

ANNEXE ÉREV V11 — COMPLÉMENT TECHNIQUE

Rendements réels, récupération d'énergie et bilan systémique

Architecture ÉREV V2.0, V2.1, V2.2 · WHR · Comparatif 5 technologies · Bilan carbone systémique

Complément à l'Annexe ÉREV V11 · Juin 2026

1. Le potentiel thermique inexploité du Rex

L'Annexe ÉREV V11 documente avec précision les rendements thermiques du cycle moteur (44–55 % selon version) et le rendement global gaz→roues (32–41 %). Ce complément traite de la troisième dimension énergétique : la récupération de l'énergie thermique résiduelle rejetée par le Rex et son impact sur le rendement global annuel.

Sur un Rex 1,2L à régime fixe 2 500 tr/min (puissance calorifique carburant : ~90 kW thermiques totaux), la répartition des flux est approximativement :

- 44–48 % convertis en travail mécanique (cycle thermique V2.0)
- 25–30 % rejetés par les gaz d'échappement (450–550°C à charge nominale)
- 20–25 % rejetés par le circuit de refroidissement eau (80–95°C)
- ~5 % rejetés par rayonnement et conduction (non récupérable économiquement)

Le potentiel inexploité

Sur un Rex de 1,2L produisant 40 kW électriques nets (rendement 44 % cycle × 95 % génératrice), la puissance thermique totale rejetée est d'environ 50 kW (gaz d'échappement) + 40 kW (circuit eau) = 90 kW. Une valorisation optimisée de ces deux flux permet de récupérer 60 à 75 kW d'énergie thermique utile — davantage que la puissance électrique nette du Rex lui-même. Avec du biométhane certifié (quasi-absence de soufre), la température de rosée acide est très basse. On peut refroidir les gaz jusqu'à 110–120°C sans risque de corrosion, maximisant la récupération — avantage structurel du biométhane vs diesel (limite 160–180°C sur diesel).

1.1 Gaz d'échappement — la source haute température

Condition fonctionnement	T° gaz échappement	Puissance thermique disponible	Récupérable (échangeur)
Démarrage à froid (< 5 min)	200–300°C	5–10 kW	Faible — transitoire
Charge partielle (30–60 %)	350–420°C	15–25 kW	15–20 kW utiles
Charge nominale (80–100 %)	450–550°C	40–60 kW	35–50 kW utiles
Température rejet après échangeur	110–150°C (biométhane pur)	Résidu non récupéré	< 5 kW perdu

1.2 Circuit de refroidissement eau — la source basse température

Le circuit de refroidissement transporte 40 à 50 % de la chaleur totale rejetée à 80–95°C. Cette énergie est directement utilisable pour le chauffage habitacle et le maintien en température de la batterie LFP (optimale entre 20 et 35°C). En hiver, chaque kW thermique récupéré économise un kW électrique qui aurait été prélevé sur la batterie pour le chauffage.

1.3 Freinage régénératif

Le moteur électrique synchrone à aimants permanents (SPMSM) fonctionne en générateur lors des décélérations. Ce mécanisme, présent dans toutes les versions, représente 15 à 25 % de l'énergie de traction en cycle urbain (négligeable sur autoroute). C'est un avantage structurel de l'architecture électrique vs le diesel qui n'en bénéficie pas.

2. Les technologies de récupération WHR

2.1 Échangeur gaz/liquide — V2.0 et V2.1 (technologie disponible)

Solution la plus simple, robuste et économique. Un échangeur contre-courant gaz/eau récupère la chaleur des gaz d'échappement pour alimenter le circuit de chauffage et maintenir la batterie en température optimale.

- Coût : 200–400 € · 1,5–2,5 kg · aucune pièce mobile
- Rendement de récupération : 60–70 % de la chaleur disponible
- Bénéfice en hiver : économie de 3 à 5 kW électriques sur la batterie (chauffage habitacle gratuit)
- Gain autonomie électrique en hiver : +15 à 25 km à –10°C
- Qualification : ✓ Technologie industrielle mature — standard camions poids lourds

2.2 Cycle Organique de Rankine (ORC) embarqué — la technologie V2.2

L'ORC est ce qui explique le saut de rendement de la V2.2 (52–55 % cycle thermique vs 48–51 % pour la V2.1). Un fluide organique à bas point d'ébullition (R245fa, éthanol ou HFO) est vaporisé par les gaz d'échappement chauds, se détend dans un scroll expander ou une microturbine, puis se condense. L'énergie mécanique est convertie en électricité directement injectée dans le bus DC.

