ÉREV V2.2 — outils d'optimisation de l'énergie et de la maintenance

Programme Résilience 2045 · Jacques Diez · 22 octobre 2026

Ce qui fait la différence

L'ÉREV V2.2 se distingue par un principe que ni le BEV ni les hybrides actuels ne peuvent copier : son moteur thermique fonctionne en permanence à un point unique, ce qui permet de récupérer et de gérer l'énergie comme dans une petite centrale. Les outils prévus se rangent en quatre familles.

- **Gestion de l'énergie** : Rex à point fixe piloté par l'état de charge, anticipation du relief par GPS, effacement passif du réseau aux pointes, fonction V2H.
- **Récupération de l'énergie perdue** : turbocompound électrique (V2.1), cycle ORC (V2.2), échangeur de chaleur et pompe à chaleur réversible pour l'habitacle et la batterie, freinage régénératif sur une batterie LFP de 20–25 kWh.
- **Maintenance** : forte réduction des démarrages à froid, programme « Auto-réparable » en trois niveaux, télémétrie embarquée, dépollution Euro 7 sans AdBlue ni filtre à particules.
- **Surveillance** : capteur CH_4 continu sur la ligne commune des soupapes, transmission des données vers une plateforme nationale.

Toutes les valeurs de la V2.2 sont des objectifs de conception pour 2030 et au-delà, à valider sur banc moteur en Phase 0. La V2.0, plus simple, reste le véhicule de lancement.

Gestion de l'énergie

L'énergie est gérée automatiquement par le véhicule, sans décision du conducteur ni pilotage par le réseau.

Outil	Fonctionnement	Différence avec BEV et hybrides actuels
Rex à point fixe	Moteur de 1,2–1,5 L à 2 500 tr/min, jamais relié aux roues, démarré automatiquement sous un seuil de charge	Rendement moyen égal au rendement de pointe ; un hybride à régime variable tombe à 20–26 % en usage réel
Batterie LFP 20–25 kWh	100–130 km en électrique pur, soit environ 77 % des km annuels ; 3 000 cycles	Même rendement qu'un BEV au quotidien, avec 70–75 % de métaux critiques en moins
Anticipation du relief par GPS	Avant un col, le Rex vide la batterie en montée pour récupérer toute la descente (environ 6,4 kWh pour 1 500 m de dénivelé et 2 t)	Un BEV chargé à 100 % en haut du col perd l'essentiel de la descente ; une pile à combustible sature en 2–3 km
Boîte 2 rapports	Rapport court en ville, rapport long au-delà de 80 km/h	Environ +10–15 % d'autonomie sur autoroute par rapport à un rapport unique
Effacement passif du réseau	Aux pointes (grand froid, départs), le véhicule roule sur le Rex au lieu de se recharger	Un parc de BEV appelle de la puissance aux pires moments ; ordre de grandeur 20–40 GW sur un parc de 33 M (modélisation RTE recommandée)
V2H	Onduleur bidirectionnel et boîtier de couplage : 3–7 kW pendant 10–20 h pour une maison	Un BEV ne fournit que sa batterie ; l'ÉREV est un groupe électrogène complet

La recharge se fait la nuit à 2–3 kW, dans les heures creuses ; le plein de bio-GNV prend 3 minutes.

Inciter à rouler sur l'électricité du réseau (proposition)

Le mécanisme passif ne suffit pas à garantir que le conducteur recharge chaque soir. Deux leviers simples le rendent naturel :

- **Un suivi et un indicateur au tableau de bord** : part des km faits en électrique sur le mois, coût comparé gaz / électricité, et rappel de branchement si la batterie est basse sans long trajet prévu. Les mêmes données remontent avec la télémétrie, pour vérifier que les ~77 % visés sont atteints sur le parc.
- **Un signal prix** : si la fiscalité rend le km au bio-GNV un peu plus cher que le km en recharge domestique, le conducteur a intérêt à brancher régulièrement, et le gaz reste réservé aux grands trajets et aux pointes du réseau.

