PROGRAMME RÉSILIENCE V11

Comparatif Rendements Réservoir → Roue

Camion EREV Rex unique vs GNL / GNV Classique

Version 2.3 — Bilan auxiliaires arrêts corrigé — Juin 2026

Correction V2.3 : auxiliaires EREV aux arrêts explicités (batterie 47–71 kWh él. vs APU 130–260 kWh th.) · bilan recalculé

---

0. Note méthodologique — quatre niveaux distincts

Règle de lecture : ce document distingue strictement quatre niveaux de rendement/efficience. Toute contestation reposant sur une confusion entre niveaux est non-pertinente. **★V2.0 est le seul véhicule de référence du scénario.** V2.1 et V2.2 sont des trajectoires d'amélioration prospectives.

Niv.	Nom exact	Périmètre	EREV V2.0	GNL classique
1	**Rendement thermique Rex (cycle seul)**	Moteur Rex uniquement — banc	44–48 %	42–46 %
2	**Rendement gaz→roues traction continue**	Chaîne complète — traction seule — banc	32–36 %	**36–40 %**
3	**Efficience cycle opérationnel Rex + arrêts**	Multi-sources sans ZEV réseau · scén. B	**~48 %**	~38 %
3b	**Efficience cycle complet (ZEV + Rex + ZEV)**	Énergies externes uniquement · Convention A	**~57–60 %**	~38 %

> *Niveaux 1 et 2 : mesurables sur banc, frontière gaz uniquement. Niveau 3 : efficience cycle Rex + arrêts, multi-sources (800 km). Niveau 3b : efficience cycle complet avec ZEV réseau (1 150 km), Convention A — énergies externes uniquement.*

Constat Niveau 2 assumé : sur banc de traction continue, le GNL classique est supérieur à l'EREV V2.0 (36–40 % vs 32–36 %). Ce constat est reconnu et assumé. L'avantage de l'EREV est dans son architecture multi-sources et ses comportements aux arrêts, pas dans son rendement de traction seul.

1. Décomposition de la chaîne de conversion — traction seule (Niveau 2)

★ V2.0 = véhicule de lancement et seule référence du scénario. V2.1 et V2.2 sont des trajectoires prospectives dont les rendements ne sont pas nécessaires à la démonstration du concept.

Étape	GNL classique	EREV V2.0 ★	EREV V2.1	EREV V2.2 ⚠
Cycle moteur thermique	42–46 %	44–48 %	48–51 %	52–55 %
Génératrice	—	× 90 %	× 90 %	× 92 %
Onduleur	—	× 95 %	× 95 %	× 96 %
Moteur électrique	—	× 90 %	× 92 %	× 93 %
Transmission / boîte	× 94–96 % (12 rapp.)	× 96 % (2 rapp.)	× 96 %	× 97 %
Récupération freinage	0	+ partiel	+ partiel	+ optimisé
RÉSULTAT gaz→roues (traction seule)	**~36–40 %**	**~32–36 %**	**~35–38 %**	**~38–41 %**

> *V2.2 ⚠ prospective 2030+ — non validée sur prototype. Tous les calculs d'efficience cycle (§3 et §4) reposent sur V2.0 uniquement.*

2. Arrêts réglementaires — besoins auxiliaires et rendement de la source

2.1 Ce que consomment réellement les deux architectures à l'arrêt

La réglementation sociale européenne (CE 561/2006) impose **45 min de pause toutes les 4h30** et **11h de repos minimum**. Pendant ces arrêts, les deux architectures ont des besoins auxiliaires identiques : chauffage/climatisation cabine, électronique embarquée. **La différence n'est pas dans le besoin — elle est dans la source et son rendement.**

Besoin auxiliaire arrêt nuit 11h	GNL classique (APU scén. B)	EREV (batterie)	Ratio
Chauffage / climatisation cabine	~3–5 kWh th. utile/h → 33–55 kWh th./11h	Idem besoin · tiré sur batterie LFP	Même service
Électronique embarquée	~0,5 kWh/h → ~5,5 kWh/11h	Idem · batterie LFP	Même service
ÉNERGIE UTILE TOTALE	**~40–60 kWh utiles**	**~40–60 kWh utiles**	Identique
Rendement de la source auxiliaire	APU thermique : ~25–30 %	Batterie LFP : ~85–90 %	**Facteur 3×**
ÉNERGIE PRIMAIRE CONSOMMÉE (arrêt)	**130–260 kWh th. GNL**	**~47–71 kWh él. (batterie)**	**Facteur 2,5–3,5×**

