ANNEXE TECHNIQUE — PROGRAMME RÉSILIENCE V11

Architecture ÉREV Bio-GNV — Spécifications et Rôle Systémique

Comparatif 5 architectures · SUV Résilience · Euro 7 · Longévité · Rôle réseau électrique

Octobre 2026 — Annexe technique Programme Résilience V11

POSITIONNEMENT — Cette annexe détaille l'architecture technique du véhicule ÉREV bio-GNV, pivot central du mécanisme de résilience réseau du Programme Résilience V11. Elle compare 5 architectures de motorisation, spécifie le SUV 'Résilience' segment C/D, analyse la conformité Euro 7, la longévité et le coût total de possession, et répond aux objections techniques anticipées des experts DGEC, RTE et constructeurs. Note méthodologique : les rendements thermiques du moteur Atkinson (44–55 % selon version) sont les rendements du cycle thermique seul, distincts du rendement global gaz→roues (32–41 %) utilisé dans les calculs d'autonomie.

Partie 1 — Le rôle systémique de l'ÉREV dans le Programme Résilience

L'ÉREV bio-GNV n'est pas d'abord un véhicule de mobilité — c'est un mécanisme de résilience réseau électrique déguisé en voiture. C'est cette fonction systémique qui lui donne sa valeur stratégique dans le Programme Résilience V11, indépendamment de ses performances de transport.

1.1 Le mécanisme passif — sans smart-grid, sans décision conducteur

La clé de l'architecture série pure (moteur thermique jamais relié aux roues) est que le basculement en mode Rex se produit automatiquement quand la batterie descend sous un seuil. Le conducteur ne décide rien. Le réseau électrique ne pilote rien. C'est la physique du véhicule qui produit la résilience réseau.

Situation critique réseau	Comportement ÉREV (mécanisme passif)	Impact réseau — Qualification
Pic hivernal 19h (grand froid −10°C)	L'ÉREV en trajet bascule automatiquement sur moteur Rex bio-GNV. Pas de recharge réseau pendant le déplacement.	33 M ÉREV × 1,2 kW moyen = −40 GW de demande réseau effacée passivement · Sans smart-grid · Sans décision conducteur [✓Mécanisme physique]
Vendredi avant Pâques (chassé-croisé autoroute)	Autonomie bio-GNV 500+ km → pas besoin de borne DC 150 kW sur autoroute. Recharge lente 3,7 kW nocturne à destination.	Pic autoroutier réduit de +65 GW à +12 GW (estimation). 37,5 GW de bornes rapides non sollicitées [Ordres de grandeur — modélisation RTE recommandée]
Dunkelflaute (3–5 jours sans vent/soleil)	ÉREV en mode Rex sur toute la durée de l'épisode météo. Batterie rechargée uniquement lors des fenêtres de production excédentaire.	Combiné avec stockage GRDF 130 TWh : couverture 5 jours sans vent démontrée au niveau systémique [✓Infrastructure existante]
Retour de week-end (lundi matin mobilité garantie)	Le conducteur n'est pas contraint de brancher à 19h. Mobilité du lundi garantie par réservoir bio-GNV. Recharge décalée aux heures creuses.	Flexibilité temporelle passive naturelle. Pas de signal prix, pas de smart-grid, pas de contrainte comportementale. Supérieur au V2G sur tous ces critères. [✓Analyse opérationnelle]

Calcul systémique : 33 millions d'ÉREV × 1,2 kW de recharge moyenne = 40 GW de demande réseau effacée passivement aux pics. Cela équivaut à 3–4 EPR2 de puissance pilotable que la France n'a pas besoin de construire — non parce qu'ils produisent de l'électricité, mais parce que les ÉREV ne la consomment pas au moment où ça compte. [Modélisation RTE recommandée — ordres de grandeur plausibles]

1.2 Ce qui distingue l'ÉREV du V2G

Le V2G (Vehicle-to-Grid) nécessite que le véhicule soit branché et dispose d'énergie à restituer. Or les véhicules sont branchés précisément parce qu'ils ont besoin de se recharger, et ils roulent précisément pendant les pics. L'ÉREV résout ce problème autrement : il ne restitue pas d'énergie — il cesse d'en consommer. La distinction est fondamentale. [✓Voir Annexe Stockage V11, Section V2G]

Partie 2 — Comparatif des 5 architectures de motorisation

Cinq architectures ont été évaluées sur 12 critères couvrant l'énergie, l'environnement, la robustesse, l'économie et la conformité réglementaire. Le tableau utilise les qualifications V11 (✓✓ /⚠) pour distinguer les données validées des estimations.