Point d'attention : l'indicateur doit pousser à recharger en heures creuses (charge programmée la nuit), et non au retour à 19 h, sinon il recréerait la pointe que l'ÉREV permet d'effacer.

Récupération de l'énergie perdue

La V2.2 ne crée pas de rendement : elle récupère une partie des ~25–30 % d'énergie perdus à l'échappement et des ~18–22 % perdus au refroidissement, ce qui porte le rendement du groupe de 44–48 % à 52–55 % (objectif central 52 %).

Étape	Technologie ajoutée	Rendement du groupe	Gaz → roues
Repère : Geely Boyue EREV (en série, 2026)	Prolongateur 1,5 L dédié, à l'essence	47,26 % (moteur) ; ~42 % jusqu'à la sortie génératrice	~35–37 % (déduit de 3,77 kWh électriques par litre)
V2.0	Méthane à haute compression (~16–18:1), EGR refroidi 18–25 %, allumage renforcé, point de fonctionnement unique	44–48 %	32–36 %
V2.1	Turbocompound électrique : une turbine d'échappement entraîne une génératrice reliée au bus électrique	48–51 %	35–38 %
V2.2	Cycle organique de Rankine (ORC) sur l'échappement et le refroidissement, injection d'eau, revêtements thermiques	52–55 %	38–41 %

Des objectifs prudents. Comparés aux chiffres publiés par les constructeurs, ces rendements ne sont pas optimistes : à l'essence, le Geely Boyue EREV atteint déjà le haut de la fourchette V2.0 et le niveau de la V2.1. Le Rex au méthane part d'un carburant plus favorable (indice d'octane ~130). De plus, ces rendements réservoir → roues ne comptent que l'énergie de traction : ils ne comptent ni la chaleur valorisée pour l'habitacle et la batterie (échangeur, PAC), ni le froid de détente du GNV, ni le freinage régénératif, ni l'anticipation du relief. En comptant la chaleur utile, le comparatif des rendements situe le rendement annuel moyen gaz → énergie utile entre 38 et 44 % dès la V2.0. Le chiffre Geely est, lui, une valeur au point optimal : par prudence, nos calculs gardent le bas des fourchettes.

Le repère Geely conforte ces objectifs. Geely a annoncé en 2025 un 1,5 L atmosphérique hybride à 47,26 % de rendement thermique (CarNewsChina), puis en avril 2026 48,4 % sur son système hybride i-HEV, mesure vérifiée par Guinness World Records (NewMobility). Surtout, Geely commercialise depuis avril 2026 le Boyue EREV, une architecture à prolongateur d'autonomie comme la nôtre : prolongateur de 1,5 L annoncé à 47,26 %, soit environ 3,77 kWh électriques par litre d'essence, et batterie LFP de 28,3 ou 50,4 kWh (CarNewsChina). Ces moteurs fonctionnent à l'essence. L'objectif V2.0 (44–48 %) est donc déjà atteint en série par des moteurs moins favorisés que le Rex, et la cible V2.1 (48–51 %) n'est qu'un peu au-dessus. Le Rex y ajoute un méthane à indice d'octane ~130, qui autorise une compression plus forte que l'essence, et un point de fonctionnement unique tenu en permanence, où le rendement moyen égale le rendement de pointe. Transposé au méthane (13,9 kWh/kg), un Rex à 45 % produirait environ 5,6 kWh électriques par kg, et un groupe V2.2 à 52 % environ 6,5 kWh par kg, en comptant ~90 % pour la génératrice et l'électronique comme chez Geely. Reste à transposer ces résultats au méthane, dont la flamme plus lente exige l'allumage renforcé prévu.