Paramètre	Valeur ORC embarqué Rex	Qualification
Source chaude (gaz d'échappement)	450–550°C entrée ORC	✓ Température favorable
Source froide (air ambiant/radiateur)	20–40°C	Déelta T suffisant pour bon rendement ORC
Rendement ORC (chaleur → électricité)	8–12 % conditions réelles	Labúatoire 10–15 % — 8–12 % en conditions réelles
Puissance électrique récupérée	4–7 kW sur 40–50 kW disponibles	Estimation centrale
Gain rendement global Rex	+ 3–5 points de rendement cycle	Explique le delta V2.1→V2.2
Masse système ORC complet	15–25 kg selon conception	△ À optimiser pour embarqué
Coût ORC complet embarqué	2 000–5 000 € selon volume	△ Économie d'échelle nécessaire
Pièces mobiles	Scroll expander ou microturbine	△ Entretien à 80 000–120 000 km
Qualification globale	△ V2.2 — R&D 2025–2030 — industrialisable après 2030	△ Justifie télémetrie embarquée obligatoire

2.3 Thermoélectricité (TEG) — option sans pièce mobile

Les générateurs thermoélectriques exploitent l'effet Seebeck : différence de température → tension électrique directe. Aucune pièce mobile, durée de vie quasi illimitée. Rendement : 5–8 % de la chaleur disponible — inférieur à l'ORC mais complémentaire sur le collecteur d'échappement. Coût élevé des matériaux BiTe (tellure de bismuth — lui-même sensible aux restrictions d'export chinoises). Qualification : Démontré sur BMW série 5 prototype (2011) — non industrialisé grande série.

3. Rendements réels — la correction fondamentale

3.1 Le problème du rendement de pointe vs rendement réel

Les comparaisons entre technologies utilisent systématiquement les rendements de pointe, mesurés au point optimal de fonctionnement. C'est une erreur de méthode : seul le Rex ÉREV atteint son point optimal en permanence. Toutes les autres technologies en sont éloignées la majorité du temps.

L'argument central — régime fixe vs régime variable

Un diesel affiche 42–44 % de rendement thermique au point optimal (1 800–2 200 tr/min, couple élevé). Ce point n'est atteint qu'à vitesse stabilisée sur autoroute — soit 20–25 % du temps de conduite. Le reste du temps : démarrage froid (5–15 %), ralenti urbain (5–10 %), accélérations (20–30 %), décélérations (0–5 %). Sur cycle WLTC représentatif, le rendement thermique moyen pondéré d'un diesel moderne est de 28–33 % — pas 42–44 %. Le Rex tourne à 2 500 tr/min fixe, au point optimal, en PERMANENCE. Son rendement annoncé de 44–48 % (V2.0) est un rendement garanti continu, pas un pic favorable.

3.2 Calcul détaillé du rendement réservoir→roue — ÉREV vs Diesel

La cascade de pertes doit intégrer tous les composants de la chaîne de conversion, y compris les auxiliaires souvent omis.

Étape	Diesel cycle réel WLTC	ÉREV V2.0 bio-GNV	ÉREV V2.2 bio-GNV
Rendement cycle thermique moteur	28–33 % (moyen pondéré WLTC)	44–48 % (régime fixe garanti)	52–55 % (régime fixe + ORC)
Boîte de vitesses / transmission	× 85–90 % (BVA 8 rapports, régime variable)	N/A — pas de BV mécanique	N/A — pas de BV mécanique
Génératrice	N/A	× 93–95 %	× 93–95 %
Onduleur	N/A	× 96–97 %	× 96–97 %
Moteur électrique (SPMSM)	N/A	× 92–94 %	× 92–94 %
Transmission / pont	× 96 %	× 96–97 %	× 96–97 %
Auxiliaires (pompe, alternateur, clim.)	× 90–92 %	× 90–92 %	× 90–92 %
Récupération freinage (cycle urbain)	0 % (néant)	+ 3–5 % gain moyen	+ 3–5 % gain moyen
RENDEMENT RÉEL RÉSERVOIR→ROUE	20–26 %	32–38 %	38–44 %

L'ÉREV V2.0 présente un avantage réel de 50 à 80 % sur le diesel en cycle réel — et non les 15–20 % que suggère la comparaison des seuls rendements de pointe. C'est l'argument le plus fort en faveur de l'architecture ÉREV, et paradoxalement celui qui est le moins mis en avant.

3.3 Rendement réservoir→roue du FCEV H2 — analyse comparée

La pile à combustible PEM (Proton Exchange Membrane) affiche un rendement électrochimique théorique de 83 %. En conditions dynamiques réelles, ce rendement tombe à 50–60 %, auquel s'ajoutent les pertes des auxiliaires (compresseur d'air, pompe à eau, humidificateur, gestion membrane) qui consomment 10–15 % de la puissance brute de la pile.

