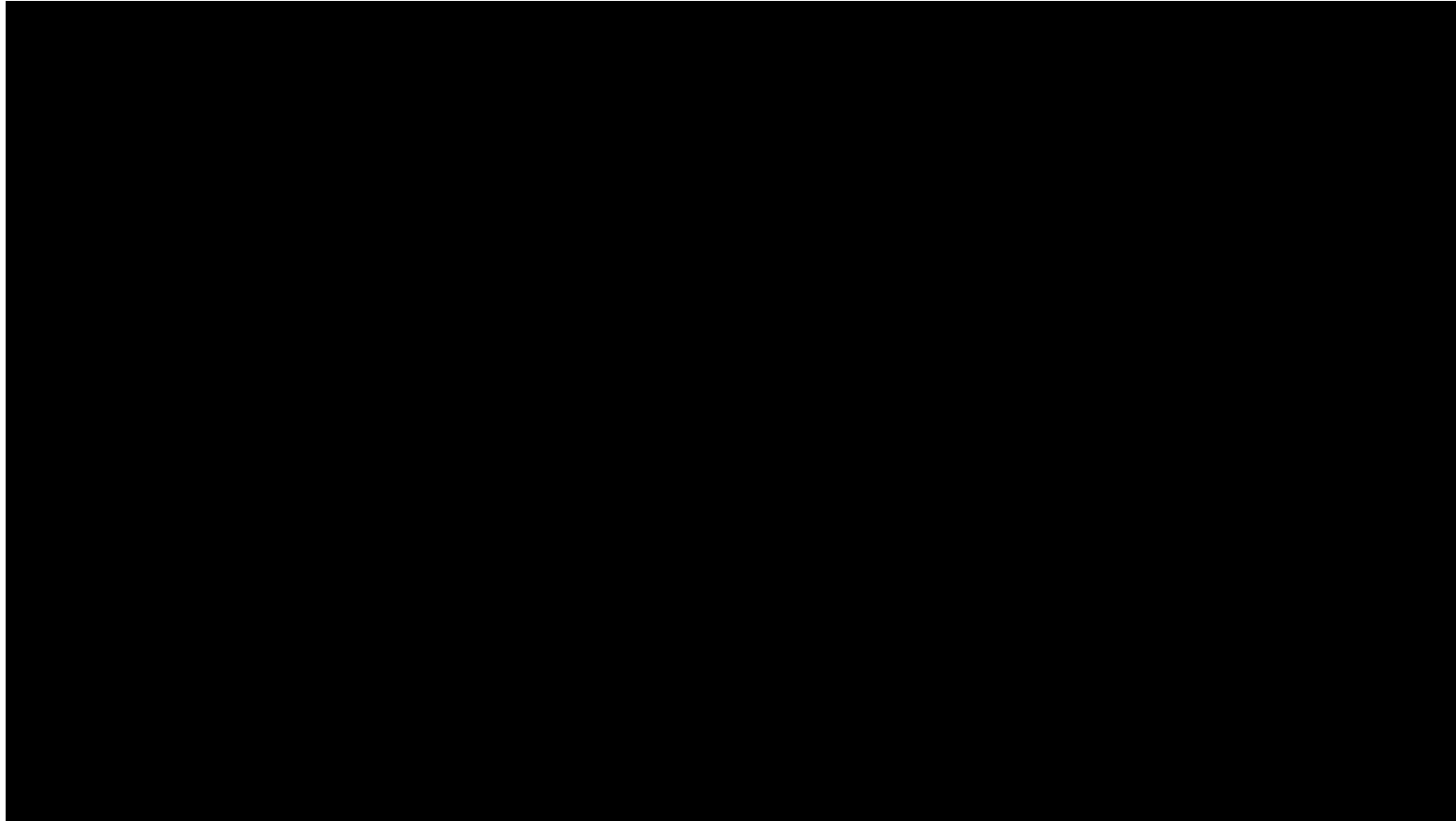
6.2. Quelle technologie pour quel usage?

1.

Présentation du Groupe SNCF

Le groupe SNCF en bref

Parce que une petite vidéo vaut mieux qu'un long discours...



<https://youtu.be/R9P6qTtLmcl>

La SNCF ca n'est pas que des trains...

2.

Découverte du système ferroviaire

Systeme de transport

Définition

Systeme - nom masculin (bas latin *systema*, du grec *sustêma*, composition)

- Ensemble organisé de principes coordonnés de façon à former un tout scientifique ou un corps de doctrine (système philosophique)
- Ensemble d'éléments considérés dans leurs relations à l'intérieur d'un tout fonctionnant de manière unitaire (le système nerveux, les différents systèmes politiques)
- Ensemble de procédés, de pratiques organisées, destinés à assurer une fonction définie (système d'éducation)

Transports - nom masculin pluriel

Ensemble des divers modes d'acheminement des marchandises ou des personnes.

Les éléments constitutifs d'un système peuvent inclure des personnes, du matériel, des logiciels, des politiques, des organismes ou des documents.

Systeme de transport ferroviaire

Définition (directive 2011/18/UE de la Commission du 1er mars 2011)

Domaines de nature structurelle :

- **infrastructures** (la voie courante, les appareils de voies, les ouvrages d'art, les infrastructures associées dans les gares, les équipements de sécurité et de protection),
- **énergie** (le système d'électrification, y compris le matériel aérien et l'équipement au sol du système de mesure de la consommation d'électricité),
- **contrôle-commande et signalisation au sol & à bord** (tous les équipements au sol et à bord nécessaires pour assurer la sécurité, la commande et le contrôle des mouvements des trains autorisés à circuler sur le réseau),
- **matériel roulant** (la structure, le système de commande et de contrôle de l'ensemble des équipements du train, les dispositifs de captage du courant électrique, les équipements de traction et de transformation de l'énergie, l'équipement embarqué de mesure de la consommation d'électricité, les équipements de freinage, d'accouplement, les organes de roulement (bogies, essieux, etc.) et la suspension, les portes, les interfaces homme/machine (conducteur, personnel à bord, passagers, en incluant les besoins des personnes à mobilité réduite), les dispositifs de sécurité passifs ou actifs, les dispositifs nécessaires à la santé des passagers et du personnel à bord).

Domaines de nature fonctionnelle :

- **exploitation et gestion du trafic** (les procédures et les équipements associés permettant d'assurer une exploitation cohérente des différents sous-systèmes structurels, tant lors du fonctionnement normal que lors des fonctionnements dégradés, y compris notamment la composition et la conduite des trains, la planification et la gestion du trafic. Les qualifications professionnelles exigibles pour la réalisation de services transfrontaliers.),
- **entretien** (les procédures, les équipements associés, les installations logistiques d'entretien, les réserves permettant d'assurer les opérations d'entretien correctif et préventif à caractère obligatoire prévues pour assurer l'interopérabilité du système ferroviaire et garantir les performances nécessaires),
- **applications télématiques aux services des passagers et au service du fret** (les applications au service des passagers/fret, y compris les systèmes d'information des passagers avant et pendant le voyage, les systèmes de réservation et de paiement, la gestion des bagages, la gestion des correspondances entre trains et avec d'autres modes de transport, ...)

2.1

Description du réseau et de son alimentation électrique

Réseau ferré national (RFN)

Etat des lieux

27 483 km

de voies ferrées principales exploitées

58 %

de lignes électrifiées sur le RFN

80 %

des déplacements ferroviaires réalisés par SNCF le sont par des trains électriques

6000 km 1500V DC

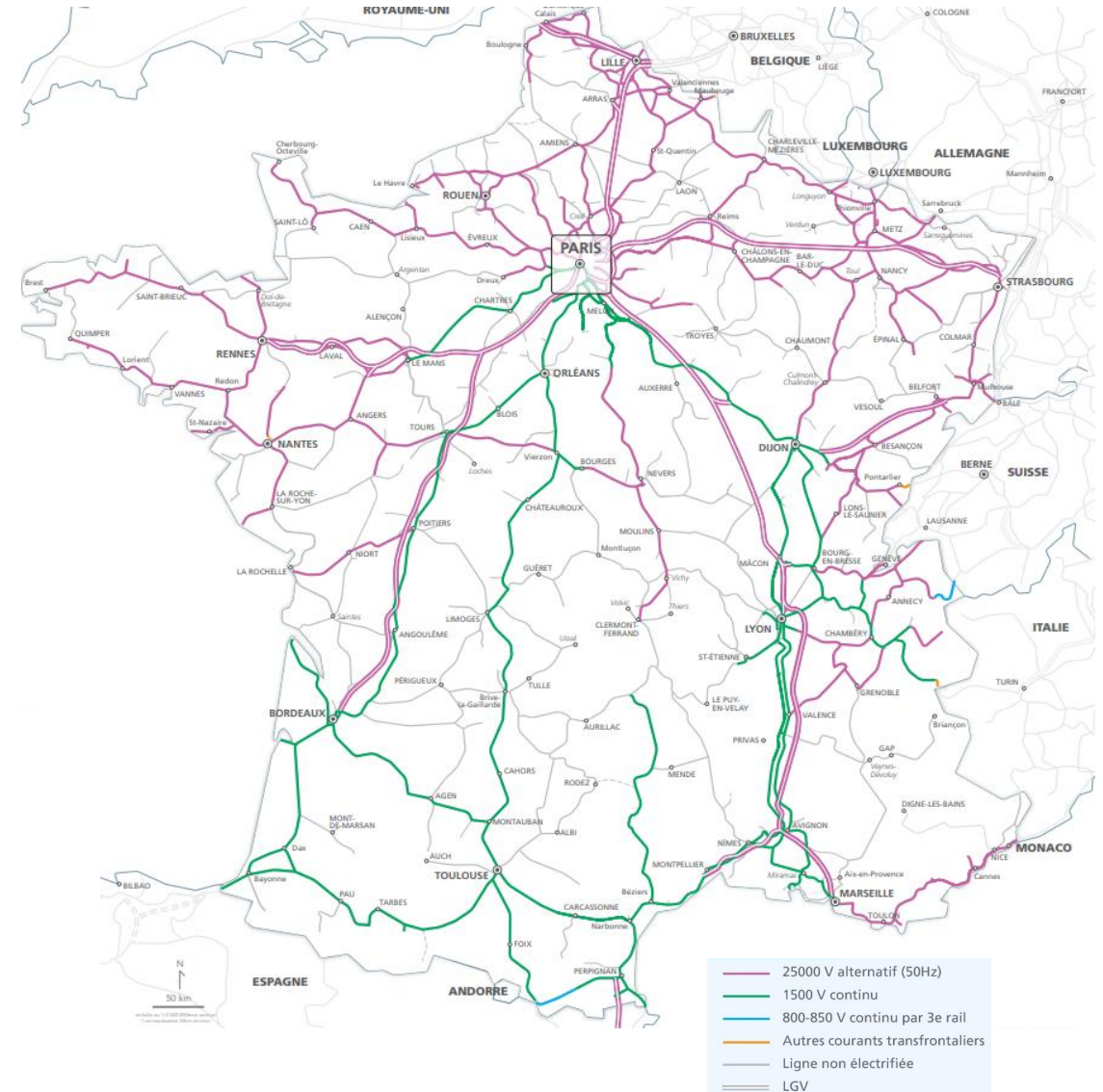
(15% pertes production + distribution DC)

400 sous-stations 1500 V DC

(connectées Enedis ou RTE, 63 .. 15kV)

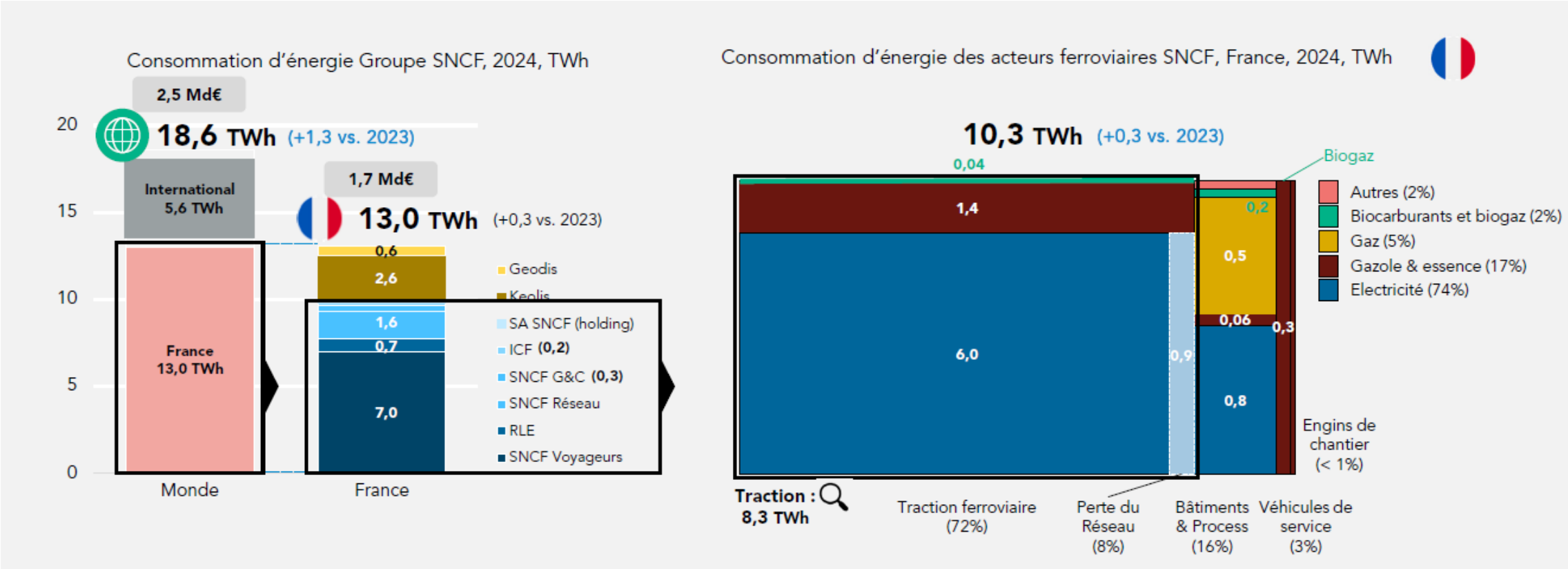
100 sous-stations 25kV 50Hz AC

(connectées RTE 225/400kV 50Hz)