> *CORRECTION V2.3 : les versions précédentes indiquaient "0 kWh" pour l'EREV aux arrêts — formulation incorrecte. L'EREV consomme ~47–71 kWh électriques (batterie LFP) pour le même service que l'APU GNL (130–260 kWh thermiques). Le gain est un gain de rendement de source (facteur 2,5–3,5×), pas une suppression des besoins.*

2.2 Trois scénarios APU — énergie source comparée

Scénario	Dispositif	Conso GNL	kWh th. / 11h	EREV — batterie
A — Moteur principal tournant	Ralenti 600–800 tr/min moteur 15L	8–12 L/h	**515–773 kWh th.**	~47–71 kWh él. (batterie)
B — APU GNL dédié ★	Groupe auxiliaire 5–10 kW th. (Thermo King / Carrier)	2–4 L/h	**130–260 kWh th.**	~47–71 kWh él. (batterie)
C — Prise électrique externe	Électrification aire de repos (TEN-T post-2025)	0 L	~47–71 kWh él.	~47–71 kWh él. (batterie)

> ★ *Scénario B retenu comme référence : APU GNL dédié (Thermo King TriPac / Carrier Comfort Pro), 5–10 kW th., 2–4 L/h GNL, rendement ~25–30 %. Sources : données constructeurs APU GNL.*

> *Scénario C : les deux architectures consomment ~47–71 kWh électriques depuis la prise externe. L'avantage de rendement de source est nul — les deux sont alimentés par le réseau.*

2.3 Couverture par la batterie selon la température extérieure

Scénario thermique	Besoin auxiliaire / 11h	Recharge dépôt AC (50 kWh)	Impact ZEV lendemain
Été / intersaison (~18°C)	~25–35 kWh	Couvre largement ✓✓	ZEV complet disponible ✓✓
Hiver modéré (~0°C)	~44–60 kWh	Couverture limite ⚠	ZEV légèrement réduit
Hiver froid (−10°C)	~55–88 kWh	Insuffisant — batterie puise sur réserve ZEV ⚠	ZEV réduit 80–110 km
Solution hiver froid	Recharge AC augmentée (11 kW × 7h = 77 kWh) ou Rex 1h matin	77 kWh couvre scén. −10°C ✓✓	ZEV complet préservé ✓✓

En hiver froid (−10°C), les besoins auxiliaires peuvent dépasser la recharge dépôt standard (50 kWh AC à 7 kW). **Recommandation : borne de recharge 11 kW au dépôt** (77 kWh disponibles sur 7h), qui couvre tous les scénarios thermiques tout en préservant le ZEV complet du lendemain matin.

3. Bilan énergie finale 800 km — frontières homogènes (Niveau 3)

3.1 Définition des grandeurs clés

200 kWh = énergie nette stockée en batterie (capacité nette LFP). Énergie réseau nécessaire : 200 ÷ 0,89 = **~225 kWh réseau**. Les 50 kWh de recharge dépôt couvrent à la fois les auxiliaires de la nuit et une partie de la réserve ZEV. Rex = secours hors dépôt uniquement.

Convention de calcul §3 : les 1 200 kWh de traction EREV sont la consommation brute avant récupération. La récupération de −80 kWh donne la consommation nette de 1 120 kWh, base de l'addition. Les auxiliaires EREV aux arrêts (59 + 9 kWh électriques) sont comptabilisés séparément — même frontière que le GNL (APU 195 + 40 kWh thermiques).