Étape	H2 FCEV	ÉREV V2.0	ÉREV V2.2	Commentaire
Rendement cycle thermique / pile	50–60 % (PEM dynamique)	44–48 % (fixe garanti)	52–55 % (fixe + ORC)	FCEV: 60–83 % en statique, chute en dynamique
Auxiliaires spécifiques	× 85–90 % (compresseur + pompe)	N/A	N/A	Parasitic loads pile très significatifs
Batterie tampon / principale	× 96–98 % (1–2 kWh tampon)	Batterie 20–25 kWh	Batterie 20–25 kWh	Lissage puissance seul pour FCEV
Génératrice + ORC	N/A	× 93–95 %	× 93–95 % + ORC 4–7 kW	L'ORC réinjecte de l'électricité en continu sur V2.2
Onduleur + moteur électrique	× 88–91 %	× 88–91 %	× 88–91 %	Identique pour les 3
Transmission / pont	× 96 %	× 96–97 %	× 96–97 %	Identique
Récup. freinage — ville	15–25 % (tampon sature rapidement)	15–25 %	15–25 %	Même ordre de grandeur
Récup. freinage — col	Quasi nulle après 2–3 km	100 % (batterie vidée Rex en montée)	100 % + ORC continu (MIEUX que V2.0)	Avantage décisif ÉREV V2.2
RENDEMENT RÉEL RÉSERVOIR→ROUE	38–45 %	32–38 %	38–44 %	V2.2 efface l'avantage FCEV

La V2.2 efface l'avantage du FCEV (38–44 % vs 38–45 % réservoir→roue) tout en ajoutant freinage optimisé en col et bilan carbone négatif. C'est le passage V2.0→V2.2 qui permet à l'ÉREV de dominer le FCEV sur tous les critères simultanément.

La pile PEM doit fonctionner à 80–90°C. En dessous de 0°C, l'eau produite par la réaction $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$ risque de geler dans les canaux de distribution et d'endommager la membrane. Les constructeurs ont résolu ce problème par des protocoles de purge automatique, mais au prix d'une dégradation de performance au démarrage.

Condition	Impact FCEV H2	Impact ÉREV V2.0	Avantage
Démarrage à –20°C	30–90 sec montée T° · –15–20 % puissance pendant chauffe	Rex démarre normalement · chaleur résidu disponible immédiatement	ÉREV
Grand froid prolongé (–30°C)	Toyota Mirai certifié –30°C avec purge auto · fonctionnel mais dégradé	Batterie LFP maintenue à température par chaleur Rex · capacité préservée	ÉREV
Canicule (42°C)	Refroidissement pile critique · puissance limitée si radiateur insuffisant	Rex conventionnel · moins critique	Neutre

Condition	Impact FCEV H2	Impact ÉREV V2.0	Avantage
Température optimale	Fonctionnement à 80–90°C · conditions stables favorables	Rex à 2 500 tr/min fixe · température stable	Neutre

3.4 Autonomie — comparaison à base de mesure homogène

Toute comparaison d'autonomie doit utiliser la même base de mesure. L'erreur fréquente est de confronter l'autonomie WLTP d'un FCEV (cycle mixte favorable, ~46 km/h de moyenne) à l'autonomie autoroute de l'ÉREV (130 km/h, consommation maximale). Ce tableau corrige ce biais.

Base de mesure	ÉREV V2.0	FCEV Mirai	BEV 60 kWh
★WLTP mixte (~17–18 kWh/100 km ÉREV · 0,9 kg H2/100 km Mirai)	★~810 km (dont 124 km élec. pur)	~650 km (0 km élec. pur)	~380–450 km
★Autoroute réelle 130 km/h (~27 kWh/100 km · ~1,2–1,4 kg H2/100 km)	★~510 km (dont 78 km élec. pur)	~400–470 km (tests ADAC)	~210–270 km
Mode électrique pur (quotidien)	★77 % des km — BEV pur	△0 % — pile H2 100 % du temps	100 % (mais autonomie limitée)

Source autonomie Mirai : Toyota WLTP 650 km · Tests ADAC autoroute 2023 (Mirai : 1,26 kg H2/100 km à 130 km/h). ÉREV : calcul physique homogène (voir section 3.2).

Lecture clé — comparaison à base homogène

En WLTP mixte : l'ÉREV dépasse le Mirai de +25 % (810 km vs 650 km) avec 124 km en électrique pur. En autoroute 130 km/h : l'ÉREV dépasse encore le Mirai (510 km vs 400–470 km réels ADAC). Dans les deux cas, l'ÉREV dispose en plus de 77 % de ses kilomètres annuels en mode BEV pur — fonctionnalité structurellement absente du FCEV. [Tests ADAC 2023 · INSEE mobilité]

3.5 Stockage embarqué et coût de compression — ÉREV vs FCEV

Le volume et la pression de stockage, ainsi que l'énergie consommée pour comprimer le carburant avant le remplissage, sont des paramètres systémiques rarement intégrés dans les comparaisons. Ils sont pourtant décisifs pour l'évaluation du coût réel d'usage et de l'infrastructure nécessaire.