SNCF: un consommateur énergétique important

Quelques ordres de grandeur



2.2

Notions d'exploitation ferroviaire

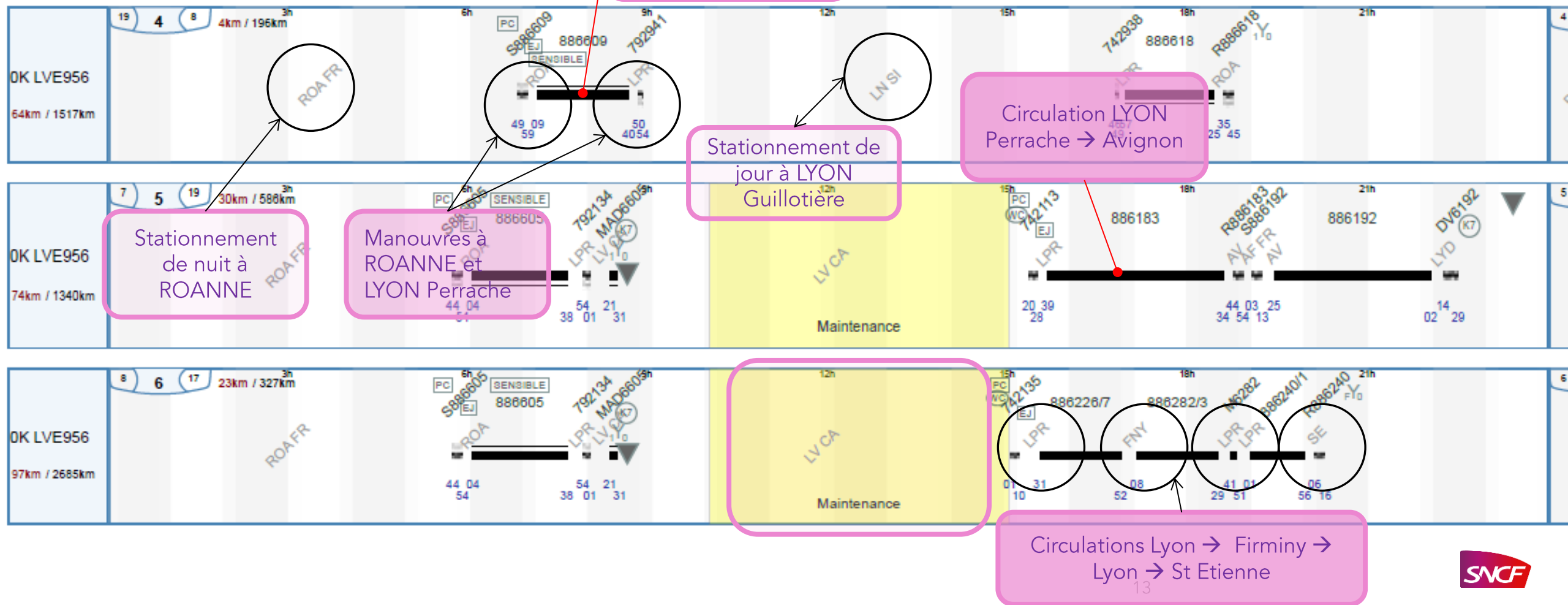
Exploitation ferroviaire

Sillon – roulement, voies principales – voies de service



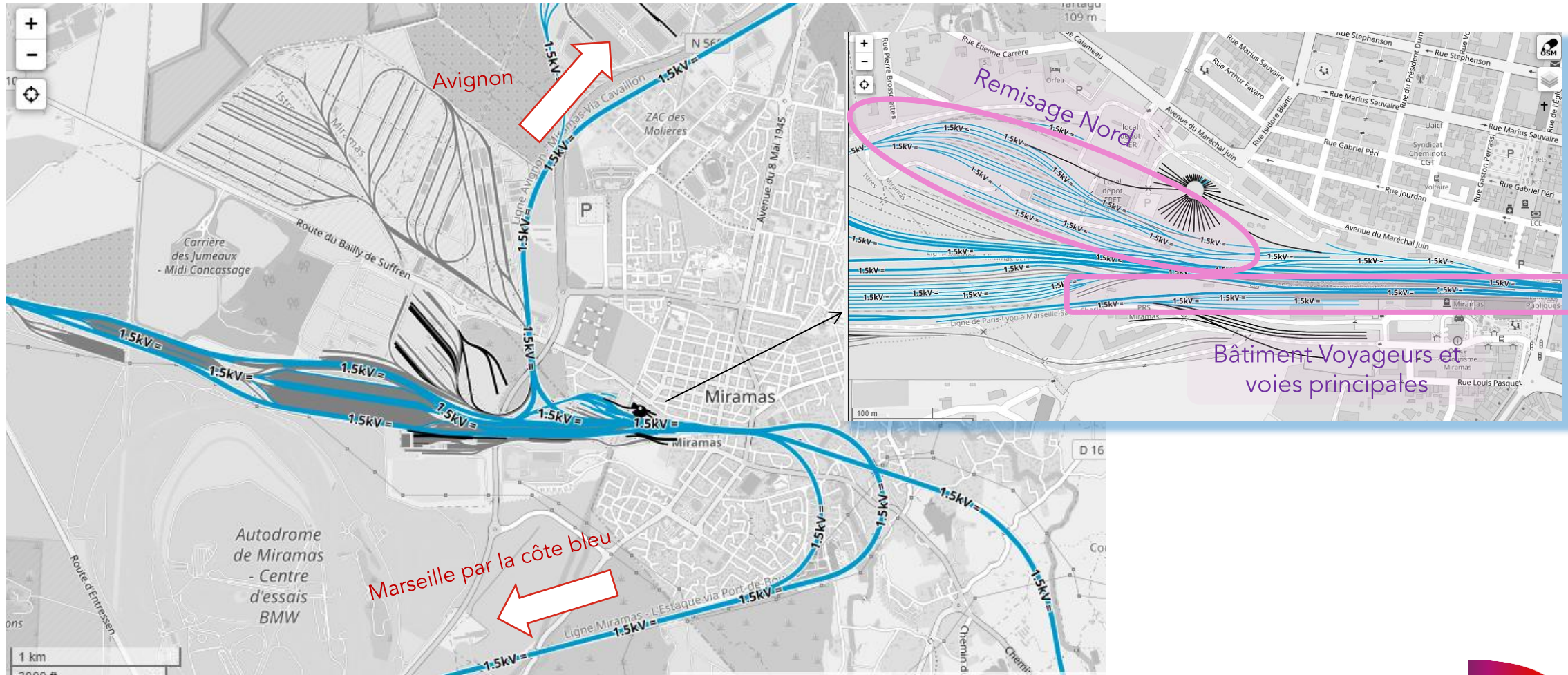
Exploitation ferroviaire

Sillon – roulement, voies principales – voies de service



Exploitation ferroviaire

Sillon – roulement, voies principales – voies de service



Exploitation ferroviaire

Sillon – roulement, voies principales – voies de service



Voies de service à Miramas



Bâtiment Voyageurs et les voies principales à St Pol sur Ternoise

3.

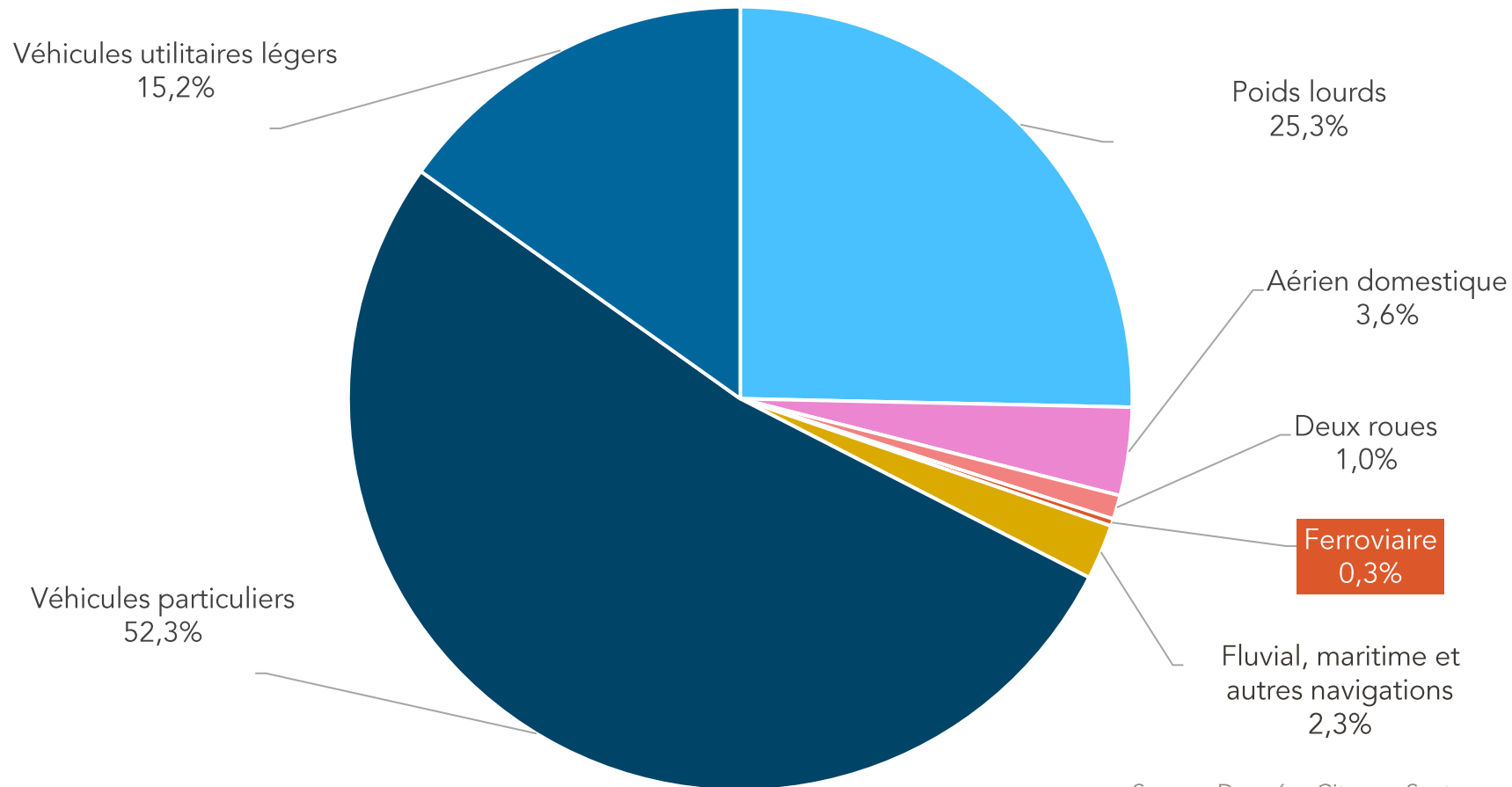
Enjeux de la décarbonation

3.1

Objectifs

Émissions de CO₂ du secteur des transports

France - 2022



Source: Données Citepa - Secten

Le secteur des transports est responsable de 32% des émissions de CO₂ en France

0,3% de ces émissions sont dues au ferroviaire

Des objectifs élevés de décarbonation du ferroviaire

Le train est un moyen de transport peu carboné, mais le Groupe SNCF veut aller plus loin



Objectifs du Groupe SNCF

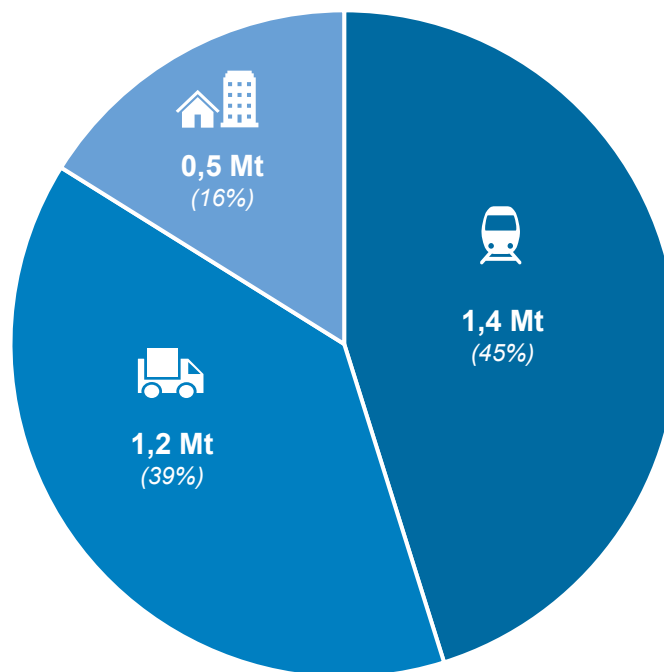
2030

Baisse de 30% des émissions de GES vs. 2015

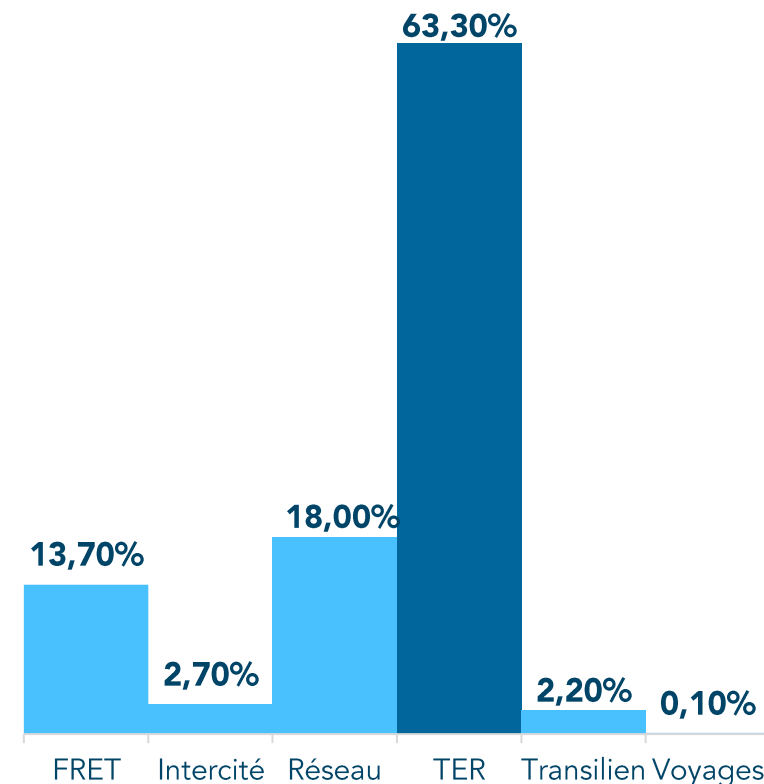
2050

Aucune émission nette

Principaux postes d'émission de GES scopes 1&2 du Groupe SNCF



Émissions de GES par activité de traction ferroviaire



Décarboner les trains diesel de TER est un levier majeur pour atteindre les objectifs du Groupe SNCF

3.2

Des solutions
déjà déployées

Des solutions déjà déployées sur les trains

SNCF Voyageurs est déjà la manœuvre

➤ **B100**

Depuis avril 2021, SNCF Voyageurs fait circuler sur la Ligne Paris – Granville, 15 rames REGIOLIS avec du biocarburant en remplacement du diesel :

- ✓ plus de 11 millions de kilomètres parcourus
- ✓ plus de 18,6 millions de litre de gazole non consommés
- ✓ plus de 34 500 tonnes de CO2 économisées

➤ **Eco conduite**

Les conducteurs sont formés à l'écoconduite notamment grâce à la connaissance de la ligne empruntée.

➤ **Eco stationnement**

Entre deux missions les moteurs des trains sont arrêtés.

➤ **Innovations technologiques**

Pour réduire l'énergie de traction comme le nouvel aérodynamisme des TGV nouvelles génération.

Sobriété et efficacité sont les maîtres mots!

Mais aussi dans le système ferroviaire

Car le ferroviaire, ca n'est pas que des trains...

... C'est aussi des gares

Avec des projets de solarisations chez SNCF Gares & Connexions

... C'est aussi des Technicentres de Maintenance

Le remplacement de solution de chauffage (les ateliers sont grands!)

... C'est aussi des hubs énergétiques

Avec un gisement solaire en cours d'estimation par SNCF Renouvelables (bords de voie, champs solaire, etc) avec un objectif de 1000 MWc d'ici à 2030.

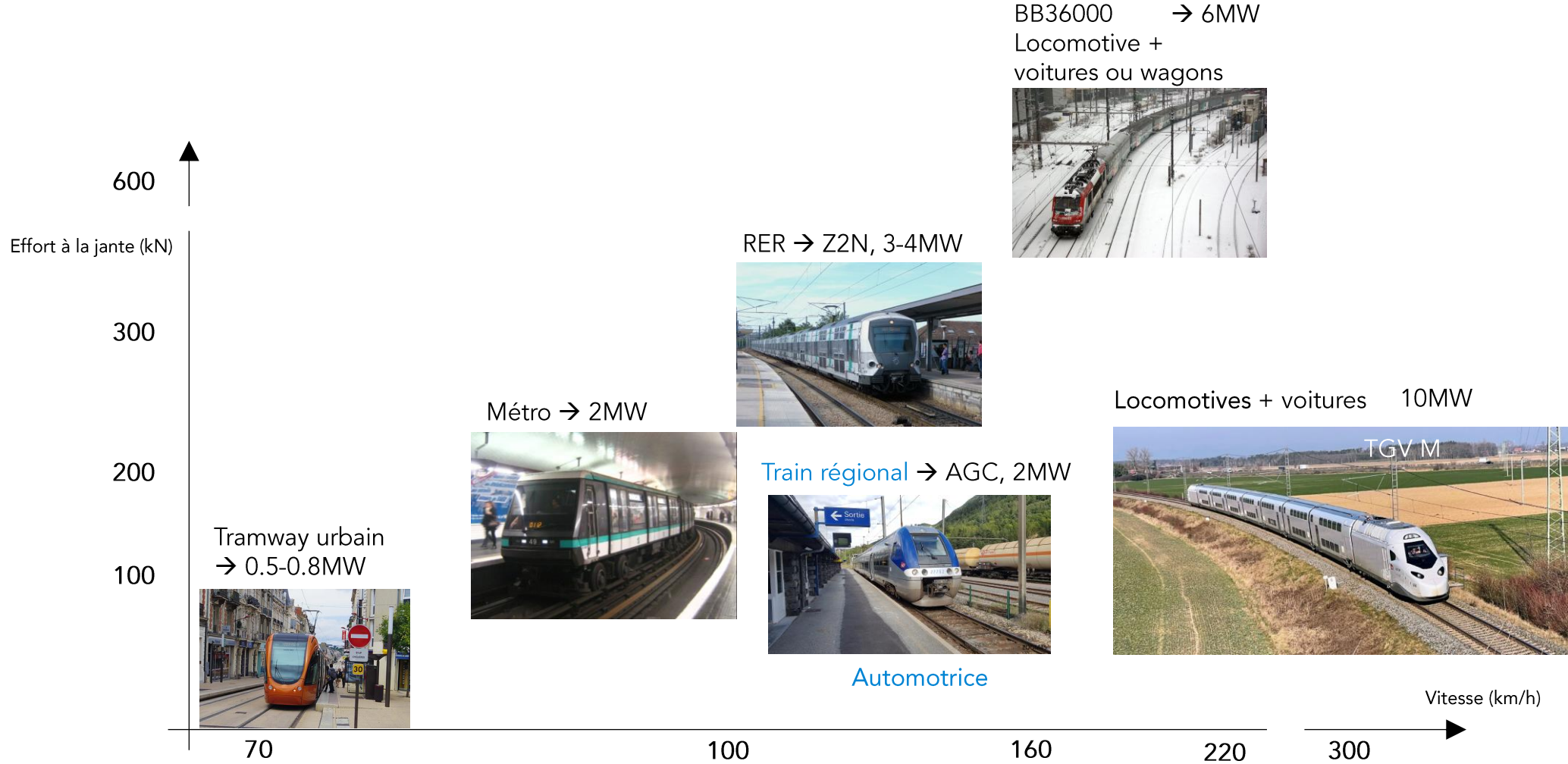


27 mars 2026

4.