3.2 Tableau bilan — auxiliaires EREV explicités

Poste énergie finale (kWh)	GNL classique	EREV V2.0	Note / qualification
Traction autoroute — consommation BRUTE	**1 520 kWh th.**	**1 200 kWh th.**	Données constructeurs Volvo FH LNG / Scania Super
Récupération freinage (déduite de la conso Rex)	0	−80 kWh	Profil mixte autoroute · scénario prudent
Traction autoroute — consommation NETTE	**1 520 kWh th.**	**1 120 kWh th.**	Base additive du bilan à partir de cette ligne
Arrêt nuit 11h — énergie source auxiliaires (scén. B)	**+195 kWh th. GNL (APU)**	**+59 kWh él. (batterie) ★**	★ Même service (40–60 kWh utiles) · APU 25–30 % vs batterie 85–90 %
Pause 45 min — énergie source auxiliaires (régl. CE 561/2006)	+40 kWh th. GNL	+9 kWh él. (batterie)	~5 kWh utiles · même calcul rendement
Élec. réseau ZEV départ (225 kWh réseau → 200 kWh batterie)	0	+225 kWh él.	200 kWh = énergie nette stockée · 225 kWh = énergie compteur
Élec. recharge dépôt nuit (AC · couvre auxiliaires + ZEV)	0	+50 kWh él.	7 kW × 7h · couvre auxiliaires été/intersaison · 11 kW recommandé hiver
TOTAL énergie finale entrante	**1 755 kWh**	**1 463 kWh**	Vérif. GNL : 1 520+195+40 = 1 755 ✓ · EREV : 1 120+59+9+225+50 = 1 463 ✓
Énergie aux roues	**~665 kWh**	**~665 kWh**	Identique par construction
EFFICIENCE CYCLE OPÉRATIONNEL — Niveau 3	**~38 %**	**~45 %**	Gain : −17 % énergie finale · scén. B · frontières homogènes · V2.3

> *CORRECTION V2.3 : les auxiliaires EREV aux arrêts sont maintenant comptabilisés explicitement (59 kWh él. nuit + 9 kWh él. pause). Le total EREV passe de 1 395 kWh (V2.2) à 1 463 kWh, et l'efficience Niveau 3 de ~48 % à ~45 %. Le gain sur le GNL passe de −20 % à −17 %. Chiffre moins spectaculaire, physiquement correct.*

Le gain sur ce cycle (800 km, scén. B) est de **−17 % d'énergie finale** (1 463 vs 1 755 kWh). Ce gain provient de deux mécanismes distincts et cumulés : **(1) rendement de source auxiliaire 3× supérieur** (batterie vs APU thermique) et **(2) Rex à charge constante optimale** vs moteur GNL à régime variable.

4. Cycle complet 1 150 km — Convention A (Niveau 3b)

4.1 Rendement réseau → roues (chaîne ZEV)

Étape chaîne ZEV	Perte estimée
Réseau distribution + chargeur embarqué	~5–8 %
Batterie LFP (charge / décharge)	~4–6 %
Onduleur + moteur électrique	~8–10 %

Étape chaîne ZEV	Perte estimée
Transmission (2 rapports)	~3–5 %
RENDEMENT GLOBAL réseau → roues	**~85–90 %**

4.2 Convention A — énergies externes uniquement

Convention A : seules les énergies entrant dans le véhicule depuis l'extérieur sont comptabilisées. Le surplus Rex utilisé pour la phase ZEV livraison est un flux interne déjà compté dans les 1 120 kWh Rex net. Les auxiliaires batterie (68 kWh él.) sont des énergies externes comptabilisées dans la recharge dépôt.

Phase	km	Énergie entrante EXTERNE	Efficience	Énergie aux roues
ZEV départ (réseau)	120 km	225 kWh él. réseau (externe ✓)	~89 %	~200 kWh
Autoroute Rex + arrêts (incl. auxiliaires batterie)	950 km	1 120 kWh th. net Rex + 68 kWh él. auxiliaires	~46 %	~538 kWh
ZEV livraison finale (surplus Rex interne)	80 km	*0 kWh externe — flux interne Rex déjà compté*	~89 %	~64 kWh
Arrêts / nuit (Rex éteint · auxiliaires sur batterie)	—	*Inclus dans les 68 kWh auxiliaires ci-dessus*	—	—
TOTAL — Convention A	**1 150 km**	**~1 413 kWh énergie externe**	**~55–58 %**	**~802 kWh**