Paramètre	ÉREV — 7 bouteilles Ø 150 mm	FCEV — Toyota Mirai
Carburant embarqué	22–25 kg bio-CH ₄	5,6 kg H2
Volume hydraulique total	~111–124 L	~141 L (3 réservoirs)
Pression de service	★200–250 bar	△700 bar
Énergie de compression (carburant)	★~5 kWh (25 kg × 0,20 kWh/kg)	△~28 kWh (5,6 kg × 5 kWh/kg)
% énergie carburant perdue en compression	★~0,6 %	△~8,4 %
Coût station de remplissage	★200–400 k€ (station GNV 250 bar)	△1,5–3 M€ (station H2 700 bar + -40°C)
Pré-refroidissement requis à la station	★Non nécessaire	△Oui — à -40°C pour éviter échauffement réservoir
Durée de vie réservoirs	★20 ans / 2 000 cycles (R110)	15–20 ans / 5 000 cycles
Réseau de distribution existant FR	★Réseau GNV véhicules industriels	△~50 stations H2 en France (2026)

L'énergie de compression — angle mort des comparaisons habituelles

Comprimer 5,6 kg d'H2 à 700 bar consomme ~28 kWh — soit la totalité de la batterie d'un BEV compact, dépensée avant de rouler un seul kilomètre. En comparaison, comprimer 25 kg de CH₄ à 250 bar coûte ~5 kWh — six fois moins pour une autonomie comparable. Le pré-refroidissement à -40°C requis par les stations H2 (pour

compenser l'échauffement adiabatique lors du remplissage à 700 bar) représente un surcoût d'infrastructure et une consommation énergétique supplémentaire absents des comparaisons constructeurs. [DOE Hydrogen Fueling Infrastructure · Air Liquide données stations H2 · GRDF données compression GNV]

Critère global stockage + usage	ÉREV V2.0	FCEV Mirai	Avantage
Autonomie mixte WLTP	~810 km	~650 km	★ÉREV +25 %
Autonomie autoroute 130 km/h	~510 km	~400–470 km	★ÉREV +10–25 %
Km en électrique pur / an	~77 % des km	0 %	★ÉREV — mode BEV quotidien
Rendement annuel pondéré	~74 %	38–45 %	★ÉREV +64–95 %
Énergie compression par plein	~5 kWh	~28 kWh	★ÉREV ×6 moins
Récup. freinage ville (batterie)	25 kWh — large capacité	1–2 kWh — saturation vite	★ÉREV
Récup. descente col	Batterie 25 kWh + anticipation GPS	Quasi nulle après 2–3 km	★ÉREV
Infrastructure station	200–400 k€	1,5–3 M€	★ÉREV ×6–10 moins cher
Réseau existant France	GNV industriel — maillage national	~50 stations H2	★ÉREV
Bilan carbone (bio-GNV + biochar)	Carbon-négatif possible	Neutre au mieux (H2 vert)	★ÉREV

4. Bilan carbone systémique — la distinction décisive

4.1 Émissions locales vs bilan systémique

Le FCEV n'émet que de la vapeur d'eau à l'échappement — zéro CO₂, zéro NO_x, zéro particules fines — sur la totalité de son autonomie (500–650 km). C'est son avantage absolu et indéniable sur le plan des émissions locales. Le bilan carbone systémique est une question entièrement différente — elle dépend de l'origine de l'hydrogène.

Origine H ₂	Part production mondiale 2025	Emissions CO ₂ /kg H ₂ produit	Bilan g CO ₂ /km FCEV
Vaporeformage gaz naturel (H₂ gris)	48 %	9–12 kg CO ₂ /kg H ₂	90–120 g CO ₂ /km — pire qu'un diesel
Gazéification charbon (H₂ noir/brun)	30 %	18–20 kg CO ₂ /kg H ₂	180–200 g CO ₂ /km — catastrophique
Coproduit industrie chimique (H₂ fatal)	18 %	Variable (souvent non comptabilisé)	Variable — bilan opaque
Electrolyse ENR (H₂ vert)	< 1 % aujourd'hui	0,5–2 kg CO ₂ /kg H ₂	5–20 g CO ₂ /km — excellent
Electrolyse nucléaire FR (H₂ rose)	Marginal	1–3 kg CO ₂ /kg H ₂	10–30 g CO ₂ /km — très bon
MOYENNE MONDIALE 2025	100 %	~11 kg CO ₂ /kg H ₂	~110 g CO ₂ /km — pire qu'un diesel

4.2 Le tableau comparatif à cinq technologies — V2.0 et V2.2 incluses

Ce tableau utilise les rendements réels (cycle WLTC pour le diesel, conditions dynamiques pour le FCEV) et le bilan puits→roue complet.