Trains avec des batteries au lithium

Trains électriques en France



BB36000 → 6MW
Locomotive +
voitures ou wagons



RER → Z2N, 3-4MW



Métro → 2MW



Train régional → AGC, 2MW



Automotrice

Locomotives + voitures 10MW



TGV M

Vitesse (km/h)

Parallèle technologique avec l'automobile

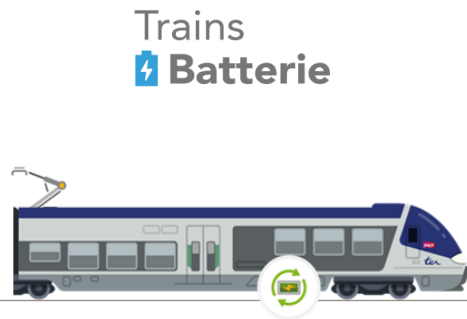
Train bi-mode
Caténaire - (Hybride batterie-moteur diesel)



Toyota Prius (hybride)



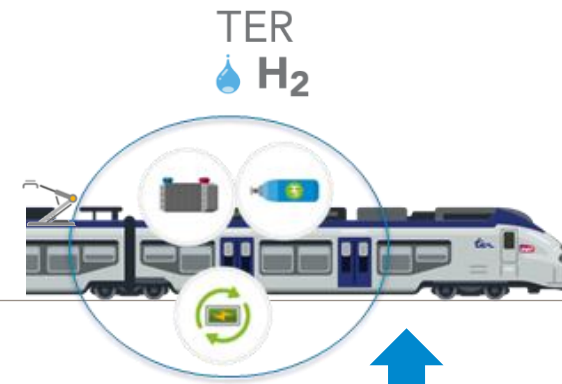
Train **bi-mode**
Caténaire - Batteries



Tesla / Renault Zoé



Train bi-mode
Caténaire - (**Hybride** batterie-pile à combustible)

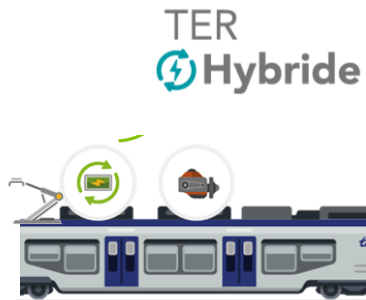


Toyota Mirai



Parallèle technologique avec l'automobile

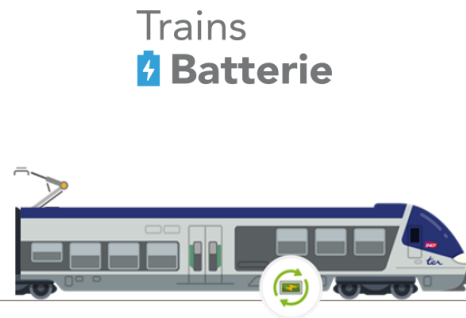
Train bi-mode
Caténaire - (Hybride batterie-moteur diesel)



1er Régiolis Hybride au Technicentre de
Toulouse, nov. 2023



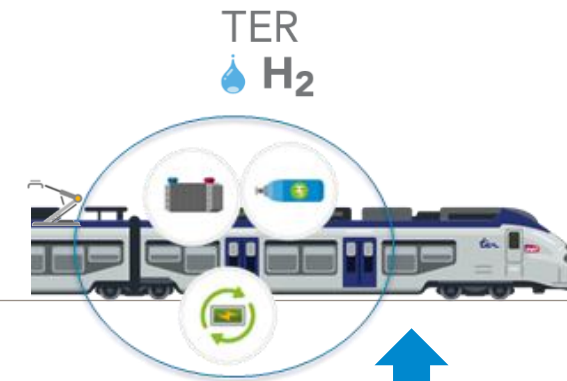
Train **bi-mode**
Caténaire - Batteries



1er AGC à batteries au Centre d'Essais
Ferroviaire de Bar-le-Duc, oct. 2023



Train bi-mode
Caténaire - (Hybride batterie-pile à combustible)



1er Régiolis H2 de présérie en cours de montage à
l'usine CAF de Reichshoffen, juil. 2023



4.1

Présentation des batteries au lithium

Diffusion de la batterie au lithium dans le domaine ferroviaire

Apport de la science et du domaine automobile

Développement techno (NMC/NCA/LFP),
intégration, volume & coûts industrie automobile



Electrification: Lab to Widespread Adoption

Source: Dr. John Warner



Masse voiture avec batteries : 2t (dont
~250kg la batterie Li+), 330km autonomie,
modèle économique ↗

Industrialiser une nouvelle technologie nécessite un effort sur la durée

Diffusion de la batterie au lithium dans le domaine ferroviaire

2003: KiYa E991 (NE train - prototype), JR East+RTRI, Diesel & Batterie Li+ (10÷15 kWh)

2007: 1st hybrid, Kiha E200, JR East, Diesel & Li+ battery (15kWh)

2010: 1st shunting loco Toshiba HD300

2013: 1st BEMU, 817 Series (DENCHA), JR Kyushu, bi-mode 20kVAC or Li+ battery (380kWh)

2014: BEMU, EV-E301 (ACCUM), JR East, bi-mode 1500Vdc or Li+ battery (190kWh)

2018: 5000 Series, Keio Corp, EMU + Li+ battery, commuter

2019 → +40 on-ground BESS

2020: N700S, JR Central, Shinkansen + Li+ battery (backup)

LMO / LTO



2022: EMD Joule from ProgressRail 14,5MWh line loco, Wabtec 7MWh

2023-2024: MBTA (Boston), Metra (Chicago), Caltrain (San Francisco .. Bi-Level Dual Electric and Battery Powered Train) – partial electrification projects



2016: proto 1st H2 train, Coradia iLint, Alstom Fuel cell & Li+ battery (220kWh), approved Germany since 2022

2018 Innotrans: many shunting loco & Talent 3 Bombardier bi-mode proto 15kVAC or Batterie Li+ (150kWh)

2023: Class 777 Stadler metro (Merseyrail, UK)

2024: Stadler Flirt AKKU for NAH.SH (Germany) Siemens Mireo+Batt SWEG on Ortenau Network (Germany) Stadler ServiceJet 1st rescue train, fight against fire in tunnels (Austria)

LTO / NMC / LFP



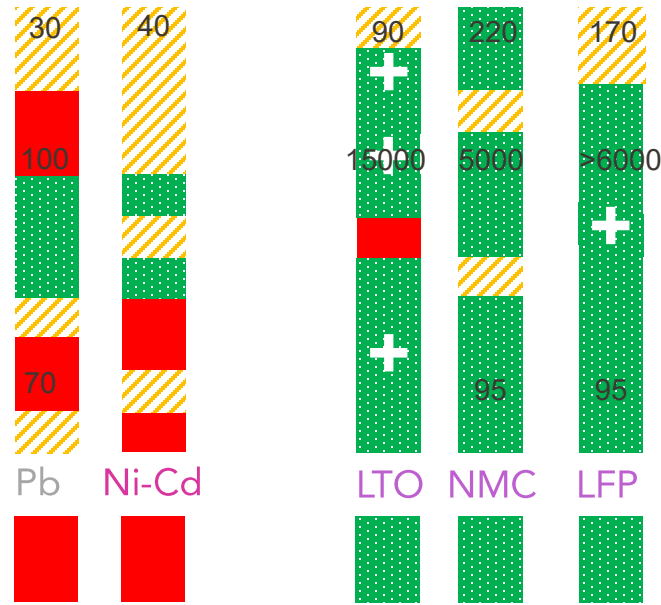
Loco, mais pas uniquement ...



Industrialiser une nouvelle technologie pour une industrie de niche est un défi

La batterie au lithium, un *game changer*

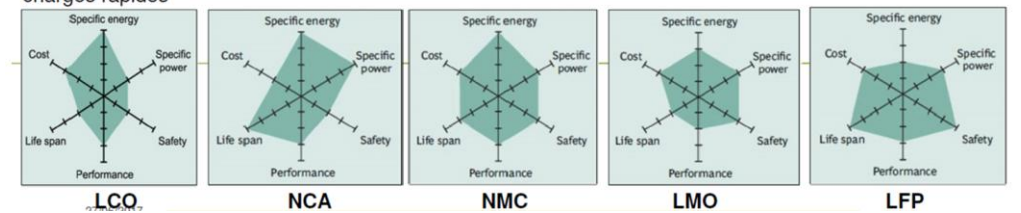
- Energie [Wh/kg, Wh/l]
- Puissance [W/kg]
- Basse température
- Cyclabilité
- Maturité
- Coût
- Sécurité
- Maintenance (fréq)
- Temps de recharge
- Rendement
- Autodécharge
- Plage d'utilisation
- Maintenance préventive



Lithium-ion les plus utilisées dans le domaine ferroviaire

La « famille lithium »

Abréviation	Matériau électrode positive	Matériau électrode négative	Tension nominale (V)	Tension utile (V)	Energie massique pratique (Wh/kg)
LCO	LiCoO ₂	C	3,6	4.1 – 3.3	150
NCA	LiNiCoAlO ₂	C	3,6	4.1 – 3.3	150
NMC	LiNiMnCoO ₂	C	3,6	4.1 – 3.3	145-160
LMO	LiMn2O ₄	C	3,8	4.1 - 3.7	110 – 120
LFP	LiFePO ₄	C	3,2	3.3 – 3.0	100-110
LTO *	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	2	1,8 – 2V	50 – 70
* dédiée charges rapides	NMC	LTO	2,3	1,5 - 2,7	90



Composants d'une batterie au lithium

Cellules cylindriques



Cellules prismatiques



Cellules « pouch »



Electronique de control (BMS)

... Modules ...



Höppecke LiTrac (54kWh, 1235kg) LTO



Toshiba (27kWh pour Shinkansen) LTO



Leclanché INT-53 Energy (53kWh, 500kg) NMC



ABB Pro Series (35,3kWh, 595kg) LTO

90 .. 220Wh/kg

31 40 .. 100Wh/kg



4.2

Présentation du TER à batteries (AGC BEMU)

TER à batteries, projet « AGC BEMU »

Choix de la série à modifier

~50%

des rames AGC concernées possiblement par une transformation en train à batteries

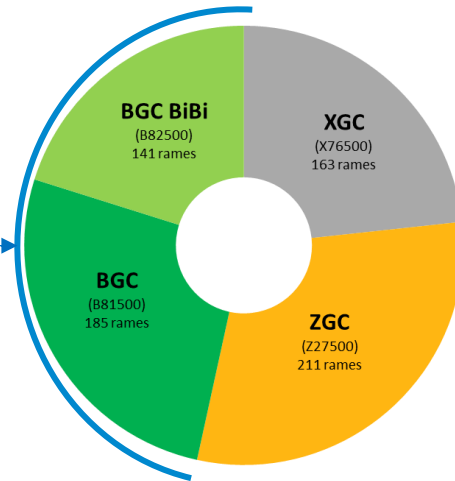
Un parc TER de **2300 RAMES** dont ~50% à motorisation thermique, parmi lesquels :

700 AGC (à rénover <2030)

175 Régiolis bimode (à rénover >2032)

334 X73500 (à remplacer)

90 X72500 (à remplacer)



X76500 : 163 trains 100% diesel

B81500 : 185 trains bimode (1.5kVdc & diesel)
160km/h max, 130/240 places (3/4 voitures)

B82500 : 141 trains bimode (1500Vdc/25kVac & diesel)
160km/h max, 240 places (4 voitures)

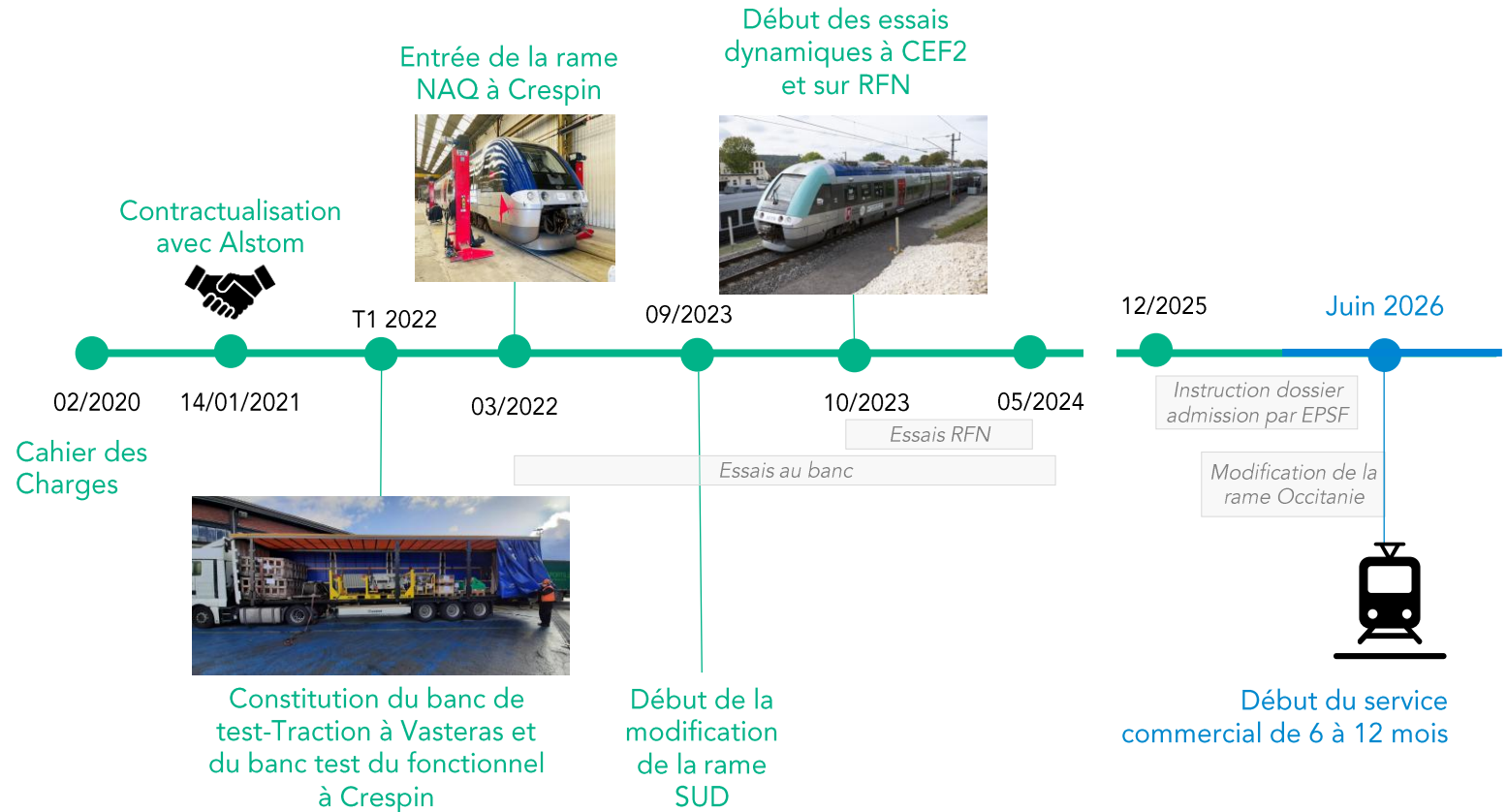
Z27500 : 211 trains 100% électriques

2004-2011 Fabrication par Bombardier
2022→ Rénovation en cours pour redonner du potentiel pour encore 20ans