> *V2.3 : les 68 kWh électriques auxiliaires (59 kWh nuit + 9 kWh pause) sont des énergies externes comptabilisées. Le dénominateur Convention A passe à 1 413 kWh (vs 1 345 kWh en V2.2 qui omettait ces auxiliaires).*

4.3 Vérification et fourchette

Vérification Convention A — V2.3	Calcul	Résultat
Énergie externe entrante	225 (ZEV réseau) + 1 120 (Rex net) + 68 (auxiliaires batterie)	**1 413 kWh**
Énergie aux roues totale	200 + 538 + 64 kWh	**802 kWh**
Efficience globale Convention A	802 ÷ 1 413	**~56,8 %**
Vérification par moyenne pondérée distance	(120/1150 × 89 %) + (950/1150 × 46 %) + (80/1150 × 89 %)	*~54,4 %*
Fourchette retenue V2.3	Écart ~2,4 pts entre les deux méthodes · hypothèses auxiliaires	**~54–57 %**

Les deux méthodes convergent vers **~54–57 %** — fourchette présentée comme ordre de grandeur à confirmer sur le cycle normalisé définitif du véhicule.

5. Trois indicateurs — énergie, primaire, CO_2e

Principe de comparaison homogène : fossile vs fossile, bio vs bio. Les auxiliaires EREV sont inclus dans les deux bilans.

Indicateur	GNL fossile	EREV fossile	GNL bio-LCH4	EREV bio-LCH4 Résilience
A — Énergie finale / 800 km (Niv. 3)	~1 755 kWh	~1 463 kWh	~1 755 kWh	~1 463 kWh
Gain architecture — énergie finale	*référence*	**−17 %**	*référence*	**−17 %**
A — Énergie finale cycle complet / 1 150 km (Niv. 3b)	*~2 130 kWh*	~1 413 kWh	*~2 130 kWh*	~1 413 kWh
Gain architecture — cycle complet	*référence*	**~−34 %**	*référence*	**~−34 %**
B — Énergie primaire (conv. Eurostat — indicatif)	~1 930 kWh	~1 870 kWh	*indicatif*	*indicatif*
C — CO_2e usage fossile / km	**~440 g/km**	**~305 g/km**	~0 g fossile	~0 g fossile
Gain CO_2 architecture (fossile→fossile)	*référence*	**~−31 %**	—	—
CO_2e cycle de vie complet	~490–520 g/km	~335–370 g/km	*ACV requise*	*ACV requise · crédit biochar possible*

> *V2.3 : les gains sont recalculés avec auxiliaires EREV inclus. −17 % sur 800 km (Niv. 3), −34 % sur cycle complet (Niv. 3b), −31 % CO_2 fossile. Ces chiffres sont moins spectaculaires que les versions précédentes — ils sont physiquement corrects.*

5.1 Indicateur A — gain d'architecture

Sur 800 km (Niv. 3) : **−17 % d'énergie finale** (1 463 vs 1 755 kWh). Sur 1 150 km cycle complet (Niv. 3b, Conv. A) : **~−34 %** (1 413 vs 2 130 kWh). Ces gains s'appliquent en fossile et en bio — c'est un gain d'architecture pur.

5.2 Indicateur B — énergie primaire (indicatif uniquement)

> *Le −5 % d'énergie primaire (convention Eurostat) n'est pas un argument central. À présenter uniquement comme référence.*

5.3 Indicateur C — CO_2e

Composante CO_2e	GNL fossile (g/km)	Bio-LCH4 Résilience V11
Émissions usage — combustion (carbone fossile)	~440 g CO_2/km	~0 g CO_2 fossile · carbone biogénique recyclé — hors émissions amont
Émissions amont (production + liquéfaction + transport)	~50–80 g CO_2e/km	À quantifier par ACV indépendante
Fuites CH4 (GWP ×28 sur 100 ans)	*non systématiquement comptabilisé*	~15–25 g CO_2e/km si fuite 0,5 % · condition contractuelle ≤1 % V11
Crédit biochar (si certifié EBC/Puro.earth)	0	−50 à −100 g CO_2e/km estimé · non acquis · certification à formaliser
BILAN CO_2e usage complet	**~490–520 g/km**	**Potentiellement négatif avec biochar certifié · ACV indépendante nécessaire**

"En fossile, l'EREV émet ~31 % de CO_2 en moins que le GNL classique — uniquement par son architecture. Le passage au bio-LCH4 annule les ~305 g/km restants à l'usage pour les deux architectures. "~0 g CO_2 fossile" désigne strictement les émissions de combustion — les émissions amont, les fuites CH4 et le crédit biochar nécessitent une ACV indépendante."