Critère	Diesel moderne	H2 FCEV	ÉREV V2.0 bio-GNV	ÉREV V2.2 bio-GNV	BEV réseau FR
Rendement réservoir→roue CYCLE RÉEL	20–26 %	38–45 %	32–38 %	38–44 %	85–90 % [note 1]
Rendement puits→roue (production énergie incluse)	18–22 %	10–18 % (H2 gris) · 30–38 % (H2 vert)	28–35 %	30–38 % (ORC améliore bilan puits)	65–75 % (pertes recharge AC + réseau incluses) [note 1]
Émissions locales (pot d'échappement)	130–150 g CO ₂ /km + NO _x	0 — vapeur d'eau uniquement	< 0,06 g/km NO _x Euro 7 · CO ₂ biogénique	< 0,06 g/km NO _x Euro 7 · CO ₂ biogénique	0 local
Bilan carbone systémique 2025	+130 à +150 g/km	+80 à +120 g/km (H2 gris majoritaire 2025)	~0 à +10 g/km (bio-GNV certifié, sans biochar)	~0 à +10 g/km (idem V2.0 — bilan gaz identique)	+10 à +40 g/km (ACV complète, mix FR 2025)
Bilan carbone systémique 2040	+80 à +120 g/km (fossile)	~0 à +10 g/km (H2 vert — neutre au mieux, pas négatif)	★ -20 à -60 g/km (biochar V11 — seul bilan structurellement négatif)	★ -20 à -60 g/km (idem V2.0 — bilan gaz identique)	+5 à +20 g/km (réseau décarboné 2040 — ACV batterie résiduelle)
Impact grand froid sur autonomie	-10 % (viscosité huile)	-15 à -20 % puissance démarrage	-5 % (récup. thermique Rex)	-3 % (ORC + récup. thermique ampl.)	-25 à -35 % autonomie
Récupération freinage — VILLE	0 % (néant)	15–25 % · batterie tampon 1–2 kWh — sature rapidement sur freinages énergiques	15–25 % · batterie 20–25 kWh — large capacité de récup.	15–25 % · batterie 20–25 kWh LFP — large capacité de récup. (identique V2.0)	
Récup. freinage — DESCENTE COL	0 %	Quasi nulle après 2–3 km	100 % (batterie vidée Rex)	100 % + ORC continu 4–7 kW · batterie 20–25 kWh (identique V2.0) — anticipation GPS col	Partielle si batterie pleine en haut
Autonomie zéro émission LOCALE	0 km	~650 km (WLTP mixte) · ~400–470 km (autoroute 130 km/h — tests ADAC)	~810 km (mixte 17 kWh/100 km) · ~510 km (autoroute 130 km/h) · 124 km élec. pur	~885 km (mixte) · ~560 km (autoroute 130 km/h) · 124 km élec. pur + ORC continu	~380–450 km (WLTP mixte 60 kWh) · ~230–280 km (autoroute 130 km/h réel)
Matériaux critiques rares	Très faibles	Platine 30g/pile · TR NdFeB moteur	TR NdFeB moteur · Li LFP 20–25 kWh · zéro cobalt	TR NdFeB moteur · Li LFP 20–25 kWh · zéro cobalt	Li+Co+Ni NMC 60–100 kWh · TR NdFeB moteur

L'argument décisif — neutralité vs carbon-négatif

Le H2 vert, même dans le meilleur scénario possible, est au MAXIMUM neutre en carbone. Le cycle est fermé : l'électricité ENR électrolyse de l'eau, le H2 recombine avec l'O2 pour redonner de l'eau. Bilan zéro — c'est son plafond physique inévitable. Le bio-GNV via pyrogazification avec biochar certifié EBC/CDC V3 DÉPASSE cette neutralité : le carbone séquestré dans les sols ($H/C \leq 0,4$ · stabilité > 1 000 ans) représente une extraction nette de CO2 atmosphérique de 20 à 60 g CO2/km selon la proportion de biomasse traitée par pyrogazification. C'est le seul véhicule à moteur thermique avec un bilan carbone structurellement négatif. Cette dimension carbon-négative est un plafond que le FCEV H2, quelle que soit la pureté de son hydrogène, ne peut pas atteindre par construction.

Architectur e	Mode de fonctionnement	Rend. réservoir →roue	% km annuel s	Contribu tion pondéré e	★Rend. annuel pondéré
★ÉREV V2.0	Électrique pur (quotidien)	85–90 %	77 %	67 %	
★ÉREV V2.0	Rex bio-GNV (grands trajets)	32–38 %	23 %	8 %	★~75 %
★ÉREV V2.2	Électrique pur (quotidien)	85–90 %	77 %	67 %	
★ÉREV V2.2	Rex bio-GNV + ORC (grands trajets)	38–44 %	23 %	9 %	★~76 %
FCEV H2	Pile H2 — 100 % du temps	38–45 %	100 %	38–45 %	△38–45 % (plafond absolu)
BEV réseau FR	Électrique pur — 100 % du temps	85–90 % [note 1]	100 %	85–90 %	85–90 % réservoir→ro ue (mais 0 km au-delà batterie) [note 1]
Diesel moderne	Thermique cycle réel WLTC	20–26 %	100 %	20–26 %	20–26 %

[Note 1] Base réservoir→roue : énergie mesurée à la sortie du réservoir/batterie, avant tout transfert. BEV et ÉREV mode élec. utilisent la même chaîne (onduleur + moteur + transmission) → rendement identique 85–90 %. Le rendement puits→roue BEV (65–75 %) intègre les pertes de recharge AC (~88–92 %) et de transport réseau — c'est un indicateur différent, non comparable en réservoir→roue. Données mobilité : INSEE — 77 % des km français < 50 km/jour. []

4.3 Gestion anticipative de l'énergie en relief — l'avantage exclusif de l'ÉREV

C'est l'argument le plus différenciant de l'ÉREV en montagne, et paradoxalement celui qui est le moins documenté. La présence du Rex donne au véhicule une capacité d'anticipation énergétique que ni le FCEV ni le BEV ne peuvent reproduire structurellement.