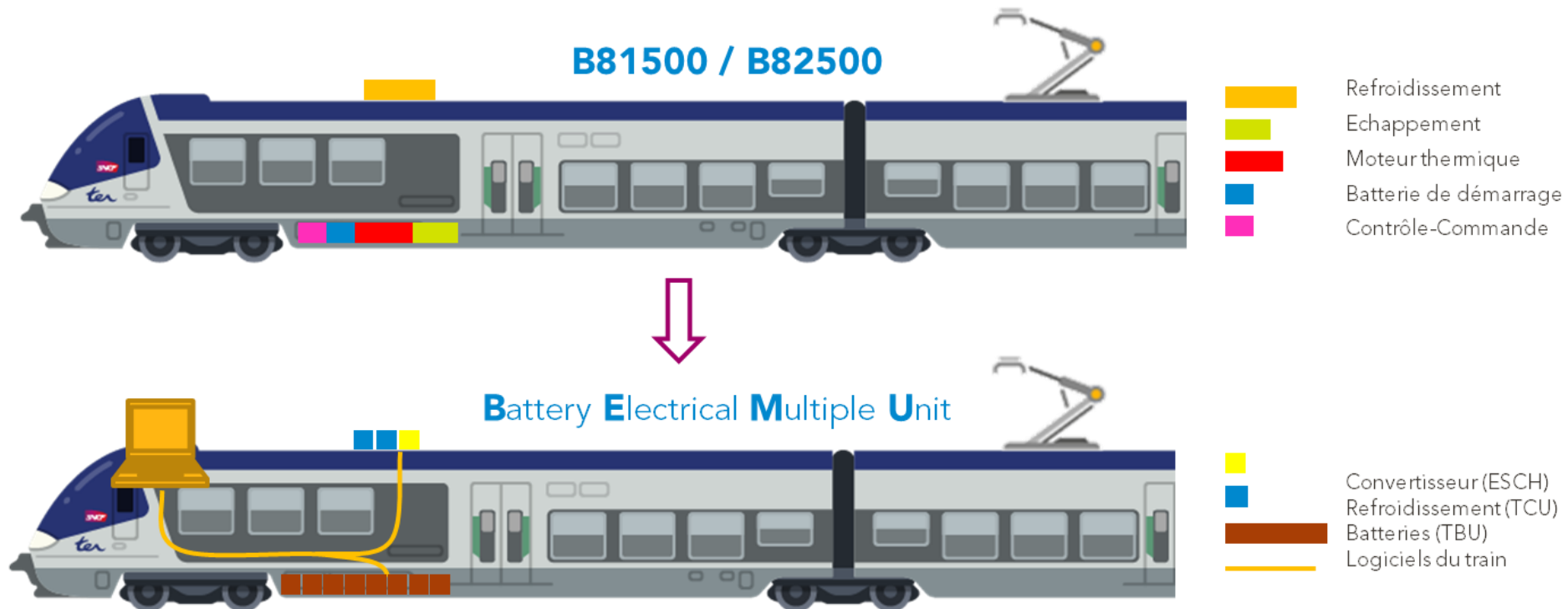
Expérimentation AGC à batteries

Partenaires et *milestones*



Principe de la modification des AGC

Remplacement, en lieu et place, des 2 moteurs diesel par des batteries au Li+



Principe de la modification des AGC

Remplacement, en lieu et place, des 2 moteurs diesel par des batteries au Li+



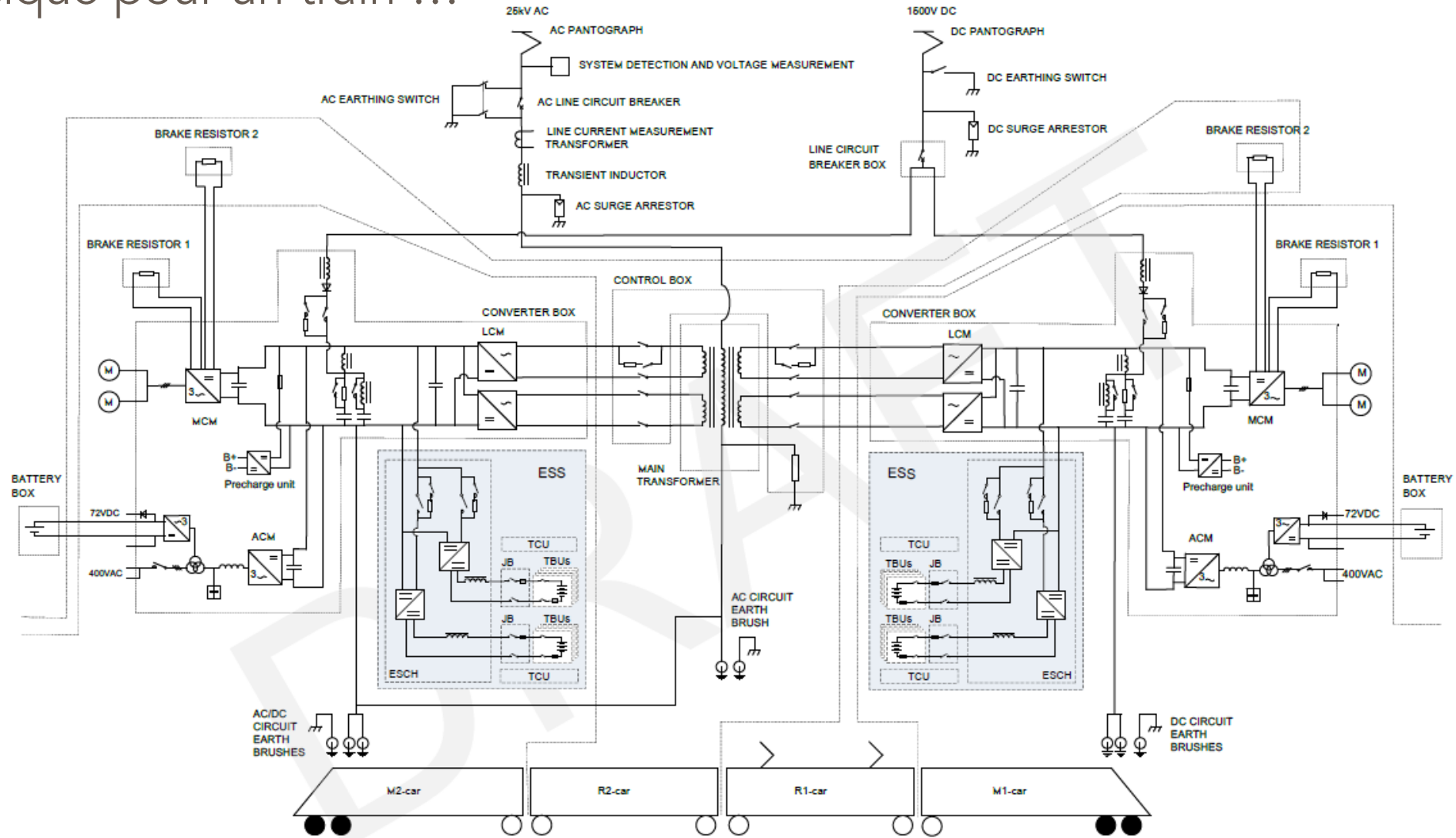
8 batteries dans chaque motrice



4 groupes de refroidissement et 2 coffres DC/DC sont installés sur une rame

Chaine de traction

Classique pour un train ...

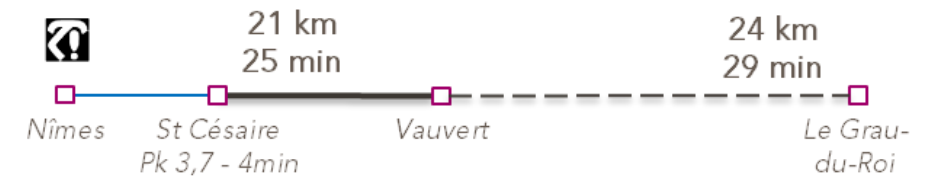
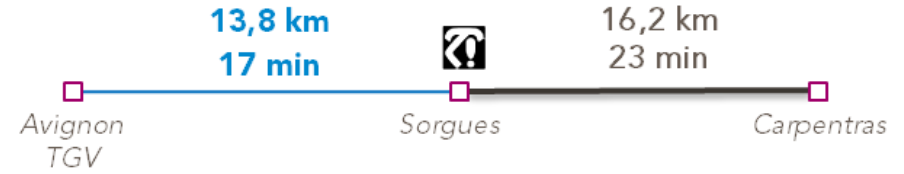


Caractéristiques des AGC à batteries

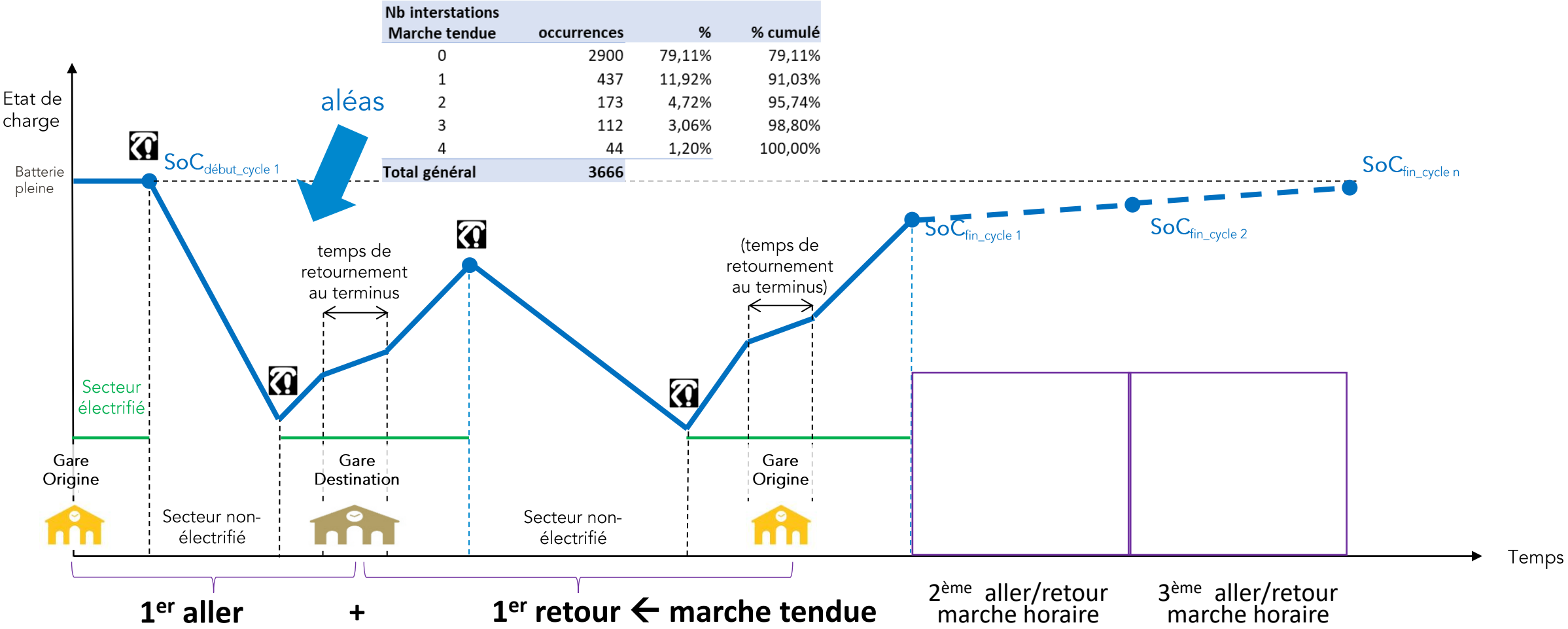
Autonomie visée	80 km minimum + réserve de 120kWh (soit ~1h AUX ou 20km traction)									
Vitesse maximale	Vmax = 160 km/h									
Performances de traction	Equivalentes à une rame thermique XGC sur une ligne non-électrifiée et à une rame électrique ZGC sous caténaire									
Économies d'énergie	Récupération au freinage									
Temps maximal pour une recharge complète (à partir d'une batterie vide)	<table><thead><tr><th></th><th>1500V</th><th>25kV</th></tr></thead><tbody><tr><td>À l'arrêt</td><td>60 min</td><td>25 min</td></tr><tr><td>En roulant</td><td>25 min</td><td>25 min</td></tr></tbody></table>		1500V	25kV	À l'arrêt	60 min	25 min	En roulant	25 min	25 min
	1500V	25kV								
À l'arrêt	60 min	25 min								
En roulant	25 min	25 min								
État de santé des batteries	Garantie d'une durée de vie de 10 ans									
Fiabilité	Tendre vers celui d'une rame électrique ZGC									
Disponibilité	Supérieure à une rame thermique XGC (grâce à la redondance des hacheurs)									
Performances acoustiques	Equivalente à une rame BGC en mode thermique									
Couplabilité UM2	Inter-BEMU & avec le reste du parc BGC & ZGC non-modifiées									
Energie restante	L'agent de conduite connaît à chaque instant « l'équivalent de la distance restante ».									

Lignes empruntées durant expérimentation

Hypothèse forte : ISO-infrastructure



Robustesse de l'exploitation



Figurer les performances du matériel roulant et ne souhaitant pas modifier l'infrastructure électrique reporte des contraintes sur l'exploitation ferroviaire



Sécurité des batteries au lithium

Principes de design :

- segmentation du stockage en plusieurs sous-systèmes qui ne permettent pas une propagation du feu
- aucune flamme ne doit sortir de l'enveloppe



Dans le domaine ferroviaire, la conception des batteries de traction suit des normes et des principes plus sévères que ceux de l'automobile.

Sécurité des batteries au lithium

Principes vérification :

- Identifier les dangers raisonnablement prévisibles au regard de chaque interface impactée
 - Évaluer la criticité des risques
 - Définir les moyens de couverture du risque suivant la Méthode de Sécurité Commune
- ... **pour toutes les situations d'exploitation & de vie du train**

CONFIDENTIEL

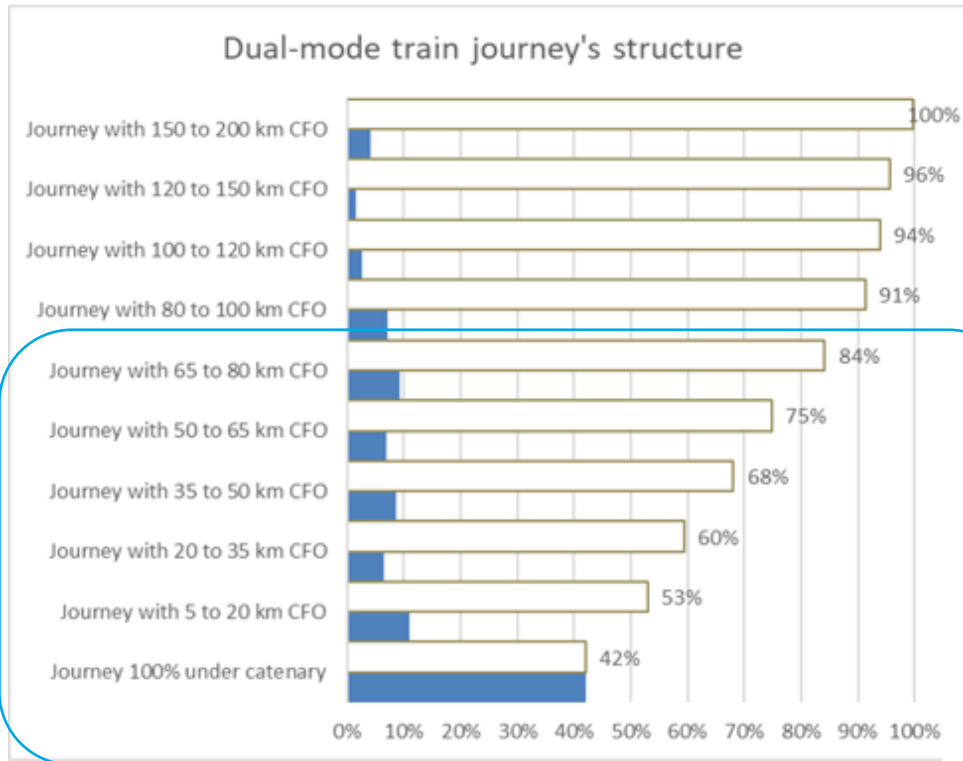
Les exigences sécuritaires de SNCF vont au-delà des normes

4.3

Domaine de pertinence des trains à batteries - perspectives

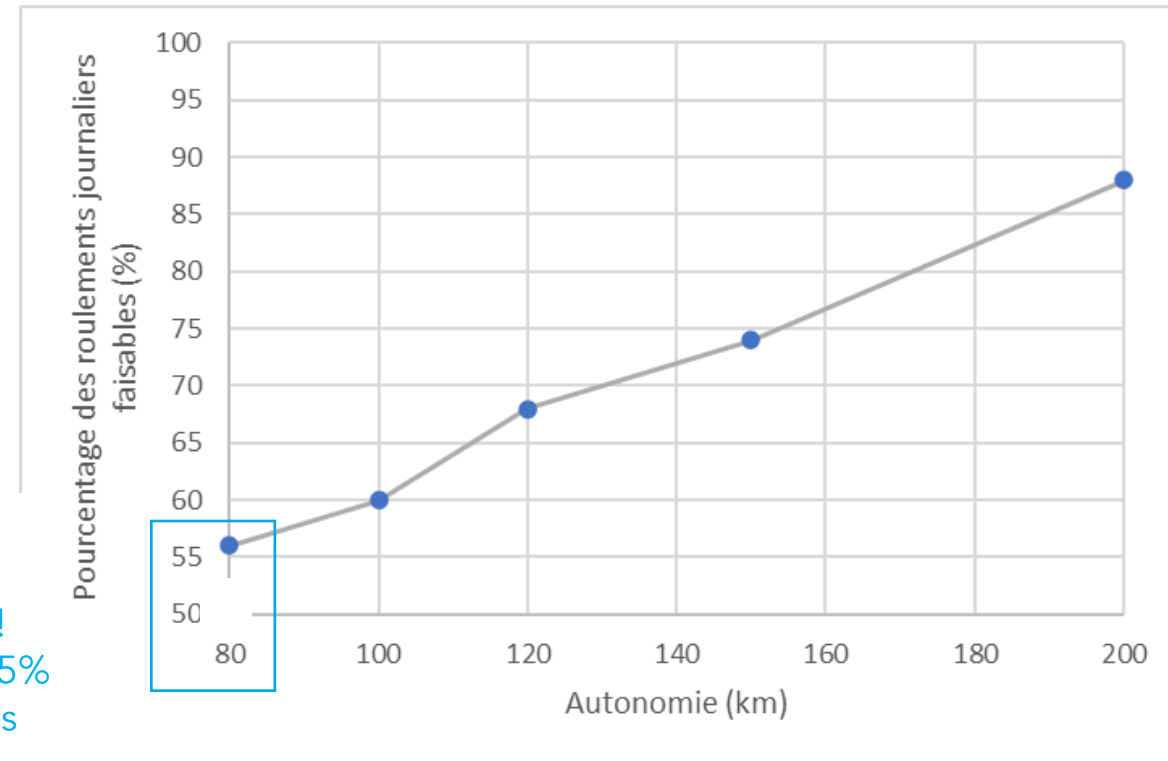
Domaine de pertinence des trains à batteries en France

vision Origine - Destination



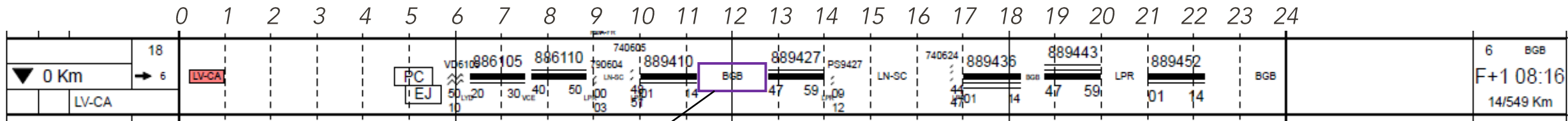
84% des OD sont inférieurs à 80km !
... mais seulement 55% des roulements des BGC !

vision Roulement



3 leviers pour augmenter le domaine

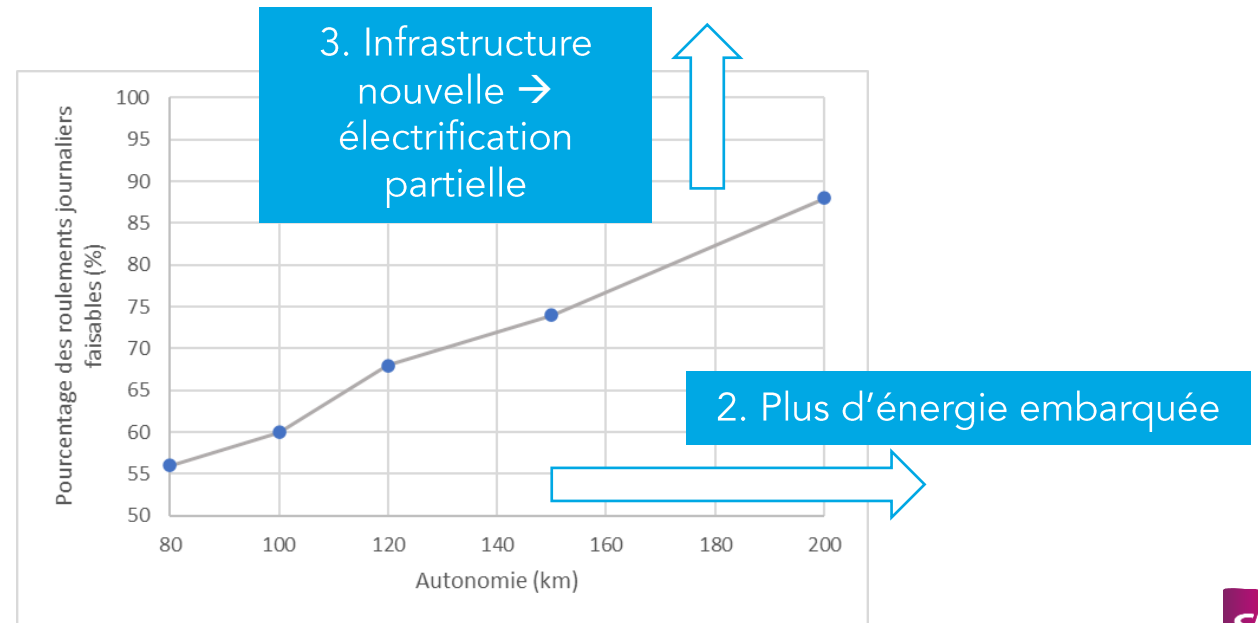
Optimisation de l'équation « infrastructure – matériel roulant – exploitation »



Temps d'arrêt, de charge au terminus : 33 min ... insuffisant !
62 min, ... 181 min suffisantes pour charger la batterie.