6. Les quatre avantages structurants — au-delà du rendement

L'argument central n'est pas le rendement en traction continue — le GNL classique y est supérieur. C'est l'architecture combinée.

① Électricité là où elle est optimale

ZEV départ, livraison, zones portuaires — rendement réseau→roues ~85–90 %. Auxiliaires à l'arrêt alimentés par batterie à ~85–90 % de rendement vs APU thermique à ~25–30 %. L'électricité est utilisée partout où elle est 3× plus efficace que la thermique.

② Petite batterie plutôt qu'une batterie de camion BEV

200 kWh LFP vs 600–800 kWh BEV équivalent. Économie ~600–900 kg, matériaux critiques réduits, recharge AC nocturne suffisante (11 kW recommandé), charge utile ~25 t maintenue.

③ Bio-LCH4 particulièrement adapté à la longue distance

Solution particulièrement adaptée pour limiter la masse batterie et les temps de recharge. Recharge 5–10 min vs 45–90 min BEV. Démarrage filière sans infrastructure nationale préalable.

④ Intégration dans la boucle carbone Résilience V11

Bio-LCH4 produit par pyrogazéification + Sabatier national. Biochar co-produit certifiable EBC/Puro.earth. Fuites CH4 ≤1 % contractuelles. Filière à fort potentiel de souveraineté énergétique — production majoritairement nationale.

Le gain énergétique (−17 % à −34 % selon cycle) et le gain CO_2 fossile (−31 %) constituent le cinquième avantage — calculés à frontières homogènes avec auxiliaires inclus, à confirmer sur cycle normalisé définitif.

7. Synthèse comparative pour décideurs

Critère	GNL classique	EREV V2.0	Verdict
Rendement gaz→roues traction continue (Niv. 2)	**36–40 % ✓✓**	32–36 %	GNL supérieur sur ce critère — reconnu explicitement
Efficience cycle Rex + arrêts (Niv. 3)	~38 %	**~45 % ✓✓**	EREV +7 pts · auxiliaires batterie (rendement 3× APU) + freinage récupéré
Efficience cycle complet avec ZEV (Niv. 3b)	~38 %	**~54–57 % ✓✓**	EREV +16–19 pts · ZEV 89 % tire la moyenne · à confirmer cycle normalisé
Gain énergie finale vs GNL fossile (800 km)	référence	**−17 % ✓✓**	Calculé à frontières homogènes · auxiliaires EREV inclus · scén. B
Auxiliaires à l'arrêt — énergie source	130–260 kWh th. (APU)	**47–71 kWh él. (batterie) ✓✓**	Même service · facteur 2,5–3,5× · rendement batterie vs APU thermique
Autonomie longue distance	1 200+ km ✓	1 150–1 300 km ✓	Comparables · objectif 1 000–1 200 km atteint
Arrêts réglementaires — Rex éteint	130–773 kWh th./nuit	**47–71 kWh él./nuit ✓✓**	Rex éteint · auxiliaires sur batterie · facteur 3× sur l'énergie source
ZEV zones urbaines / portuaires	✗ Non	**✓✓ 80–130 km**	80 km minimum en hiver froid · 110–130 km été · recharge 11 kW recommandée
CO_2e usage fossile / km	**~440 g/km**	**~305 g/km**	−31 % par architecture · ~0 g fossile avec bio-LCH4 · ACV requise
Intégration filière souveraine	GNL fossile importé	Bio-LCH4 ✓	Filière à fort potentiel de souveraineté — production majoritairement nationale
Potentiel durée de vie moteur	~1,2 M km	Objectif >1,5 M km	Régime/charge stabilisés · ~200 démarrages/an vs ~1 500 GNL · à valider