Deux récupérations s'ajoutent dès la V2.0, hors rendement du groupe :

- **Échangeur gaz/eau** (200–400 €, sans pièce mobile) : chauffage de l'habitacle et maintien de la batterie entre 20 et 35 °C, soit 3–5 kW électriques économisés et +15 à 25 km d'autonomie électrique à −10 °C. Le bio-GNV, presque sans soufre, permet de refroidir les fumées jusqu'à 110–120 °C, contre 160–180 °C pour un diesel.
- **Freinage régénératif** : 15–25 % de l'énergie de traction en ville, sur une batterie assez grande pour ne pas saturer.

Pompe à chaleur réversible et gestion thermique intégrée

Une pompe à chaleur (PAC) réversible relie l'habitacle, la batterie et le circuit de refroidissement du Rex. Elle choisit à chaque instant la source de chaleur la plus avantageuse :

- **En mode électrique, en hiver** : la PAC chauffe l'habitacle et la batterie avec un coefficient de performance de l'ordre de 2 à 3, au lieu d'une résistance électrique qui consomme 1 kWh pour 1 kWh de chaleur.
- **En mode Rex, en hiver** : la chaleur du Rex couvre le chauffage par l'échangeur ; la PAC peut puiser dans le circuit de refroidissement, source chaude, ce qui améliore nettement son rendement par rapport à une PAC qui puise dans l'air froid.
- **En été** : la même PAC fonctionne en climatisation, et évacue aussi la chaleur de la batterie et de l'électronique.
- **Batterie** : maintenue en permanence entre 20 et 35 °C, ce qui préserve sa capacité par grand froid et sa durée de vie.

Froid de détente du GNV : en passant de 250 bar à la pression d'alimentation, le gaz se refroidit fortement (effet Joule-Thomson, de l'ordre de 60 à 80 °C d'écart). Aujourd'hui, ce froid est une contrainte : le détendeur doit être réchauffé pour éviter le givre. Dans l'ÉREV, la boucle thermique peut l'utiliser comme une source froide : l'hiver, le détendeur est réchauffé par le circuit du Rex comme d'habitude ; l'été, il est raccordé à la boucle de climatisation et de refroidissement de la batterie. Ordre de grandeur (estimation à vérifier) : avec un débit d'environ 6–7 kg/h de méthane quand le Rex tourne, environ 0,2 à 0,4 kW de froid, soit un appoint d'environ 10 % du besoin de climatisation, gratuit et sans pièce mobile.

De nombreux BEV récents ont aussi une PAC ; ce qui est propre à l'ÉREV, c'est de disposer en plus de la chaleur du Rex comme source, ce qui supprime le point faible des PAC par grand froid.

La récupération de chaleur et la régulation thermique de la batterie limitent la perte d'autonomie par grand froid à environ −3 à −5 %, contre −25 à −35 % pour un BEV.

Maintenance et longévité

La durée de vie vient surtout de l'architecture : environ 200 démarrages à froid par an pour le Rex, contre ~800 pour un PHEV et ~1 500 pour un hybride classique (−87 %). Le reste de la maintenance est conçu pour être automatique ou très simple.

Programme « Auto-réparable » en trois niveaux (V2.2)

1. **Automatique** : auto-nettoyage de l'admission toutes les 500 h de Rex et injection d'eau micro-dosée (50–80 ml/h) ; efficace jusqu'à environ 80 000 km sans intervention.
2. **Propriétaire, 25 minutes tous les 40 000 km** : kit de nettoyage à 18–22 € et bouchon ¼ de tour fourni à l'achat.
3. **Atelier, 80 minutes tous les 120 000 km** : collecteur EGR en deux demi-coquilles à clips, au lieu de 245 minutes pour un EGR classique (−270 € de main-d'œuvre).

Autres choix qui réduisent l'entretien

- Euro 7 visé sans SCR, sans AdBlue ni réservoir d'urée (pas de gel à −11 °C) : EGR à 18–20 %, intercooler renforcé et avance d'allumage réduite de 2°, pour ~0,040–0,055 g/km de NOx (à valider sur banc).
- Pas de filtre à particules : la combustion du méthane ne produit quasiment pas de suies.
- Boîte 2 rapports simple (~300 000 km) au lieu d'une boîte automatique 8–9 rapports (180–220 000 km).

