

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  $-10^{\circ}\text{C}$
- 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 télémétrie 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           |
|--|---|-------------------------------|-----------------------------|
| <b>Rendement cycle thermique moteur</b>        | 28–33 % (moyen pondéré WLTC)                | 44–48 % (régime fixe garanti) | 52–55 % (régime fixe + ORC) |
| <b>Boîte de vitesses / transmission</b>        | x 85–90 % (BVA 8 rapports, régime variable) | N/A — pas de BV mécanique     | N/A — pas de BV mécanique   |
| <b>Génératrice</b>                             | N/A   | x 93–95 %                     | x 93–95 %                   |
| <b>Onduleur</b>                                | N/A   | x 96–97 %                     | x 96–97 %                   |
| <b>Moteur électrique (SPMSM)</b>               | N/A   | x 92–94 %                     | x 92–94 %                   |
| <b>Transmission / pont</b>                     | x 96 %                                      | x 96–97 %                     | x 96–97 %                   |
| <b>Auxiliaires (pompe, alternateur, clim.)</b> | x 90–92 %                                   | x 90–92 %                     | x 90–92 %                   |
| <b>Récupération freinage (cycle urbain)</b>    | 0 % (néant)                                 | + 3–5 % gain moyen            | + 3–5 % gain moyen          |
| <b>RENDEMENT RÉEL RÉSERVOIR→ROUE</b>           | 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  |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| <b>Rendement cycle thermique / pile</b> | 50–60 % (PEM dynamique)            | 44–48 % (fixe garanti)               | 52–55 % (fixe + ORC)                 | FCEV: 60–83 % en statique, chute en dynamique        |
| <b>Auxiliaires spécifiques</b>          | × 85–90 % (compresseur + pompe)    | N/A                                  | N/A                                  | Parasitic loads pile très significatifs              |
| <b>Batterie tampon / principale</b>     | × 96–98 % (1–2 kWh tampon)         | Batterie 20–25 kWh                   | Batterie 20–25 kWh                   | Lissage puissance seul pour FCEV                     |
| <b>Génératrice + ORC</b>                | N/A                                | × 93–95 %                            | × 93–95 % + ORC 4–7 kW               | L'ORC réinjecte de l'électricité en continu sur V2.2 |
| <b>Onduleur + moteur électrique</b>     | × 88–91 %                          | × 88–91 %                            | × 88–91 %                            | Identique pour les 3                                 |
| <b>Transmission / pont</b>              | × 96 %                             | × 96–97 %                            | × 96–97 %                            | Identique  |
| <b>Récup. freinage — ville</b>          | 15–25 % (tampon sature rapidement) | 15–25 %                              | 15–25 %                              | Même ordre de grandeur                               |
| <b>Récup. freinage — col</b>            | Quasi nulle après 2–3 km           | 100 % (batterie vidée Rex en montée) | 100 % + ORC continu (MIEUX que V2.0) | Avantage décisif ÉREV V2.2                           |
| <b>RENDEMENT RÉEL RÉSERVOIR→ROUE</b>    | 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 |
|-------------------------------------|--|---|----------|
| <b>Démarrage à -20°C</b>            | 30–90 sec montée T° · -15–20 % puissance pendant chauffe                   | Rex démarre normalement · chaleur résidu disponible immédiatement         | ÉREV     |
| <b>Grand froid prolongé (-30°C)</b> | Toyota Mirai certifié -30°C avec purge auto · fonctionnel mais dégradé     | Batterie LFP maintenue à température par chaleur Rex · capacité préservée | ÉREV     |
| <b>Canicule (42°C)</b>              | Refroidissement pile critique · puissance limitée si radiateur insuffisant | Rex conventionnel · moins critique  | Neutre   |
| <b>Température optimale</b>         | Fonctionnement à 80–90°C · conditions stables favorables                   | Rex à 2 500 tr/min fixe · température stable                              | Neutre   |

## 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 CO<sub>2</sub>, zéro NO<sub>x</sub>, 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 <sub>2</sub>                              | Part production mondiale 2025 | Emissions CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub> produit | Bilan g CO <sub>2</sub> /km FCEV                 |
|---|-------------------------------|--|--|
| Vaporeformage gaz naturel (H <sub>2</sub> gris)     | 48 %                          | 9–12 kg CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub>           | 90–120 g CO <sub>2</sub> /km — pire qu'un diesel |
| Gazéification charbon (H <sub>2</sub> noir/brun)    | 30 %                          | 18–20 kg CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub>          | 180–200 g CO <sub>2</sub> /km — catastrophique   |
| Coproduit industrie chimique (H <sub>2</sub> fatal) | 18 %                          | Variable (souvent non comptabilisé)                  | Variable — bilan opaque                          |
| Electrolyse ENR (H <sub>2</sub> vert)               | < 1 % aujourd'hui             | 0,5–2 kg CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub>          | 5–20 g CO <sub>2</sub> /km — excellent           |
| Electrolyse nucléaire FR (H <sub>2</sub> rose)      | Marginal                      | 1–3 kg CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub>            | 10–30 g CO <sub>2</sub> /km — très bon           |
| <b>MOYENNE MONDIALE 2025</b>                        | 100 %                         | ~11 kg CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub>            | ~110 g CO <sub>2</sub> /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                                  | H <sub>2</sub> FCEV   | ÉREV V2.0 bio-GNV   | ÉREV V2.2 bio-GNV   | BEV réseau FR                    |
|--|---|---|---|---|----------------------------------|
| <b>Rendement réservoir→roue CYCLE RÉEL</b>               | 20–26 %   | 38–45 %   | 32–38 %   | 38–44 %   | 70–80 %                          |
| <b>Rendement puits→roue (production énergie incluse)</b> | 18–22 %   | 10–18 % (H <sub>2</sub> gris) · 30–38 % (H <sub>2</sub> vert) | 28–35 %   | 30–38 % (ORC améliore bilan puits)                              | 65–75 % (FR)                     |
| <b>Émissions locales (pot d'échappement)</b>             | 130–150 g CO <sub>2</sub> /km + NO <sub>x</sub> | 0 — vapeur d'eau uniquement                                   | < 0,06 g/km NO <sub>x</sub> Euro 7 · CO <sub>2</sub> biogénique | < 0,06 g/km NO <sub>x</sub> Euro 7 · CO <sub>2</sub> biogénique | 0 local                          |
| <b>Bilan carbone systémique 2025</b>                     | –130 à –150 g/km                                | –80 à –120 g/km (H <sub>2</sub> gris)                         | –10 à –30 g/km (bio-GNV certifié)                               | –10 à –30 g/km (idem V2.0)                                      | –20 à –50 g/km (réseau FR)       |
| <b>Bilan carbone systémique 2040</b>                     | –80 à –120 g/km                                 | 0 g/km max (H <sub>2</sub> vert)                              | –30 à –80 g/km (biochar V11)                                    | –30 à –80 g/km (idem V2.0 · bilan gaz identique)                | –5 à –20 g/km (réseau décarboné) |
| <b>Impact grand froid sur autonomie</b>                  | –10 % (viscosité huile)                         | –15 à –20 % puissance démarrage                               | –5 % (récup. thermique Rex)                                     | –3 % (ORC + récup. thermique ampl.)                             | –25 à –35 % autonomie            |