Le problème structural du BEV et du FCEV en descente de col

Pour récupérer de l'énergie en descente, la batterie doit avoir de la capacité disponible. Si elle est pleine en haut du col, l'énergie potentielle de la descente est intégralement perdue en chaleur dans les résistances ou les freins mécaniques. Sur un col alpin typique (dénivelé 1 500 m, véhicule + passagers 2 000 kg), l'énergie potentielle disponible est approximativement :

$$E = m \times g \times h = 2\,000 \times 9,81 \times 1\,500 / 3\,600\,000 \approx 8 \text{ kWh} \text{ — récupérables à } 80 \% = 6,4 \text{ kWh effectifs}$$

Sur une batterie BEV de 75 kWh chargée à 90 % en haut du col, la capacité disponible est de 7,5 kWh — la récupération est donc possible mais limitée. Si le conducteur a chargé à 100 % avant le col (comportement fréquent par anxiété d'autonomie), la récupération est quasi nulle et l'énergie est perdue. Sur un FCEV, la batterie tampon de 1–2 kWh sature en 2–3 km de descente — le reste de l'énergie potentielle est systématiquement perdu.

La stratégie d'anticipation GPS de l'ÉREV

Le Rex permet une stratégie impossible sur les autres architectures : vider délibérément la batterie en montée pour disposer de toute sa capacité en descente.

Phase	ÉREV V2.0 (sans ORC)	ÉREV V2.2 (avec ORC)	BEV	FCEV
Approche col (30 km avant)	GPS détecte col · Rex activé pour vider batterie	GPS détecte col · Rex activé · ORC récup 4–7 kW en continu depuis gaz d'échapp.	Pas d'anticipation · batterie dans l'état où elle est	Pas d'anticipation · batterie tampon pleine en permanence
Ascension du col	Rex vide batterie · arrivée quasi vide en haut	Rex vide batterie ET ORC réinjecte 4–7 kW · vide plus lentement mais arr. vraiment vide	Batterie souvent pleine · récup. descente limitée	Batterie tampon pleine dès 2 km de descente
Descente du col	Récup. 100 % · batterie 0 → 20–25 kWh gratuitement	Récup. 100 % + ORC continu · batterie pleine plus vite · Rex éteint plus tôt	Récup. partielle si batterie était pleine en haut	Quasi nulle après 2–3 km · reste perdu en chaleur
Bilan net col	Bio-GNV montée ≈ électrique récup. descente · quasi gratuit	Bio-GNV montée < électrique récup. (descente + ORC) · MIEUX que gratuit	Traction montée payée · descente partiellement récup.	H2 montée payé · descente quasi intégralement perdue

Le système de navigation GPS avec topographie intégrée peut automatiser entièrement cette stratégie. Le conducteur n'a aucune action à faire — l'ECU calcule le profil altimétrique du trajet, anticipe les cols, et gère le niveau de charge optimal en permanence. C'est une fonctionnalité native de l'architecture ÉREV, pas un ajout logiciel complexe.

L'argument montagne — V2.0 vs V2.2 — la différence est décisive

V2.0 : le Rex vidé la batterie en montée, la descente la recharge gratuitement. Bilan quasi nul. V2.2 : l'ORC produit 4–7 kW électriques EN CONTINU pendant toute la montée depuis les gaz d'échappement. Résultat : le Rex doit fonctionner plus longtemps pour vraiment vider la batterie, mais la descente est encore plus rapide à recharger car ORC + freinage régénératif opèrent simultanément. Bilan net V2.2 sur col : POSITIF — le système génère plus d'électricité qu'il ne consomme en bio-GNV sur le cycle montée/descente complet. Le FCEV perd systématiquement après 2–3 km de descente. Le BEV dépend de l'état de charge initial. L'ÉREV V2.2 est la seule architecture qui transforme un col en générateur net d'énergie.

5. Synthèse — ce que la V2.2 récupère réellement

La V2.2 est qualifiée Δ prospective 2030+ avec 52–55 % de rendement cycle thermique et 38–44 % de rendement global gaz→roues — le gain de 3 points vs la V2.0 (32–38 %) provenant de l'ORC embarqué. Ce complément décrit précisément comment elle atteint ces performances en trois couches superposées.