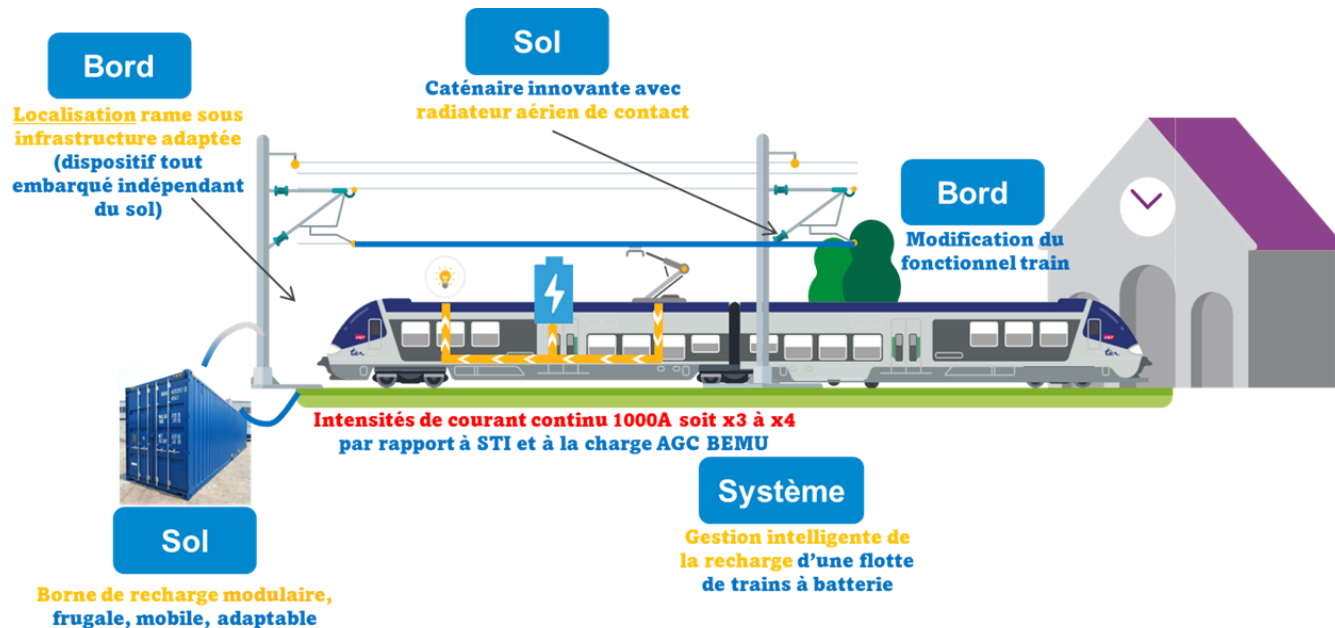


1. Recharger plus vite (15-20min)



Levier 1 : recharger plus vite sous 1500V DC

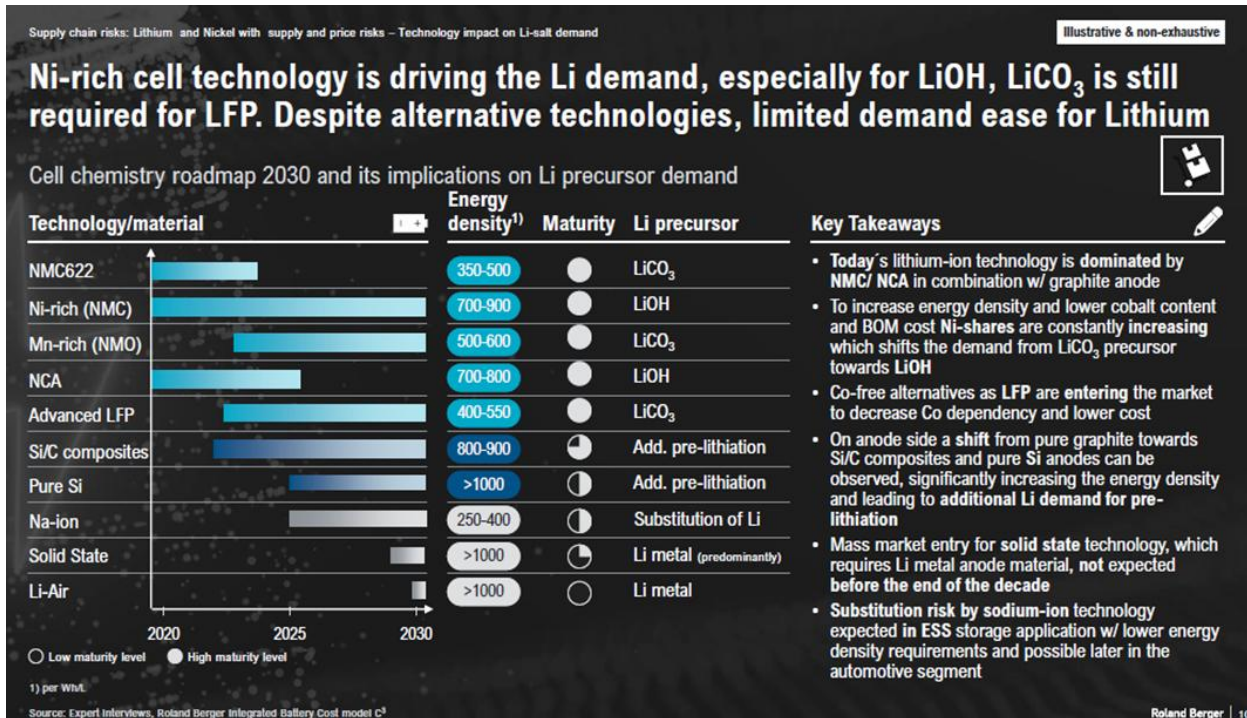
Modification de l'infrastructure pour passer de 300 à 1000A



	Temps charge (minutes) :	Temps charge complète (minutes) à l'arrêt sous 1500Vdc
	<ul style="list-style-type: none"> en roulant sous 1500V ou 25kV, à l'arrêt sous 25kV 	
AGC BEMU	35	60
AGC BEMU + Recharge rapide dynamique	25	60
AGC BEMU + Recharge rapide statique	25	25

Levier 2 : embarquer plus d'énergie

BEMU long range 200km



ERJU – FA4

2023 + 2025, sous-système

ERJU – call 2

2027 + 2028, niveau banc



Projet européen « Rail4Earth » (suite Shift2Rail)



1. Spécifier une batterie permettant d'atteindre 200km d'autonomie et tester ses performances sur banc :

Préfiguration des interfaces mécaniques et électriques, modularité, augmentation du facteur d'intégration, recharge rapide partielle.

2. Augmentation de la sécurité des batteries au lithium ferroviaires tout en gardant d'excellentes performances énergie/puissance te durée de vie

Levier 3 : électrification partielle

L'exemple irlandais sous 1500V DC



Alstom est en train de fournir à Iarnród Éireann 31 rames BEMU type X'trapolis, 5 caisses pour 550 passagers, 82m longueur, 2 pantographes, rame type RER.

Batterie 840kWh (NMC) → autonomie 80km.

Une recharge rapide à l'arrêt dans la gare terminus de Drogheda est prévue. Le réseau de la ville (11kV) étant trop faible, un buffer d'énergie (batteries au Li) a été rajouté.



Levier 3 : électrification partielle

L'exemple irlandais sous 1500V DC



DART est le RER de Dublin, aujourd'hui son réseau électrifié n'est pas étendu et est en mauvaise état. La banlieue utilise des trains diesel.

The DART+ Programme is being implemented by Iarnród Éireann as part of Project Ireland 2040 and the NTA's Transport Strategy for the Greater Dublin Area (2022-2042).

Les objectifs de DART+ sont :

- extension du réseau électrifié,
- augmentation de la capacité des trains et leur fréquence
- réduction de l'empreinte carbone par l'utilisation des trains électriques
- soutenir la croissance des communautés, des entreprises et le développement futur en fournissant un service de transport public intégré de haute qualité, conformément à la politique du gouvernement, y compris le cadre national de planification et le plan d'action pour le climat.

Les trains à batteries permettent de **décarboniser le trafic durant les longues années de travaux d'électrification**.

Ils offrent la possibilité de **phaser l'électrification**, ligne par ligne, tout en utilisant du matériel roulant décarboné qui peut migrer d'une ligne à une autre.

Après 10ans d'utilisation des trains à batteries, deux options s'offrent : remplacement des batteries (si l'exploitation des rames BEMU a donné satisfaction) ou leur dépose et transformation en rames 100% électriques.

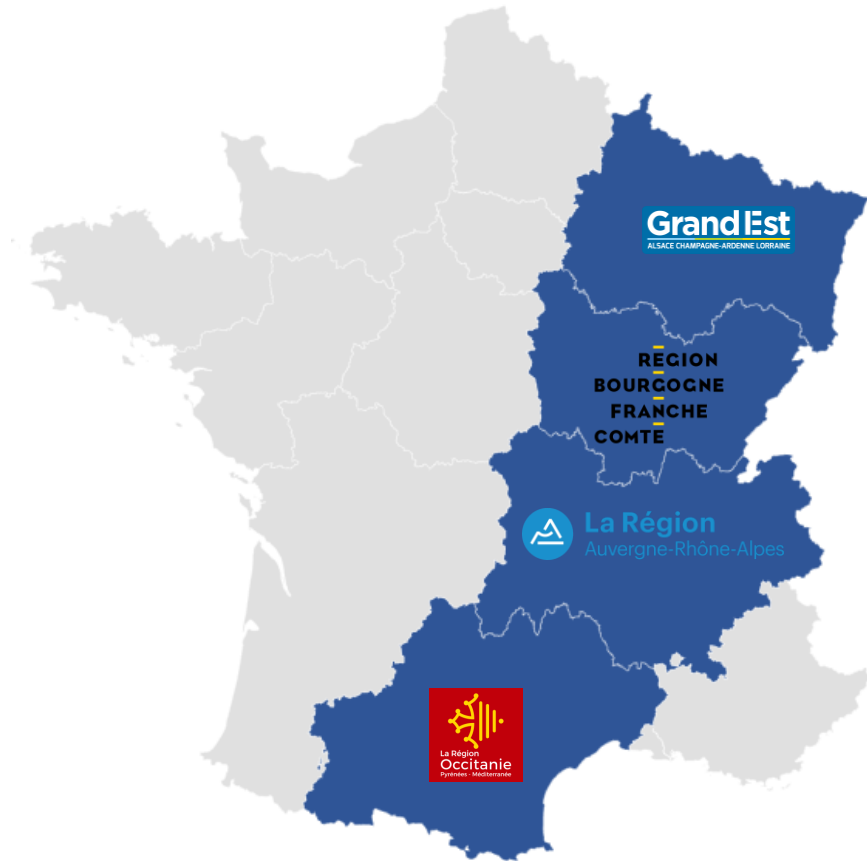
5.

Trains à hydrogène



Les partenaires du projet

14 rames Régiolis H₂ commandés dont 2 en option



Contrat SNCF-ALSTOM
(avenant au contrat Régiolis)
NTP (Notification) le 31/03/2021



Régions	Nb de rames
Auvergne Rhône-Alpes	3
Bourgogne Franche Comté	3
Occitanie	3
Grand-Est	3 (+2)

5.1

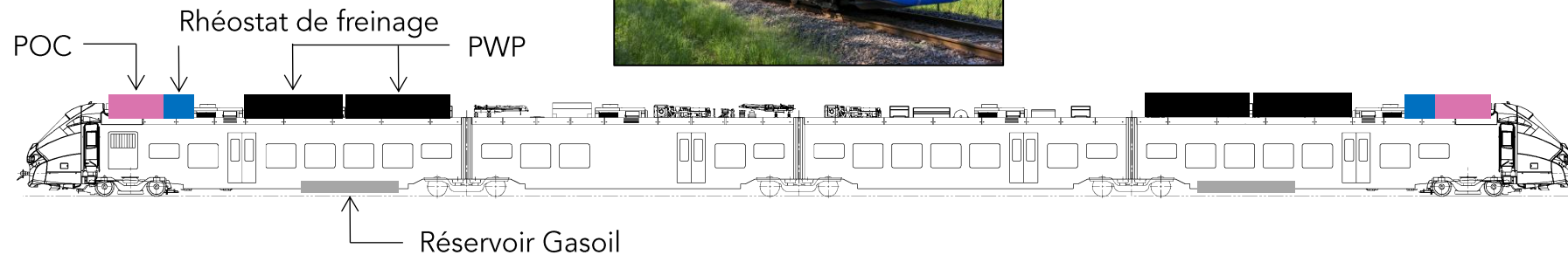
Présentation de la chaîne de traction

Un matériel équipé de 2 chaines de traction indépendantes

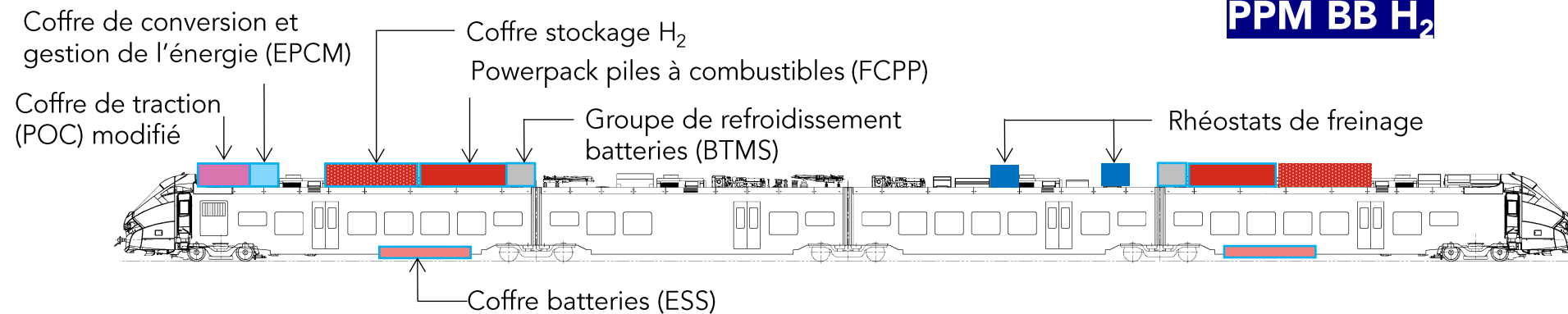
Régiolis Bimode Z / H2 – Bitension 25kV/1500V – Porteur Polyvalent Moyen 4 Caisses



PPM BB « classique »



PPM BB H₂



La modification est possible en retrofit sur les REGIOLIS existants

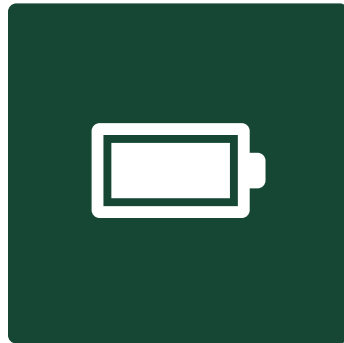
Caractéristiques principales du matériel roulant



Vmax

160 km/h (idem Regiolis diesel)

Autonomie jusqu'à 600 km



Piles à Combustible

Puissance de 2 x 330 kW



Couplabilité

UM2

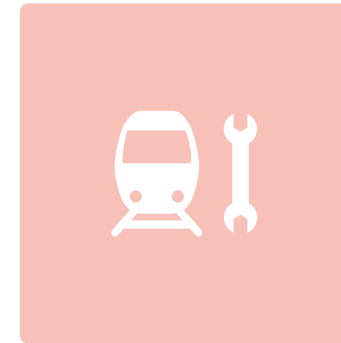
Fiabilité / disponibilité

meilleures que la rame bi-mode diesel



Stockage H2

2 racks de 8 bouteilles par véhicule d'extrémité soit 190 kg par rame



Coûts de maintenance

inférieurs à la rame bi-mode diesel



Batteries Li-Ion

Capacité embarquée de 2 x 100 kWh
Complément de puissance des PAC et récupération de l'énergie de freinage
Possibilité de circulation sur batterie seule pendant qlq km

Présentation de la chaîne de traction

Une architecture bi-mode classique

- ✓ La batterie fonctionne en complément des piles à combustibles mais permet aussi la récupération énergétique.
- ✓ Les piles à combustible sont intégrées dans une architecture redondante permettant de maximiser la disponibilité en cas de défaillance.