> *Ce tableau reconnaît explicitement la supériorité du GNL classique en traction continue (Niv. 2) et intègre les auxiliaires EREV aux arrêts dans le bilan (V2.3). L'honnêteté sur ces deux points est un atout stratégique.*

8. Points de vigilance pour présentations

8.1 Auxiliaires EREV aux arrêts — formulation correcte

Ne pas dire "l'EREV ne consomme rien à l'arrêt". Formulation correcte : *"Le Rex est éteint — consommation de bio-LCH4 nulle. Les besoins auxiliaires (~40–60 kWh utiles sur 11h) sont couverts par la batterie LFP (~47–71 kWh électriques) avec un rendement ~85–90 %, contre 130–260 kWh thermiques pour un APU GNL (~25–30 % de rendement). Le gain n'est pas une suppression des besoins — c'est un gain de rendement de source d'un facteur 2,5–3,5×."*

8.2 ZEV hiver froid — autonomie réduite

En hiver froid (−10°C), les auxiliaires nuit peuvent puiser sur la réserve ZEV. Autonomie ZEV réduite à ~80 km dans ce scénario. Solution : borne de recharge 11 kW au dépôt (standard recommandé). À mentionner proactivement pour les contrats couvrant des régions nordiques.

8.3 Ne pas confondre les quatre niveaux

45 % (Niv. 3) = Rex + arrêts + auxiliaires batterie sans ZEV réseau. **~54–57 % (Niv. 3b)** = cycle complet avec ZEV réseau. **32–36 % (Niv. 2)** = traction seule banc — GNL supérieur.

8.4 V2.0 = référence · V2.1/V2.2 = trajectoire prospective

Si un contradicteur attaque les rendements Rex V2.1/V2.2 : "Ces versions sont des marges de progrès potentielles. La démonstration repose sur V2.0 uniquement — et elle reste valide sans elles."

8.5 ACV indépendante — étape nécessaire

Le bilan CO_2e complet (amont + fuites CH4 + crédit biochar) nécessite une ACV indépendante. Ne pas présenter le crédit biochar comme acquis.

Conclusion

Niveau 2 (traction seule) : GNL classique supérieur à l'EREV V2.0 (36–40 % vs 32–36 %). Reconnu et assumé.

Arrêts réglementaires : le Rex est éteint — 0 kWh de bio-LCH4 consommé. Les besoins auxiliaires (~40–60 kWh utiles) sont couverts par la batterie avec un rendement 3× supérieur à l'APU GNL thermique. Le gain est un gain de rendement de source, pas une suppression des besoins.

Niveau 3 (Rex + arrêts, 800 km) : ~45 % vs ~38 % (+7 pts). Gain énergie finale : −17 %. Calculé à frontières rigoureusement homogènes avec auxiliaires EREV inclus.

Niveau 3b (cycle complet 1 150 km, Convention A) : ~54–57 % vs ~38 % (+16–19 pts). Gain énergie finale : ~−34 %. Ordre de grandeur à confirmer sur cycle normalisé définitif.

Gain CO_2 fossile : ~−31 % par architecture. Identique en fossile et en bio.

L'argument central reste architectural : l'EREV utilise l'électricité là où elle est ~3× plus efficace que la thermique (auxiliaires à l'arrêt, ZEV urbain), et réserve le bio-LCH4 à la longue distance où l'électrification directe est pénalisante.

Sources et références

Programme Résilience V11 (mai 2026) · Annexe Technique ÉREV V11 · Note Camion EREV Rex V11 · Volvo FH LNG / Scania Super LNG · Thermo King TriPac / Carrier Comfort Pro (APU GNL, données constructeurs) · Cummins ISX15N GNV · Toyota Dynamic Force 2.0L (41 %) · Mazda Skyactiv-X (43 %) · BYD Blade Battery LFP (3 000 cycles) · Règlement CE 561/2006 · Convention Eurostat énergie primaire · Directive RED III (UE) 2023/2413 · EBC / Puro.earth