Composant V2.2	Gain rendement	Technologie	Qualification
Cycle Atkinson/Miller optimisé bio-GNV	Base 44–48 % cycle	Compression 18:1 · régime fixe 2 500 tr/min · indice octane 120	✓V2.0 démontré
Turbocompound	+ 3–4 points cycle	Turbine récupération énergie gaz résiduels → génératrice	V2.1 — validé industriellement sur PL
ORC embarqué (gaz d'échappement)	+ 4–5 points cycle	Fluide organique · scroll expander · générateur DC	Δ V2.2 — R&D 2025–2030
Échangeur eau/chaleur (circuit refroid.)	Non compté en rendement cycle	Chauffage habitacle + batterie LFP — économie 3–5 kW élec. en hiver	✓Disponible dès V2.0
Freinage régénératif	+ 3–5 % gain moyen annuel	Moteur électrique en générateur	✓Standard toutes versions
TOTAL V2.2 rendement cycle	52–55 %	Somme des contributions	Δ Prospectif — à valider banc moteur Phase 0

Rendement annuel moyen pondéré — le bon indicateur

Le rendement annuel moyen gaz→énergie utile (motorisation + chaleur valorisée pour le chauffage et la batterie) se situe entre 38 et 44 % pour la V2.0 sur le parc français (5 mois de période froide, 3 mois neutres, 4 mois de période chaude). Ce chiffre intègre les bénéfices hivernaux de la récupération thermique (+15 à 25 km d'autonomie électrique en hiver) et les conditions neutres du reste de l'année. C'est le chiffre à utiliser en communication — il est honnête, vérifiable, et nettement supérieur au diesel réel (20–26 %). Les variations saisonnières défavorables sont des données techniques disponibles sur demande, non des données de communication.

6. ÉREV avec pile à combustible vs ÉREV bio-GNV — la question systémique

Une question légitime est de savoir si l'on pourrait remplacer le Rex Atkinson par une pile à combustible H₂ dans l'architecture ÉREV. La réponse technique est oui — et c'est une

architecture cohérente. Mais la comparaison systémique révèle un écart considérable entre les deux solutions.

6.1 L'architecture ÉREV pile H2 — ce qui est séduisant

Le principe est identique à l'ÉREV bio-GNV : une batterie LFP 25 kWh assure 77 % des kilomètres en mode BEV pur. Pour les longs trajets et les pics de puissance, une pile à combustible H2 de 70 kW recharge la batterie — exactement comme le Rex Atkinson, mais en silence et sans émission locale.

Paramètre	ÉREV Rex Atkinson bio-GNV	ÉREV Pile H2 70 kW
Mode quotidien (77 % des km)	★BEV pur — batterie 25 kWh	★BEV pur — batterie 25 kWh
Prolongateur — puissance	50–70 kW	70 kW
Prolongateur — rendement	32–38 % réservoir→roue	★38–45 % réservoir→roue
Émissions locales prolongateur	CO ₂ biogénique + NO _x (V2.0)	★Zéro — vapeur d'eau uniquement
Bruit prolongateur	Faible (2 500 tr/min fixe)	★Silencieux
Masse prolongateur seul	~80 kg (Rex + générateur)	★~25 kg (pile PEM 70 kW)
Carburant embarqué	★22–25 kg bio-CH ₄ · 111–124 L · 250 bar	H2 · 700 bar · réservoirs ~87 kg vides
Rendement annuel pondéré	★~75 % (BEV 77 % + Rex 23 %)	★~75 % (BEV 77 % + pile 23 %)
Infrastructure carburant FR	★Réseau GNV + GRDF 200 000 km	△~50 stations H2 en France (2026)
Déploiement possible dès	★2027	△2030–2035 selon déploiement H2

Le rendement annuel pondéré est quasi identique — dans les deux cas, 77 % des km en BEV pur dominant le bilan. La différence est dans l'infrastructure, le carburant et ce que ce carburant permet de faire par ailleurs.

6.2 Le verrou fondamental : l'H2 n'a qu'une seule voie de production décarbonée

Le bio-CH₄ peut être produit par trois voies indépendantes : méthanisation des effluents organiques (rendement 55–65 %), pyrogazéification de la biomasse résiduelle (40–55 %), et Power-to-Gas Sabatier à partir de surplus ENR. L'H2 décarboné n'a qu'une seule voie : l'électrolyse de l'eau par électricité renouvelable ou nucléaire.

Cette unicité de voie crée une dépendance totale à l'électricité disponible et à un prix compétitif. À tarif normal, le coût de production de l'H2 vert (~5–8 €/kg) rend le FCEV deux à trois fois plus coûteux à l'usage que le bio-GNV (~1,5–2 €/kg équivalent énergie).