CONFIDENTIEL

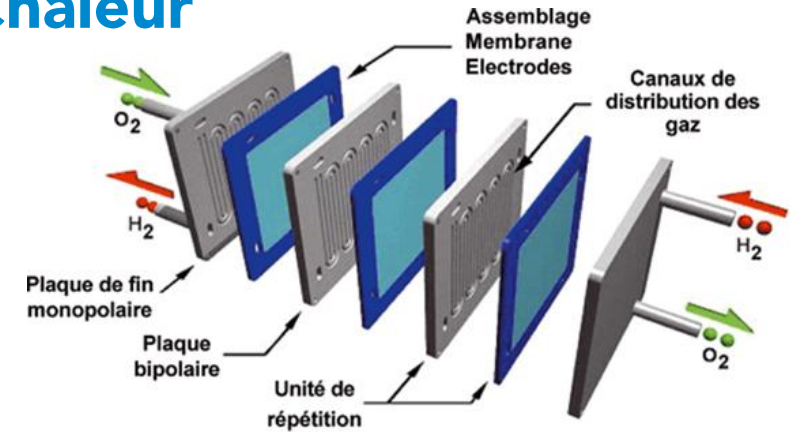
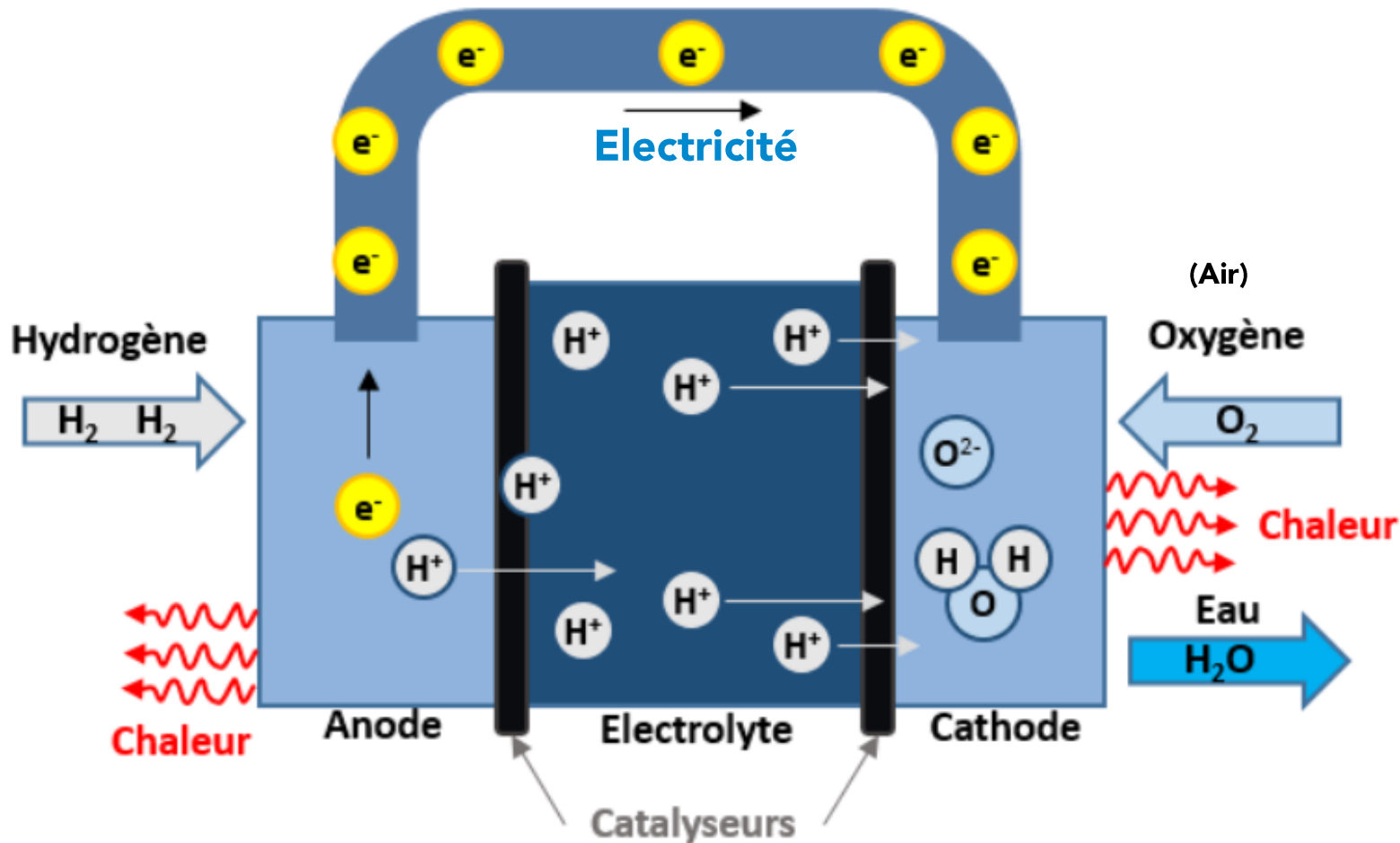
5.2

Présentation pile à combustible / stockage H2

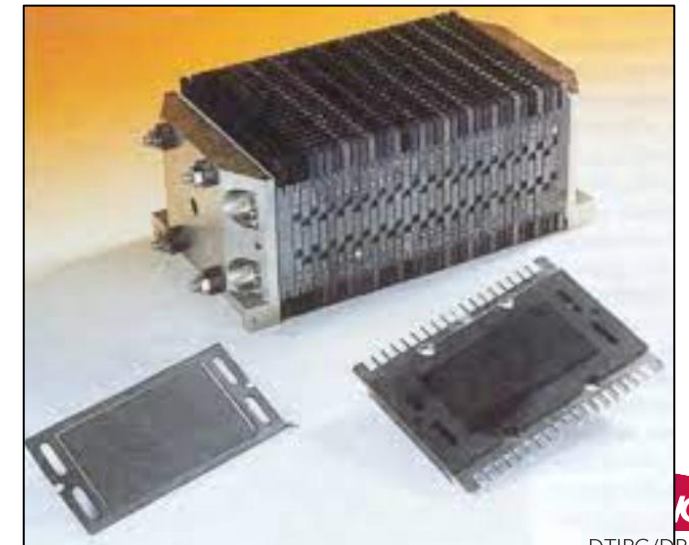
Pile à combustible

Principe général

Hydrogène + Oxygène → Electricité + Eau + Chaleur

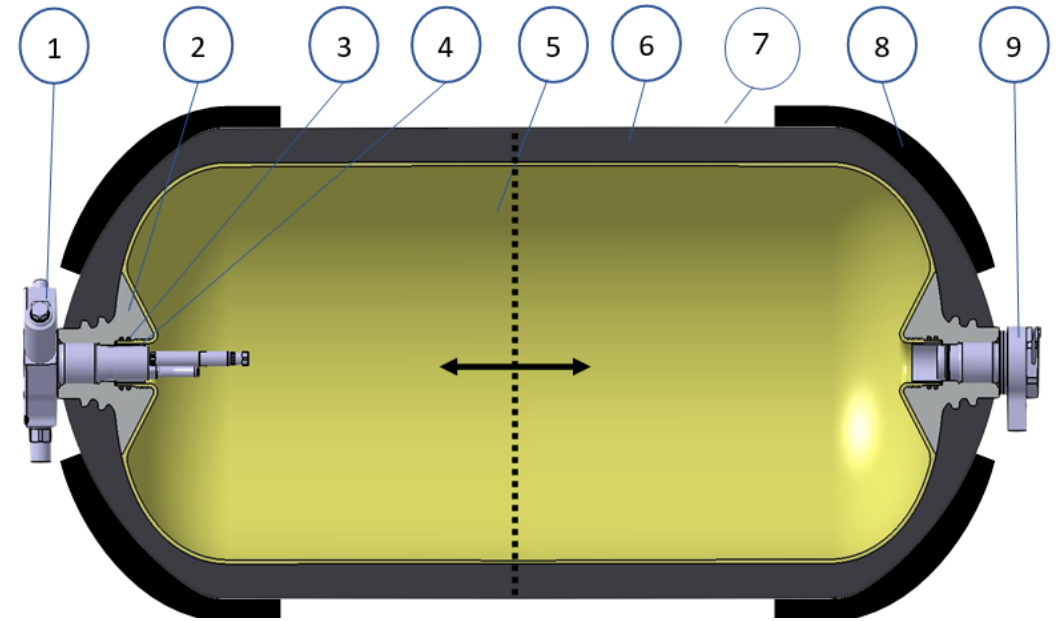


FCPM : Module Pile à combustible



Réservoirs de stockage H₂

#	Composant	Description Fonctionnelle
1	On Tank Valve (OTV)	Contrôle du refueling et defueling du réservoir, contient également un capteur de pression et une TPRD (Temperature Pressure Relief Device)
2	Boss	Composant qui permet de connecter le Liner à l'OTV et/ou ou EP-TPRD
3	O-ring	Créer une interface étanche entre le liner et le boss
4	Collar	Permet d'augmenter la durabilité de l'étanchéité en réduisant le phénomène de fluage du liner lié à la compression du O-ring.
5	Liner	Composant en HDPE permettant de contenir l'Hydrogène
6	Composite structure	Enveloppe faite de résine époxy et de fibre de carbone permettant de supporter l'ensemble des forces exercées par la pression interne dans le réservoir.
7	Protection Layer	Cette couche permet au réservoir d'être protégée des agressions extérieures. Elle permet également de conférer une protection supplémentaire au réservoir en cas de feu.
8	Shock absorber	Permet d'absorber les chocs en cas de chute du réservoir
9	End plug TPRD	Élément de sécurité permettant d'évacuer la pression contenue dans le réservoir en cas de feu.



Les réservoirs ont pour fonction principale de contenir l'hydrogène à haute pression

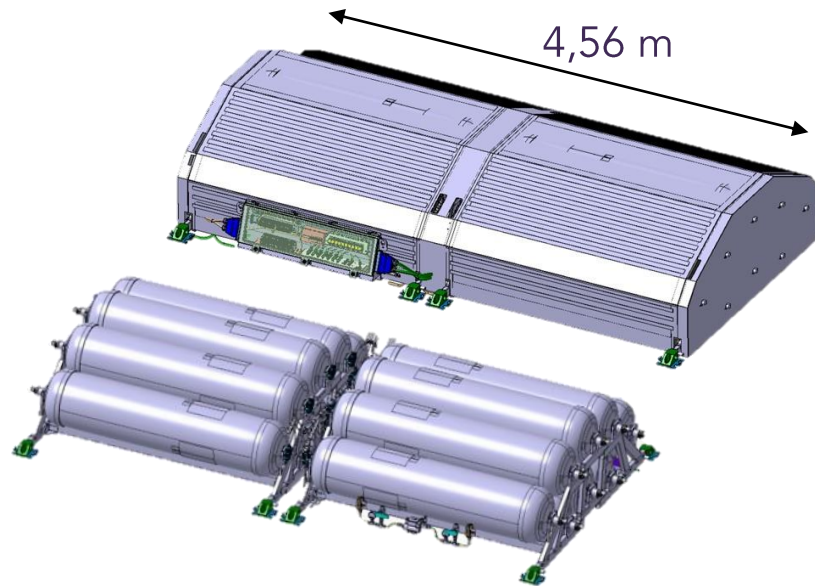
Description du système de stockage H₂

Chaque Véhicule d'Extrémité est équipé de 2 racks de réservoirs contenant chacun 8 réservoirs, soit 16 réservoirs par VE.

Le train embarque au total 190 kg d'hydrogène stocké à 350 bars.

Ces réservoirs sont connectés entre eux puis alimentent une Unité de Traitement de Gaz. Celle-ci fournit l'hydrogène au FCPP à 8 bars.

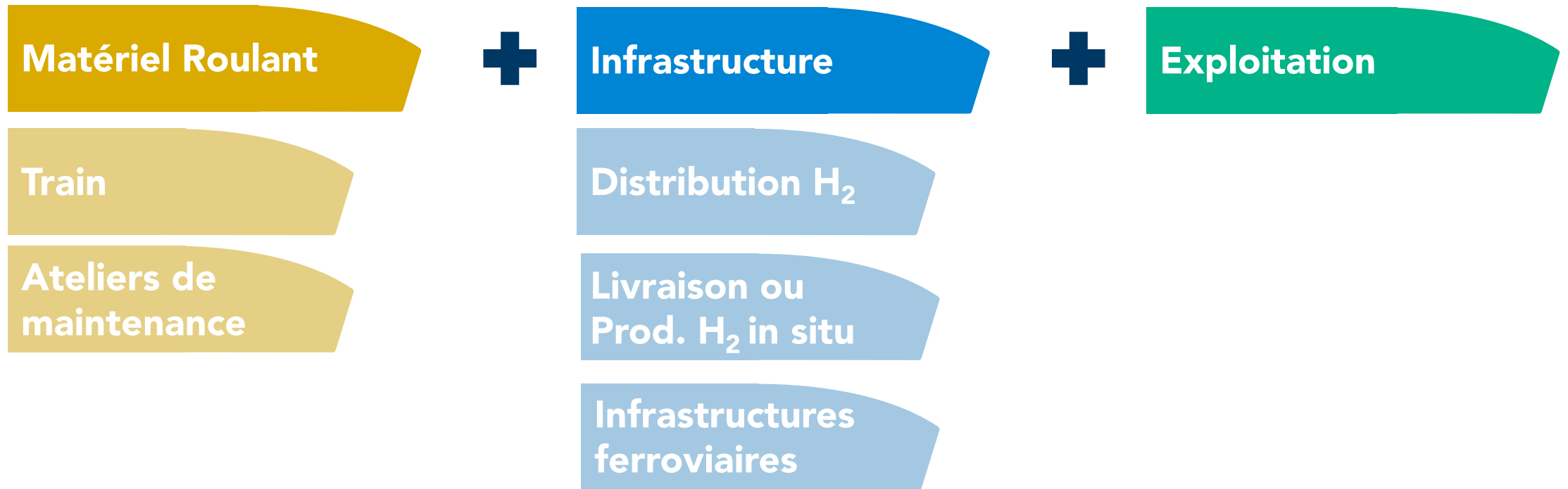
→ L'ensemble des équipements H₂ sont situés hors des zones passagers (en toiture)