- Moteur électrique ~500 000 km, batterie LFP à moins de 20 % de dégradation à 200 000 km, réservoirs composites de 20 ans.
- **Télémétrie embarquée obligatoire** sur la V2.2 : elle surveille les organes ajoutés (turbocompound, ORC) et déclenche les interventions avant la panne.

Durée de vie estimée : 280–320 000 km pour la V2.0 et 260–300 000 km pour la V2.2, contre 180–220 000 km pour un PHEV et 200–250 000 km pour un hybride classique.

Surveillance, sécurité et données

L'ÉREV est conçu comme le seul véhicule à carburant dont les fuites sont surveillées en continu et transmises à une plateforme nationale.

- **Capteur CH_4 infrarouge (NDIR) sur la ligne commune des soupapes (PRD)** : il surveille tout le circuit haute pression depuis un seul point et détecte dès moins de 50 ppm.
- **Deux seuils d'alerte** : 500 ppm (1/100 de la LIE), notification au conducteur et au parking ; 5 000 ppm (1/10 de la LIE), coupure automatique de la vanne principale et alarme.
- **Mode parking** : surveillance maintenue 30 minutes après l'arrêt, période où une fuite peut apparaître pendant le refroidissement des réservoirs.
- **Transmission** : Bluetooth local en V2.0 ; OBD-II continu et liaison à distance (OTA) en temps réel en V2.2, vers la plateforme ICB Résilience. Chaque détection est horodatée et localisée ; des alertes répétées déclenchent une intervention du réseau de maintenance agréé.
- **Surcoût** : environ 80–120 € en série.

Ces données servent aussi la maintenance : la même télémétrie qui suit les fuites suit l'état du Rex et de ses récupérateurs.

Comparaison avec les BEV et les hybrides actuels

Au quotidien, l'ÉREV roule comme un BEV ; la différence se fait sur les grands trajets, le froid, le relief, la maintenance et le réseau.

Critère	Hybride HEV / PHEV	BEV 60–100 kWh	ÉREV V2.2 (objectifs)
Rendement thermique en usage réel	Point optimal rarement atteint ; 20–26 % réservoir → roues pour un thermique classique	Sans objet	52–55 % au point fixe en permanence ; 38–41 % gaz → roues
Trajets quotidiens	PHEV : 40–80 km électriques	100 % électrique	100–130 km électriques, même chaîne que le BEV
Récupération de chaleur	Aucune valorisation dédiée	Pas de source de chaleur propre ; chauffage pris sur la batterie, par PAC sur les modèles récents	Turbocompound, ORC, échangeur et PAC réversible utilisant la chaleur du Rex
Grand froid	Perte modérée	−25 à −35 % d'autonomie	Environ −3 %
Descente de col	Récupération limitée par une petite batterie	Partielle si la batterie est pleine	Batterie vidée en montée par anticipation GPS, descente récupérée
Démarrages à froid du moteur thermique	~800 à ~1 500 par an	Sans objet	~200 par an
Entretien	Boîte automatique, FAP ou catalyseur, vidanges	Le plus simple : peu de pièces d'usure	Auto-nettoyage, entretien propriétaire en 25 min, pas d'AdBlue ni de FAP
Surveillance	Diagnostic embarqué classique	Gestion de la batterie	Télémétrie obligatoire et capteur CH_4 continu
Effet sur le réseau électrique	Faible	Appels de puissance aux pointes	Effacement passif aux pointes, V2H
Durée de vie estimée	180–250 000 km	Dépend surtout de la batterie	260–300 000 km

Le BEV garde un avantage net : sa simplicité mécanique. En rendement, l'écart est plus faible qu'on ne le dit. Sur les 77 % de km en électrique, l'ÉREV utilise la même chaîne que le BEV, avec en plus une boîte 2 rapports qui réduit la consommation sur voie rapide (+10–15 % d'autonomie), alors que les BEV actuels n'ont qu'un rapport.