6.3 Le Sabatier — la dimension que le H2 pur ne couvre pas

C'est l'argument le plus décisif en faveur du CH₄ sur l'H₂ comme vecteur de stockage des surplus ENR. Quand les ENR produisent en excès et que les batteries sont pleines, deux options se présentent :

Option	H2 pur (électrolyse)	★Sabatier (Power-to-CH ₄)
Produit	H2 gazeux	★CH ₄ — gaz naturel de synthèse
Infrastructure de stockage	△Réservoirs H2 haute pression à construire	★Réseau GRDF 200 000 km existant
Stockage saisonnier	△Quelques TWh envisagés	★130 TWh stockage souterrain français
Réinjection réseau électrique	✗Non — H2 quitte le système élec.	★Oui — centrales gaz → électricité
Usage mobilité	FCEV uniquement (50 stations FR)	★ÉREV + camions + aviation + chauffage
Usage aviation	✗Impossible à grande échelle	★Bio-GNL — gamme complète 5 segments
Boucle énergie fermée	✗Surplus → H2 → consommé définitivement	★Surplus → CH ₄ → stocké → réélectrifié si besoin

Le Sabatier transforme un surplus électrique en CH₄ injectable dans le réseau GRDF. Ce CH₄ peut être stocké dans les 130 TWh de capacité souterraine française — la plus grande réserve d'énergie saisonnière d'Europe — et reconverti en électricité via des centrales gaz lors d'un épisode Dunkelflaute. L'H₂ pur ne boucle pas cette boucle : une fois produit, il ne réalimente pas le réseau électrique.

6.4 Ce que le bio-CH₄ résout que l'H2 ne touche pas

Au-delà de la mobilité, le bio-CH₄ Résilience adresse simultanément des problèmes que l'H₂ n'effleure pas :

Problème systémique	H2 pur	★Bio-CH ₄ Résilience
Mobilité longue distance	✓FCEV (50 stations FR)	★ÉREV partout (réseau GNV)
Aviation décarbonée	✗Densité volumique insuffisante	★Bio-GNL — 5 segments de VTOL au long-courrier
Gestion déchets organiques / biomasse résiduelle	✗Aucun lien	★Intrant primaire de la filière
Séquestration carbone permanente	✗Impossible structurellement	★Biochar — 2,5–3,1 t CO ₂ eq/t · stabilité 1 000 ans
Amélioration des sols agricoles	✗Aucun lien	★Biochar — fertilité, rétention eau, CEC

Problème systémique	H2 pur	★Bio-CH ₄ Résilience
Prévention des méga-incendies	✗Aucun lien	★Prélèvement biomasse fine — coupures combustible rémunérées
Stockage saisonnier énergie	⚠Infrastructure à construire	★130 TWh GRDF existants
Résilience réseau Dunkelflaute	⚠Partielle	★Démontrée — 5 jours couverts niveau systémique
Souveraineté industrielle FR	⚠Dépend ENR importées ou nucléaire	★Biomasse française — ressource nationale

La réponse à la question : ÉREV pile H2 ou ÉREV bio-GNV ?

L'ÉREV pile H2 est techniquement pertinent — même architecture série, même rendement annuel pondéré ~75 %, silence total et zéro émission en mode prolongateur. Il sera la bonne réponse dans les zones où l'infrastructure H2 aura été déployée et où l'H2 vert sera disponible à prix compétitif. Mais l'ÉREV bio-GNV n'est pas son concurrent — il est son complément. Le bio-GNV utilise une infrastructure existante, un carburant produit à partir de ressources sans alternative (biomasse résiduelle), et résout simultanément la séquestration carbone, la gestion des déchets, l'amélioration des sols et le stockage saisonnier de l'énergie. Ce sont deux réponses à la même question de mobilité longue distance, mais l'une résout en parallèle cinq autres problèmes systémiques que l'autre ne touche pas. Le Sabatier renforce encore cet écart : en convertissant les surplus ENR en CH₄ injectable dans le réseau GRDF, il boucle la boucle énergie que l'H2 pur ne peut pas fermer — les surplus deviennent du stockage saisonnier réélectrifiable, pas un carburant à sens unique. [Données GRDF stockage souterrain · Programme Résilience V11]

SOFC CH₄ direct — perspective stationnaire et mobilité lourde

La pile à oxyde solide (SOFC) fonctionnant directement au CH₄ atteint 50–60 % de rendement électrique en sortie de pile, soit ~44–50 % réservoir→roue après la chaîne de traction — un gain de 6–8 points vs la V2.2 (38–44 %). Sur le plan thermodynamique, l'intérêt est réel. Mais les contraintes embarquées voiture sont aujourd'hui rédhibitoires : montée en température de 30–45 minutes pour atteindre 700–900°C (ou 2–4 kWh de batterie pour préchauffer), cyclage thermique quotidien destructeur pour les céramiques (conçues pour rester chaudes en permanence), vibrations incompatibles avec les matériaux fragiles, et masse actuelle de 150–300 kg pour 70 kW contre 25 kg pour une PEM équivalente. La SOFC CH₄ a en revanche tout son sens là où elle tourne en continu sans cyclage : production stationnaire de bâtiments et sites industriels (Bloom Energy, SOLIDpower — déjà commercialisé), navires, trains, groupes électrogènes de secours. Pour le véhicule individuel, les contraintes d'usage réel la réservent à un horizon incertain au-delà de 2035, si les travaux sur les matériaux IT-SOFC (500–650°C) aboutissent à une compacité et une robustesse au cyclage compatibles avec l'automobile. [⚠R&D — non industrialisé véhicule à ce jour]