| Critère                               | Diesel moderne | H2 FCEV  | ÉREV V2.0 bio-GNV                                       | ÉREV V2.2 bio-GNV                                | BEV réseau FR                             |
|---------------------------------------|----------------|--|---|--|---|
| <b>Récupération freinage — VILLE</b>  | 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 60–100 kWh                    |   |
| <b>Récup. freinage — DESCENTE COL</b> | 0 %            | Quasi nulle après 2–3 km   | 100 % (batterie vidée Rex)                              | 100 % + ORC continu (MIEUX que V2.0)             | Partielle si batterie pleine en haut      |
| <b>Autonomie zéro émission LOCALE</b> | 0 km           | 500–650 km (totalité)  | 100–130 km élec. + 490 km bio-GNV                       | 100–130 km élec. + 490 km bio-GNV                | 400–600 km (totalité)                     |
| <b>Matériaux critiques rares</b>      | 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 ≤ 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.

### L'argument qui renverse définitivement la comparaison — rendement moyen pondéré sur usage réel

Le FCEV utilise sa pile à combustible 100 % du temps — rendement PEM dynamique 38–45 % en permanence, sans exception. L'ÉREV fonctionne en BEV pur 77 % des kilomètres (usage quotidien, INSEE mobilité) avec un rendement électrique de 70–80 %, et seulement 23 % des kilomètres avec le Rex (grands trajets). Le rendement moyen pondéré sur usage réel annuel est donc : Le rendement moyen pondéré sur usage réel annuel est donc : **ÉREV V2.0** :  $(0,77 \times 75 \%) + (0,23 \times 35 \%) = 57,8 \% + 8,1 \% = 65,9 \%$  — soit 47 à 74 % SUPERIEUR au FCEV. **ÉREV V2.2** :  $(0,77 \times 75 \%) + (0,23 \times 41 \%) = 57,8 \% + 9,4 \% = 67,2 \%$  — soit 49 à 77 % SUPERIEUR au FCEV. **FCEV** : **38–45 %** en permanence — plafond absolu, pas de mode BEV. Nota : le calcul V2.2 utilise 41 % comme rendement Rex moyen (milieu 38–44 %). Borne haute V2.2 (44 %) :  $(0,77 \times 75 \%) + (0,23 \times 44 \%) = 67,9 \%$ . Sur l'année, l'ÉREV domine largement le FCEV : les 77 % de km en BEV pur (70–80 % rendement) compensent et surpassent les 23 % en Rex.

## 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  |
|-----------------------------------|---|---|---|---|
| <b>Approche col (30 km avant)</b> | 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 |
| <b>Ascension du col</b>           | 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               |
| <b>Descente du col</b>            | 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         |
| <b>Bilan net col</b>              | 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  $\Delta$  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                                       |
|---|-------------------------------|---|---|
| <b>Cycle Atkinson/Miller optimisé bio-GNV</b>   | Base 44–48 % cycle            | Compression 18:1 · régime fixe<br>2 500 tr/min · indice octane 120  | ✓V2.0 démontré                                      |
| <b>Turbocompound</b>                            | + 3–4 points cycle            | Turbine récupération énergie gaz résiduels → génératrice            | V2.1 — validé industriellement sur PL               |
| <b>ORC embarqué (gaz d'échappement)</b>         | + 4–5 points cycle            | Fluide organique · scroll expander · générateur DC                  | $\Delta$ V2.2 — R&D 2025–2030                       |
| <b>Échangeur eau/chaleur (circuit refroid.)</b> | Non compté en rendement cycle | Chauffage habitacle + batterie LFP — économie 3–5 kW élec. en hiver | ✓Disponible dès V2.0                                |
| <b>Freinage régénératif</b>                     | + 3–5 % gain moyen annuel     | Moteur électrique en générateur                                     | ✓Standard toutes versions                           |
| <b>TOTAL V2.2 rendement cycle</b>               | 52–55 %                       | Somme des contributions   | $\Delta$ 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 bénéfiques 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.