5.3

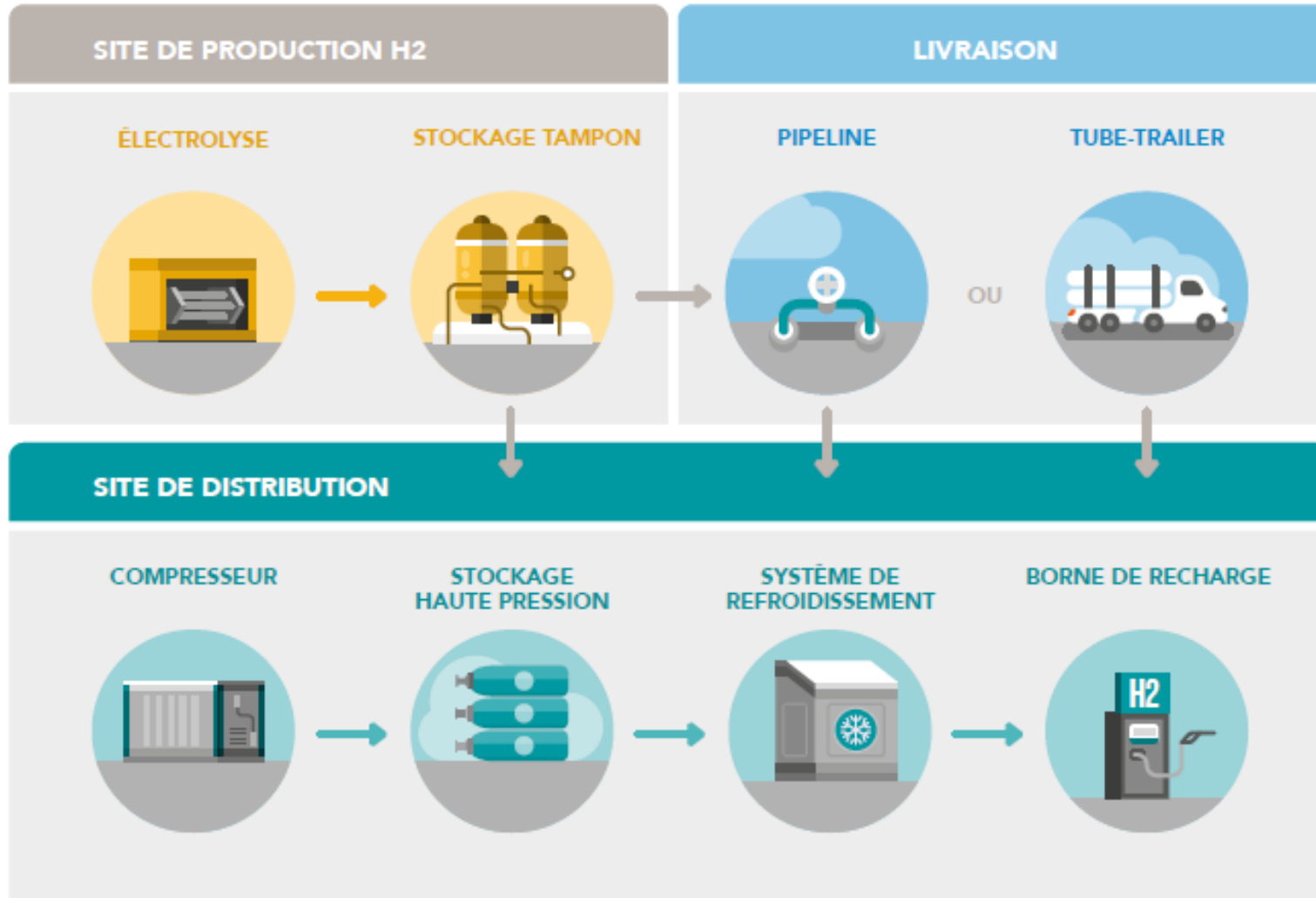
Contraintes infrastructure

Un nouvel écosystème pour le REGIOLIS H₂



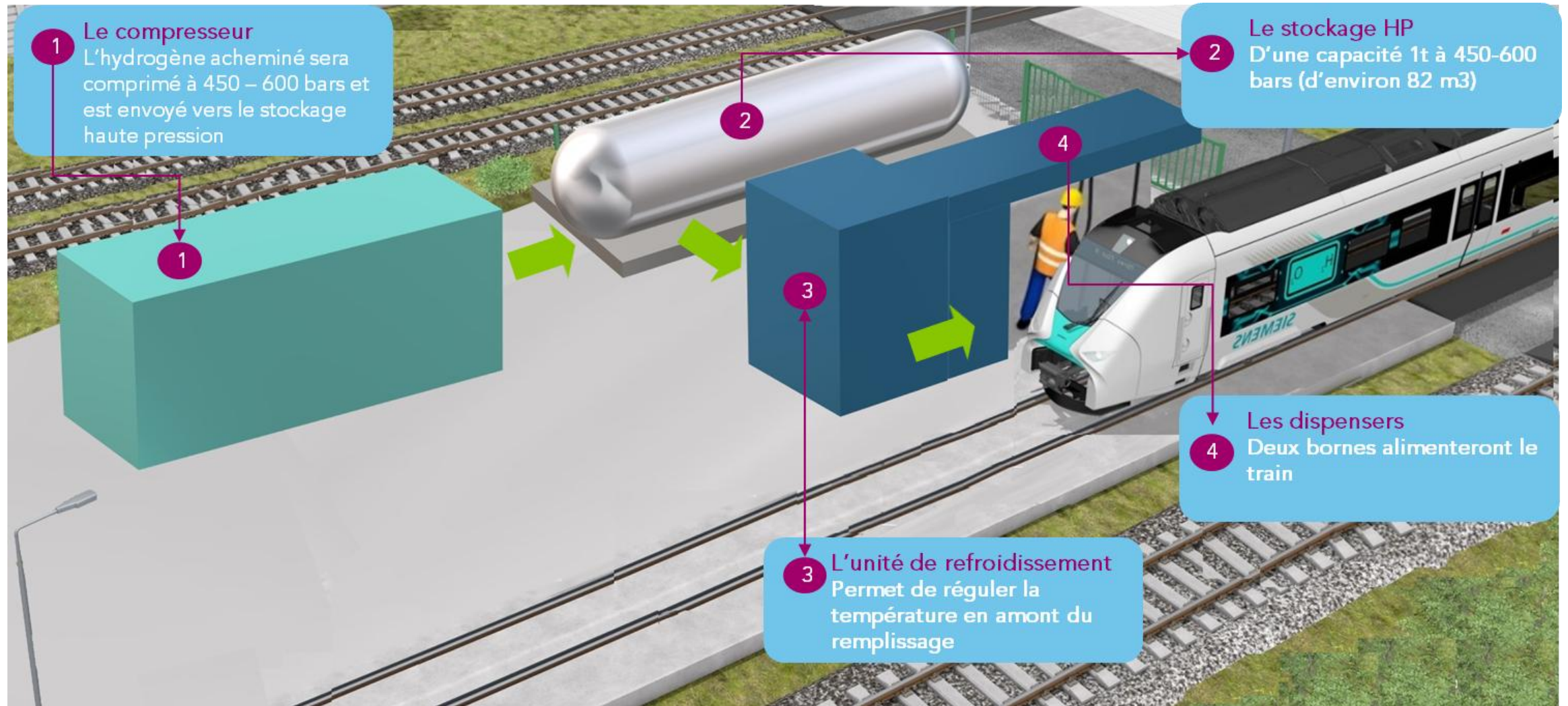
Un projet qui concerne le matériel roulant mais aussi le développement d'une nouvelle infrastructure H₂ pour le ferroviaire

Infrastructure H2 du ferroviaire



- 2 modèles envisageables :
- Station de distribution avec production **in situ**
 - Station de distribution avec site de production **éloigné**

Exemple d'une station de distribution

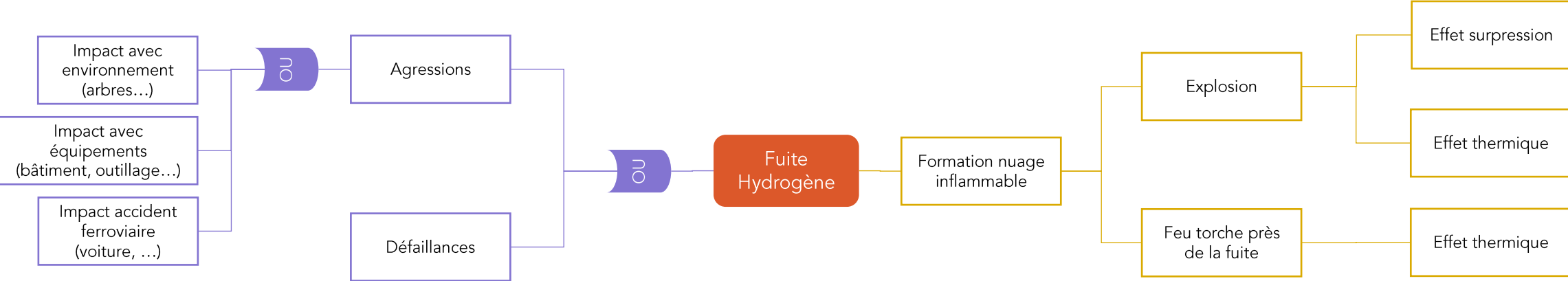


5.4

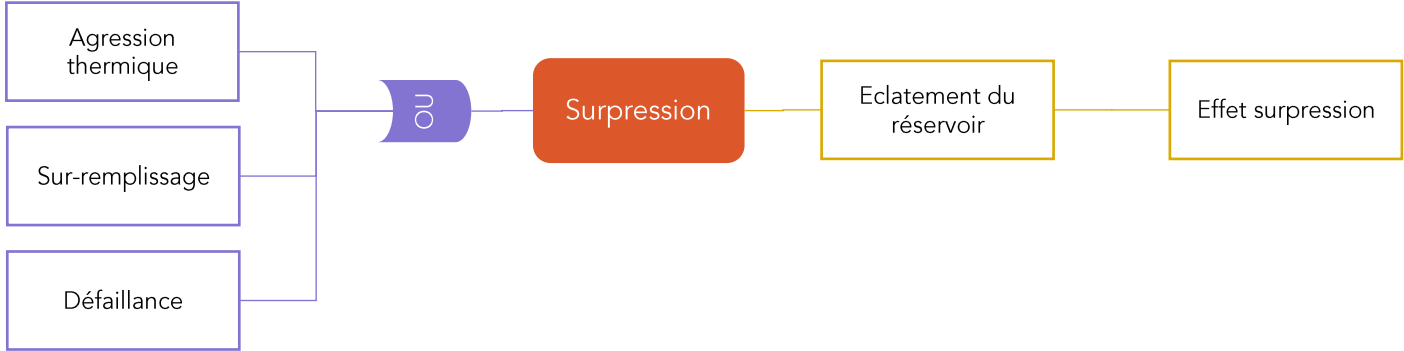
Sécurité en exploitation

La fuite d'hydrogène et la surpression de l'équipement sous pression sont les 2 risques majeurs liés à l'usage d'hydrogène dans nos trains

La fuite d'hydrogène est l'évènement redouté dont les causes / conséquences peuvent être visualisées de la façon suivante:



La surpression est l'évènement redouté dont les causes / conséquences peuvent être visualisées de la façon suivante:



Moyens de mitigation

Comment limiter l'occurrence ?

1. Prévention:

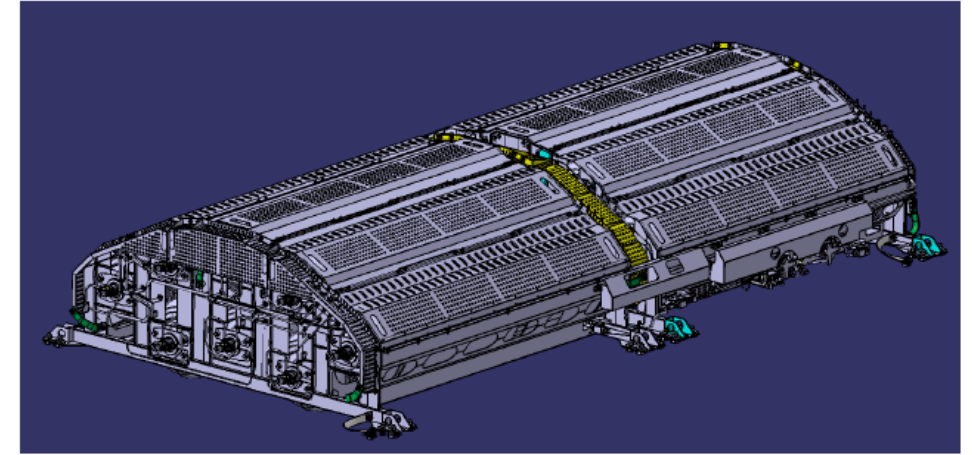
L'objectif de conception est d'éviter que l'évènement apparaisse en se protégeant des scénarios accidentels crédibles.

Pour la fuite H2:

- Protection mécanique des parties critiques
- Utilisation de composants certifiés pour l'hydrogène
- Vérification des étanchéités régulières

Pour la surpression:

- Equipements conçus pour tenir les surpressions
- Protection contre les surpressions (TPRD)
- Détection des surpressions
- Mise en sécurité en cas de mise à l'atmosphère

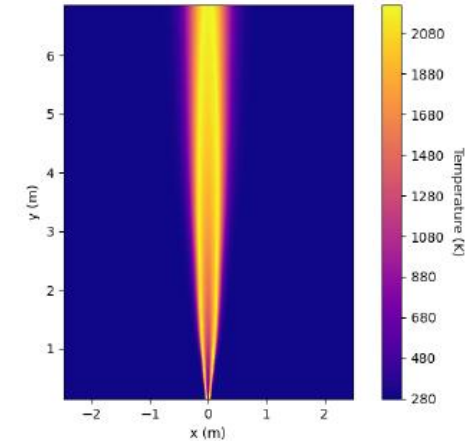


Protection mécanique des coffres

TPRD ? De quoi parle-t-on ?

Il s'agit d'un dispositif de sécurité permettant la purge rapide des réservoirs en cas d'incendie dans l'environnement proche.

Concrètement, on préfère libérer l'hydrogène et le brûler que de laisser la bouteille exploser.



Moyens de mitigation

Comment limiter les conséquences?

2. La Réduction

Afin de réduire les conséquences, il faut minimiser la quantité d'H₂ perdu

En conception, on peut limiter les débits et les zones de fuites:

- Utilisation de clapet anti-retour
- Réduction du débit de fuite par EFV (Excess Flow Valve - Clapet de sur-débit)
- Vérification des pressions
- Détection des fuites internes

3. La détection

La détection des plus petites fuites permet de les corriger avant qu'elles ne deviennent importantes et dangereuses.

Train capable de vérifier sa propre intégrité en comparant les quantités d'hydrogène entre les périodes d'utilisation et pendant son utilisation.

Et la sécurité dans le système ferroviaire?

Dans les ateliers de maintenance

Des analyses de sécurité ont été réalisées afin de protéger les opérateurs.

Barrières en cours de déploiement (Ventilation, Détection, Formation , etc.)

Dans les stations d'avitaillement

L'opération de remplissage est complexe.

Des analyses de sécurité ont permis d'identifier les risques spécifiques au ferroviaire.

La réglementation routière accompagnée de dispositifs spécifiques sont suffisants.

Dans les tunnels

La situation critique du tunnel fait l'objet d'analyses spécifiques pour caractériser le danger et le couvrir par des mesures adaptées.

CONFID
ENTIEL

Soit

5.5

Perspective d'innovation (ICE, LH2)

Mais quelles solutions pour nos applications lourdes?



Quelques ordres de grandeurs

Une activité qui nécessite une forte puissance...

- En Europe les trains de marchandise font typiquement entre **1000 t et 3600 t**
- Il faut une puissance de **2 MW** pour un train de 1800 t à 80 km/h sur une voie à plat.
Cette valeur augmente à :
 - **4 MW** pour une pente à 0,5 %
 - **6 MW** pour une pente à 1 %
 - ...



Captrain France

Euro 4001 Stadler : 2,8 MW engine

... mais également un stockage énergétique important

- On considère en moyenne environ **27 kWh/km à la roue** pour un train de 1800 tonnes.
Cette valeur peut être très variable selon les missions et le tonnage transporté.
- Afin de minimiser les coûts, le train doit avoir le **maximum d'autonomie** (rareté des stations d'avitaillement et temps des opérations)

Limites de l'infrastructure

Le poids des locomotives est limité

- ✓ **En Europe, la charge usuelle est limitée à 22,5 t par axe.** Mais le plus léger, le mieux c'est afin de minimiser le vieillissement des rails.

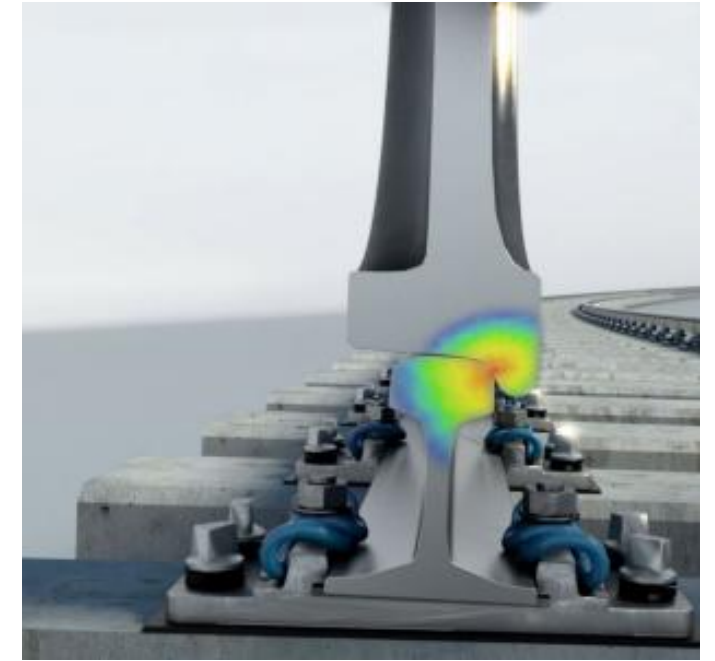


Max 90 t pour une locomotive 4 essieux

Max 135 t pour 6 essieux

Ex : Euro 4001 Stadler (6 essieux) : 123 t (20,5 t / essieu)

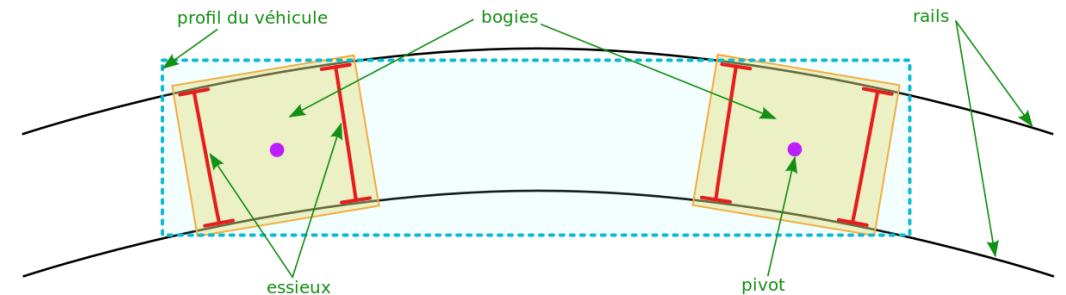
- ✓ Le transport de fret est un marché très concurrentiel et **plus lourd est la locomotive, moins on peut accrocher de wagon, moins le transport est compétitif.**



Voestalpine

La longueur de la locomotive est limitée

- ✓ **Par l'écartement des rails dans les courbes**
- ✓ **Par le dépassement sur le côté des voies**



Wikipedia

Ex : Euro 4001 Stadler locomotive européenne la plus longue avec 23 m

Pour quelles raisons l'ICEH2 pourrait être pertinent?

Nos intuitions:

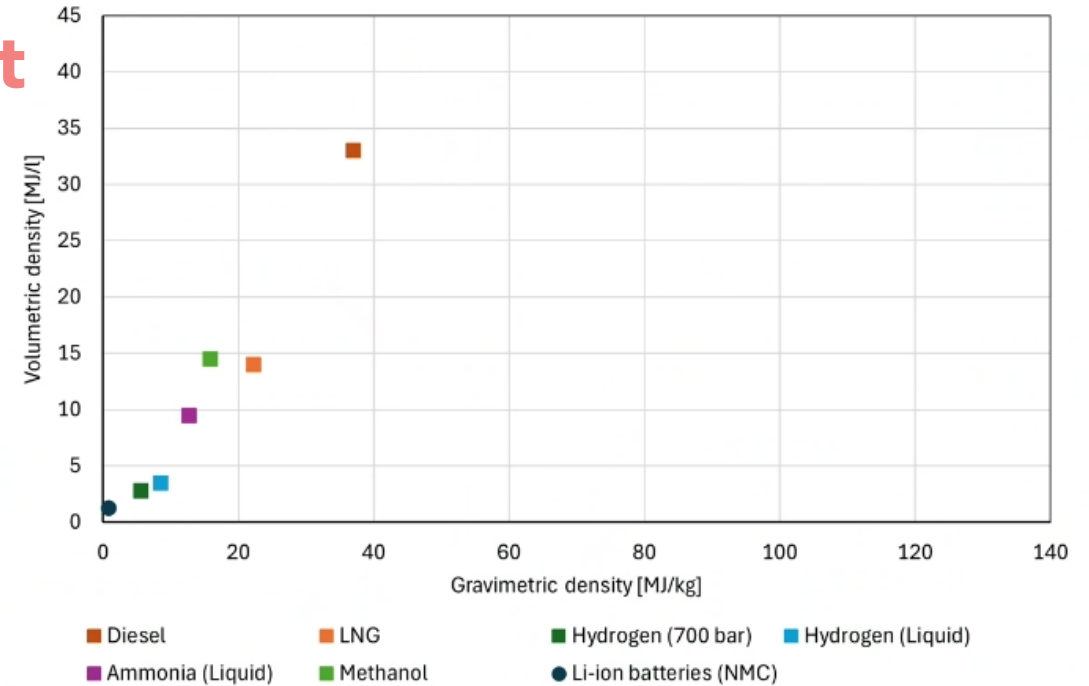
- ✓ **Le rendement a pleine puissance est un critère important dans l'efficacité énergétique de cet usage**
- ✓ **La durée de vie de ces locomotives est de 30 à 40 ans et pour le moment, les ICE semblent avoir une meilleure durée de vie (à démontrer).**
- ✓ **Pas de métaux stratégique et facile à recycler.**
- ✓ **Valorisation du savoir faire et des outils SNCF dans la maintenance des moteurs.**
- ✓ **Retrofit facilité des locomotives existantes**
- ✓ **Technologie peu sensible à l'environnement (température, poussière,...)**
- ✓ **Aide au développement des écosystème hydrogène.**

L'ICEH2 doit encore prouver sa pertinence dans le ferroviaire mais cette technologie semble prometteuse

Pourquoi investiguer le LH2 ?