Sur les grands trajets, convertir le gaz en électricité reste moins efficace qu'une batterie chargée sur le réseau. Mais le duo thermique-électrique compense une partie de l'écart : chaleur du Rex pour l'habitacle et la batterie, descentes récupérées en totalité, pas de recharge rapide à forte puissance. Le comparatif des rendements situe le rendement annuel pondéré de l'ÉREV vers ~75 %, dans la fourchette du BEV mesurée de la centrale à la roue (65–75 %).

Coûts comparés

La V2.0 est la plus économique des ÉREV, et toutes les versions se placent nettement sous les hybrides en coût total, grâce à une petite batterie, un usage surtout électrique et une durée de vie plus longue. Chiffres de l'Annexe ÉREV V11 (hypothèses du programme, pas des prix de marché).

	Hybride HEV	PHEV	BEV 60–100 kWh	ÉREV V2.0	ÉREV V2.1	ÉREV V2.2
Prix d'achat	25–32 k€	35–50 k€	35–55 k€	~29 k€	~30 k€	~31 k€
Coût d'usage / 10 000 km	1 200–1 500 €	600–900 €	—	~396 €	~379 €	~348 €
Coût total sur 15 ans	59 750 €	67 800 €	+5 à +8 k€ vs diesel sur 200 000 km	37 448 €	37 571 €	41 998 €
Durée de vie	200–250 000 km	180–220 000 km	—	280–320 000 km	270–310 000 km	260–300 000 km

- **Entre les ÉREV** : la V2.1 coûte à peu près autant que la V2.0 (+600 € à l'achat, compensés par la consommation). La V2.2 coûte environ 4 500 € de plus sur 15 ans : son économie de carburant (~50 € par 10 000 km, un peu plus de 1 000 € sur 225 000 km) ne couvre pas le surcoût de l'ORC. Elle se justifie par le rendement et le bilan carbone, et ne s'amortit que pour les gros rouleurs (taxis, flottes).
- **Face aux autres** : prix d'achat au niveau d'un hybride simple, sous un PHEV ou un BEV, grâce à une batterie 3 à 4 fois plus petite. Le Geely Boyue EREV, vendu dès 107 900 ¥ en Chine (~15 000 $), montre que l'architecture est bon marché à grande échelle, même si ce prix n'est pas transposable en Europe.
- **Le BEV** n'est chiffré dans le corpus que par écart avec un diesel sur 200 000 km (l'ÉREV y est à −7 à −10 k€) ; il n'est donc pas directement comparable aux colonnes de l'Annexe.

Configuration recommandée : V2.1+ (V2.2 sans ORC)

La V2.1+ conserve **tous les éléments de gestion, de surveillance, d'optimisation et de maintenance de la V2.2, à l'exception de l'ORC et des éléments qui lui sont associés**. C'est l'optimum coût-rendement pour le grand public ; l'ORC reste une option pour les gros rouleurs et surtout pour le camion, où le Rex tourne beaucoup plus longtemps.

Conservé de la V2.2 :

- **Gestion de l'énergie** : Rex à point fixe piloté par l'état de charge, anticipation du relief par GPS, boîte 2 rapports, effacement passif du réseau, V2H, indicateur d'usage électrique et rappel de recharge en heures creuses.
- **Optimisation** : turbocompound électrique, injection d'eau (alimentée par la condensation des fumées et de la climatisation), revêtements thermiques, réduction des frottements, échangeur gaz/eau, PAC réversible et gestion thermique intégrée, froid de détente du GNV, freinage régénératif.
- **Surveillance** : télémétrie embarquée et liaison OTA, capteur CH_4 NDIR sur la ligne des soupapes avec ses deux seuils et son mode parking, transmission à la plateforme ICB.
- **Maintenance** : programme « Auto-réparable » en trois niveaux, maintenance prédictive par télémétrie, dépollution Euro 7 sans SCR, AdBlue ni FAP.