L'hydrogène cryogénique permettrait de répondre au besoin énergétique

- Meilleure densité énergétique
- **Mais des défis à relever:**
 - Avitaillement
 - Gestion du froid (Boil-off)
 - Sécurité



Gravimetric and volumetric energy density for major energy carriers, with storage

SNCF a lancé début 2026 un projet sur ces technologies pour valider la faisabilité technique de leur intégration dans le système ferroviaire français

6.

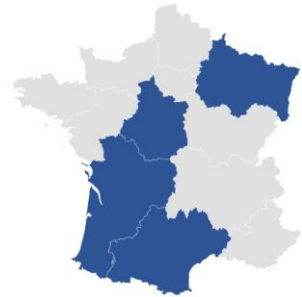
Panorama et usages

Solutions de décarbonation des trains régionaux

Projets engagés par la Direction TER



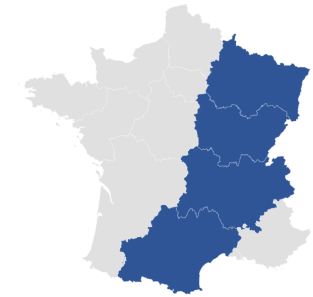
Train
🚰 B100



TER
⚡ Hybride



Train
⚡ Batterie



TRAIN À HYDROGÈNE
+ PROPRE • DE CO₂

2021

🚰 1^{ère} circulation

2022

⚡ 1^{ers} tours de roue

2023

⚡ 1^{ers} tours de roue

2024

⚡ 1^{ère} rame en exploitation

2025

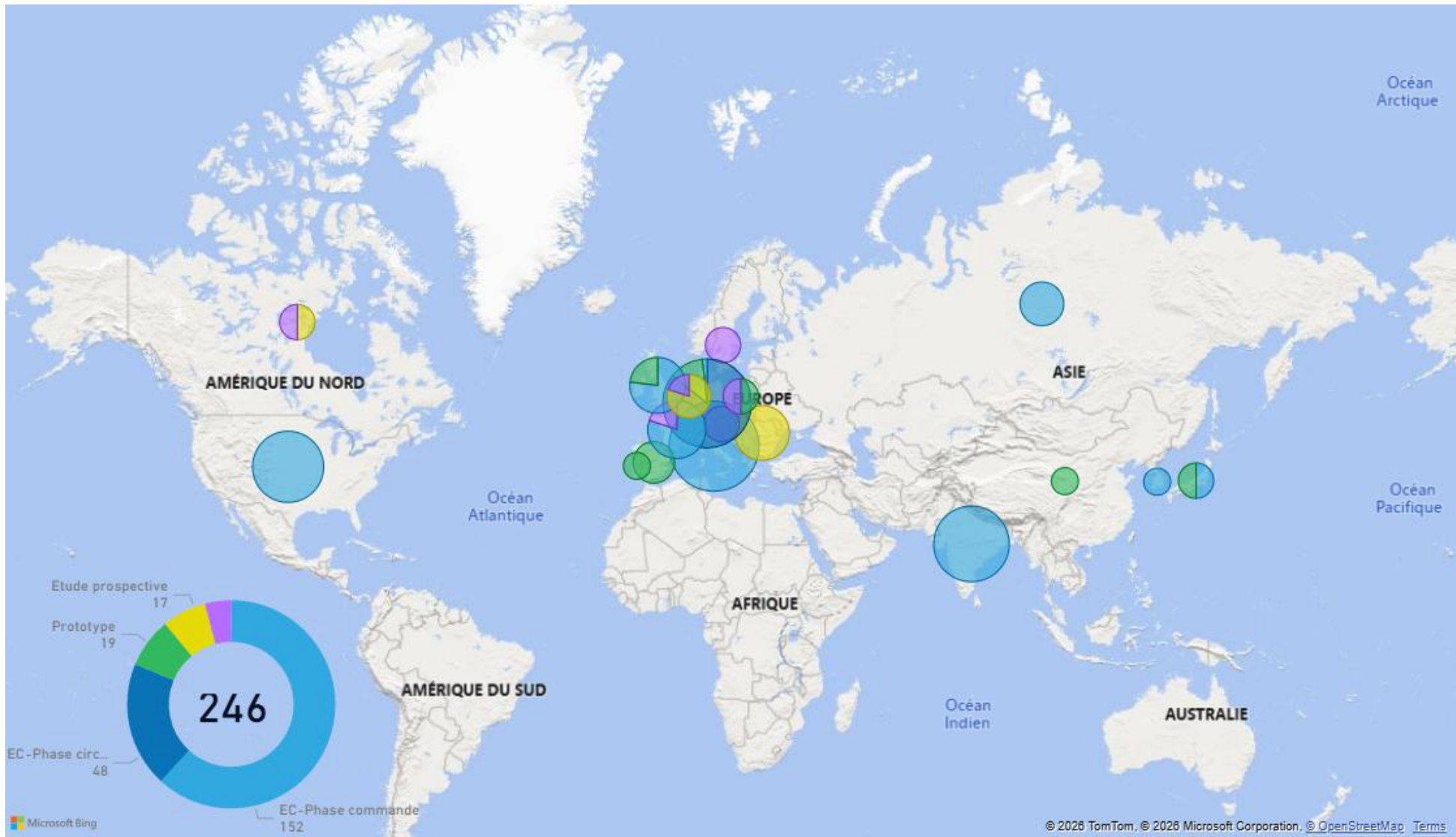
⚡ 1^{ère} rame en exploitation
🚰 1^{ers} tours de roue

2026

2027

🚰 1^{ère} rame en exploitation

Trains à hydrogène dans le monde



TOP3

projets en exploitation commerciale

1. Coradia iLint – **27 trains**
Hesse (Allemagne)
2. Coradia iLint – **14 trains**
Basse-Saxe (Allemagne)
3. Siemens Mireo Plus H – **7 trains**
Berlin (Allemagne)

Type de projet
● EC-Phase circulation
● EC-Phase commande
● Etude prospective
● Prototype
● Test roulement - Promotionnel

© 2026 TomTom, © 2026 Microsoft Corporation, © OpenStreetMap, Terms

Trains voyageurs à H₂ à piles à combustible (en + de RH₂)



En exploitation

Alstom - Coradia iLint

PAC Cummins

14 trains en Basse-Saxe depuis 2022

27 trains en Hesse depuis 2023



En exploitation

Siemens - Mireo plus H

PAC Ballard

7 trains à Berlin depuis 12/2024

1 train en Bade-Württemberg prévu en 2024

3 trains en Bavière prévus en 12/2026



En exploitation

Stadler - Flirt H₂

PAC Ballard

1 train en Californie depuis 09/25, 9 supplémentaires prévus

9 trains en Calabre prévus en 2026

8 trains prévus en Sardaigne en 2026

2 trains prévus en Sicile (date non connue)



Exploitation à venir

Alstom - Coradia Stream H₂

PAC Cummins

14 trains en Lombardie prévus en 2027

4 trains dans les Pouilles prévus



Exploitation à venir

Transmashholding (TMH)

PAC TMH-Energy Solutions x Rusatom Oversiz

5 trains à Sakhaline (Russie) prévus en 2027



Exploitation à venir

CRRC - Cinova H₂

Présenté à Innotrans 2024

PAC non communiquée

Date de sortie non communiquée



Exploitation à venir

Hyundai Rotem

PAC non communiquée

20 trains à Busan (Corée) prévus en 2030



Prototype

Des expérimentations en cours

CAF - FCH₂Rail

PAC Toyota

Consortium européen

10 000 km parcourus en mode H₂ en essais



Autres trains et autres technologies H₂ : ICE et H₂ Liquide



Stadler - RS Zero

Moteur ICE

Train hybride Batteries + H₂

Présenté à Innotrans 2024, commandes évoquées

Prototype



Alstom – Locotracteur H3

Moteur ICE

Train hybride Batteries + H₂

Moteur Deutz 350kW + batterie 350kW

Prototype datant de 2022

Prototype



General Motors Diesel – CIE 071

Moteur ICE DiGas

Perspective de transformation de 18 locomotives

Prototype



Locomotive Namibie

Moteur ICE BeHydro 2000 kW

Prototype annoncé fin 2025

Stockage gazeux sur tender ; autonomie 400 km

Trains de fret

Projet



CRRC Datong Co. - Ningdong

Pile à combustible

Rétrofit de locomotive diesel

Réservoirs de 270kg de H₂ liquide

Prototype



JR Central – HC85 Hydrogène

Moteur ICE

Train hybride Batteries + ICE H₂

Moteur prototype achevé, tests à venir

Projet



CRRC – Locomotive FCAB Chili

Pile à combustible

Locomotive prototype en service

Engin délivré par CRRC pour la société minière chilienne FCAB

Prototype



ABC - Locomotive Fret HLD77

Moteur ICE BeHydro 1150 kW

Stockage 350 bars ; autonomie 17 h

Locomotive de manœuvre / desserte fret

Projet en attente de financements

Projet

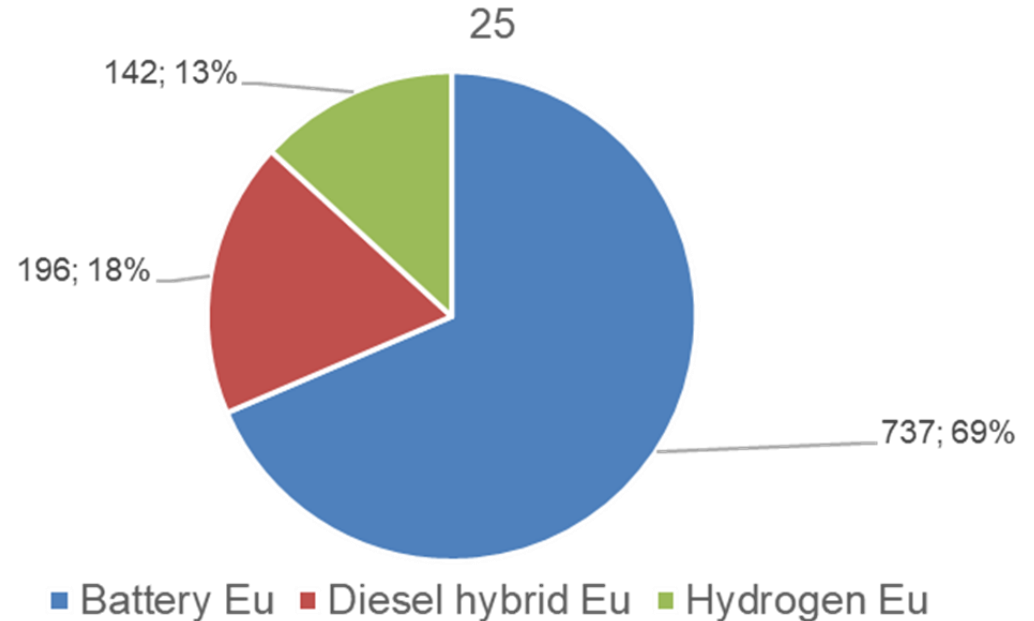
ICE = Moteur à combustion interne

Panorama des trains régionaux à batteries, en Europe

Rames BEMU en service ou commandes en cours de fabrication



Alternative drive trains in Europe for passengers transportation (in service and order) in December



Panorama des trains régionaux à batteries, en Europe

Alstom a reçu des commandes (71) pour des trains neufs ou en rétrofit. Préférence pour la technologie NMC, 80km d'autonomie.

CAF seul intégrateur, à date, qui fabrique ses batteries. 111 rames commandées, dont la plus grande commande (73 BEMU Civity), utilise la technologie LTO, 80km autonomie.

Siemens 151 rames commandées, seul à fournir sans retard, utilise le Leasing également. Technologie préférée LTO, et 80 à 100km autonomie, est en train de construire une usine pour la fabrication des batteries (120MWh/an).

Stadler est le champion avec 269 Flirt Akku commandés, ses trains utilisent la techno LTO majoritairement (NMC pour FAL) et disposent de 80 km d'autonomie.

Škoda (CZE) et **Končar** (CRO), nouveaux entrants, gagnent de plus en plus de commandes (techno LTO et NMC), 78 et 30 rames respectivement.

Hitachi (JP) maîtrise la technologie (trains hybrides en Italie et UK, BEMU au Japon) mettra en service bientôt ses premiers trains à batteries en Europe (Italie). Technologies LTO et LFP.

.... **+350 nouveaux trains BEMU dans les appels d'offres européennes**

GWR (UK) est le détenteur du record d'autonomie
200miles (**322km**) sur batteries, avec son unique train !



Panorama des trains régionaux à batteries, en Europe



Europe's first battery-powered train (BEMU). A fleet of 55 FLIRT AKKU trains has been in commercial service around Kiel-Lübeck, Germany, since late 2023, manufactured by Stadler for NAH.SH (the public transport authority for the Schleswig-Holstein region). Operated by Erix and NBE, the trains have a battery capacity of approximately 600 kWh per train, providing a range of about 80 km.

Discontinuous/partial electrification deployed.

Siemens sells 151 trains, put in service 71 trains in Germany and Denmark (4 **leasing** !) most of them associated to discontinuous electrification (except Hessische Landesbahn and Niederbarnimer Eisenbahn).

Terminal station substation could be with power electronics (**RPS 15kV AC with 50Hz or 16Hz 2/3**) or simply transformer (**Voltap**).



Stadler and the Italian regional railway company Ferrovie Appulo Lucane (FAL) have unveiled Europe's first custom-built **narrow-gauge battery-powered electric train**. The new train, unveiled at the EXPO Ferroviaria in Milan, will operate on the Altamura-Matera line in Italy and is expected to reduce CO2 emissions by more than 1,300 tons per year.

Hybrid version will be delivered to Chemins de fer de Provence en France (line Nice - Digne-les-Bains, 150km).

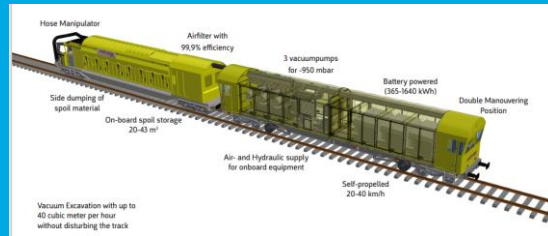
Skoda has an old tradition in railways, they work quick, has several battery suppliers, and they propose the only battery train with **range extender**.



Autres trains avec des batteries au lithium en exploitation



L'engin nettoie le tunnel Citybanan de Trafikverket (SWE) de 6km à Stockholm, les batteries (365-1640 kWh, NMC) fournissent l'énergie de traction et auxiliaires. Aucune pollution, pas de bruit ! Des nombreux engins existent (Plasser & Theurer, Uromac, ...) souvent 3-mode (CAT/BATT/Diesel).



Serie 5000 Keio, batterie (Hitachi) utilisée pour le secours, power assist & récupération au freinage sous 1500Vdc



Réputées pour leur dangerosité (incendie causé par de l'emballement thermique) après quelques incendies de bus ou des Tesla, les batteries au lithium sont arrivées à une maturité technologique suffisante pour être utilisées dans des milieux très contraintes comme les tunnels ou dans des mines (environnement ATEX).

Normes ferroviaires : IEC 62928, IEC 62519, Heat rate release, EN 45545-3 (enclosure fire proof), IEC 60529 (IP6x)



14500kWh de batteries, LFP, autonomie de 100 à 200km, recharge complète en 2 heures sous 1500VDC. Recharge par un sort de panto inversé.



Batterie (2 x 22kWh LTO, Toshiba) pour le secours en tunnel, pour des mouvements au terminus, facilitant ainsi le mouvement pour des rames alimentées par 3ème rail.



Batterie utilisée pour le secours, à faible vitesse, mais aussi pour se rétro-alimenter au réseau (effacement) et pour augmenter le confort des passagers



6.2

Quelle
technologie
pour quel
usage?

Domaine de pertinence et intérêt de la solution H2 pour les TER

- Toutes les lignes ferroviaires ne sont pas électrifiables ➡ La solution H2 avec son autonomie de + 400 km (supérieure aux solutions batteries) est une véritable solution de décarbonation du TER Diesel actuel
- Avec 0 émission de carbone au niveau du train ainsi qu'une réduction du bruit ➡ intérêt certain de confort et d'environnement

CONFIDENTIEL

Conclusions

Le train à batteries et le train à hydrogène sont des solutions complémentaires

- ✓ **La dynamique allemande d'achat des trains à batteries neufs est justifiée par une flotte régionale âgée, le contraire des flottes de trains régionales en France**
 - Le rétrofit doit être considéré pour une décarbonation rapide
- ✓ **L'ouverture à la concurrence rebat les cartes du financement de l'innovation**
- ✓ **Il faut sortir du modèle du train « couteau suisse » pour travailler sur les cas d'usage**

SNCF investigue toutes les solutions de décarbonations

Merci

Bogdan VULTURESCU
bogdan.vulturescu@sncf.fr

Charles FONCIN
charles.foncin@sncf.fr