Retiré avec l'ORC : l'évaporateur sur l'échappement aval, le détendeur (scroll ou microturbine) et sa génératrice, le condenseur ORC, la pompe et le circuit de fluide organique, et le pilotage propre à l'ORC. On perd aussi les 4–7 kW que l'ORC réinjectait en continu, notamment en montée de col ; l'anticipation GPS, elle, est conservée.

Élément	V2.1+
Turbocompound électrique	Conservé
Injection d'eau, revêtements thermiques, réduction des frottements	Conservés
Programme « Auto-réparable », télémétrie, capteur CH_4	Conservés
PAC réversible, gestion thermique intégrée, froid de détente	Conservés
Leviers Euro 7 (EGR, intercooler, avance d'allumage)	Conservés, renforcés par l'injection d'eau
ORC (2 000–5 000 €, 15–25 kg, détendeur à entretenir tous les 80–120 000 km)	Retiré
Rendement du groupe	~49–52 % (gaz → roues ~36–39 %)
Prix d'achat visé	~30–31 k€

D'où vient le surcoût de la V2.2. L'écart avec la V2.1 (~4 400 €) ne vient pas du prix d'achat (+1 000 € seulement) ni du carburant (la V2.2 consomme moins). Il vient donc de l'entretien et des réparations d'un système plus complexe (10 points de défaillance au lieu de 5) et d'une durée de vie un peu plus courte. L'ORC en est la principale source identifiable : seul organe à pièce mobile ajouté, avec un entretien du détendeur tous les 80–120 000 km. Les autres ajouts de la V2.2 sont surtout du logiciel et des capteurs.

L'eau pour l'injection. La combustion du méthane produit 2,25 kg d'eau par kg de gaz, soit environ 14–15 kg/h quand le Rex consomme ~6,5 kg/h. L'injection en demande beaucoup moins : 50–80 ml/h pour l'auto-nettoyage, et de l'ordre de 0,7 à 3 kg/h si l'on vise aussi le rendement et les NOx (10 à 50 % de la masse de carburant, à préciser sur banc), soit 4 à 22 % de l'eau produite. Un petit condenseur après l'échangeur, refroidissant les fumées sous leur point de rosée (~55 °C), suffit toute l'année, et encore plus facilement en hiver. L'été, l'eau de condensation de la climatisation s'y ajoute. Cette eau est quasiment distillée, mais légèrement acide (CO_2, traces de NOx) : il faut une petite cartouche de neutralisation et de filtration, et un réservoir tampon de quelques litres. Le conducteur n'a alors aucune eau à remplir.

Points à démontrer

La V2.2 est un véhicule de 2030–2032 : ses gains reposent sur des mécanismes établis, mais leurs valeurs restent à mesurer sur banc en Phase 0. La V2.0 et la V2.1 forment le cœur de la cible grand public (la V2.0 a 4 points de défaillance et le coût total de possession le plus bas) ; la V2.2 représente la limite haute d'optimisation, pour les usages intensifs et les grands rouleurs, car l'ORC reste un défi d'intégration et de coût à l'échelle d'un Rex de 30–40 kW.

À démontrer :

- la valeur de chaque gain (turbocompound, ORC) sur un Rex de 1,2–1,5 L au méthane, et leur tenue une fois cumulés ;
- Euro 7 sans SCR ni AdBlue ;
- la masse (15–25 kg) et le coût (2 000–5 000 €) de l'ORC embarqué ;
- le programme « Auto-réparable », dont le niveau 2 est encore une conception à valider.

Sources : Annexe ÉREV V11 (V4, octobre 2026) ; EREV_Rendements_Comparatif_V5 ; page voiture-erev.html du site resilience2045.fr.