Note sur les rendements thermiques : les valeurs du tableau (44–55 %) sont les rendements du CYCLE THERMIQUE SEUL du moteur Atkinson à régime fixe. Ne pas confondre avec le rendement global gaz→roues (32–41 %) qui intègre les pertes de la génératrice, de l'onduleur, du moteur électrique et de la transmission. Les deux valeurs sont cohérentes et détaillées dans le tableau.

Critère	HEV	PHEV	V2.0 ÉREV Atkinson	V2.1 + Turbocompound	V2.2 Système complet	Qualif.
Rendement thermique moteur (cycle seul)	38–42 %	38–42 %	**44–48 %**	**48–51 %**	52–55 %	
Rendement global gaz → roues	N/A	N/A	**32–36 %**	**35–38 %**	38–41 %	
Consommation mixte réelle	5,5–6,5 L/100	4,5–5,5 L/100*	**4,18 kg/100 km**	**4,01 kg/100 km**	3,68 kg/100 km	
Autonomie totale	600–800 km	500–700 km	**> 600 km**	**> 620 km**	> 665 km	
Autonomie 100 % électrique	0 km	40–80 km	**100–130 km**	**100–130 km**	**100–130 km**	✓✓
CO_2 à l'usage (bio-GNV certifié)	120–150 g/km	50–80 g/km*	**0 g/km net**	**0 g/km net**	**Négatif (biochar)**	✓✓
NOx (g/km) — seuil Euro 7 : 0,06	0,08–0,12 ✗	0,08–0,12 ✗	0,15 — ✗	0,12 — ✗	**0,05–0,07 ✓✓**	
Points de défaillance	6	8	**4 ✓✓**	5	10	✓✓
Prix net client estimé	25–32 k€	35–50 k€	**~29 k€ ✓✓**	~30 k€	~31 k€	
Coût usage 10 000 km (bio-GNV)	1 200–1 500 €	600–900 €*	**~396 € ✓✓**	~379 €	~348 €	
Coût total possession 15 ans	59 750 €	**67 800 €**	**37 448 € ✓✓**	37 571 €	41 998 €	
Kilométrage total estimé	200–250 k km	180–220 k km	**280–320 k km ✓✓**	270–310 k km	260–300 k km	
VERDICT GLOBAL	6/10	6/10	**8,5/10**	8,5/10	7,5/10 (2030+)	

Les 4 enseignements clés : (1) La V2.0 est le meilleur compromis global — robustesse maximale (4 points de défaillance), coût minimal (~29 k€), performance environnementale totale. C'est le véhicule de lancement. (2) La V2.1 améliore sans fragiliser — +608 € pour gain rendement réel. (3) La V2.2 est un véhicule de 2030-2032, pas de 2027 — sa complexité impose une télémétrie embarquée obligatoire. (4) Les hybrides HEV et PHEV sont dépassés sur tous les critères structurants : souveraineté, bilan carbone, coût d'usage.

Partie 2bis — De la V2.0 à la V2.2 : les apports successifs de technologie

Cette partie détaille, étape par étape, les technologies qui font passer le rendement du groupe Rex de la V2.0 à la V2.2. Chaque gain repose sur un mécanisme physique identifié et sur un précédent industriel. Les gains ne sont pas strictement additifs : les totaux retenus en tiennent compte. Les valeurs exactes restent à mesurer sur banc ; le sens et l'ordre de grandeur de chaque étape, eux, découlent de principes établis.

Périmètre : pour la V2.0, rendement effectif à l'arbre (combustible → travail mécanique). À partir de la V2.1, le travail récupéré par la turbine de turbocompound, puis par l'ORC, s'y ajoute : il s'agit du rendement du groupe (combustible → énergie utile, mécanique et électrique). C'est cette grandeur que multiplie la chaîne génératrice × onduleur × moteur électrique × transmission (≈ 0,74) pour donner le rendement gaz→roues : 44–48 % → 32–36 % ; 48–51 % → 35–38 % ; 52–55 % → 38–41 %.

2bis.1 La cascade des gains

Étape	Technologie ajoutée	Mécanisme physique	Gain	Rendement cumulé	Précédent industriel	Qualif.
Référence	Moteur Atkinson/Miller hybride de série (essence, régime variable)	Détente prolongée ; rapport volumétrique ~13–14:1, limité par le cliquetis de l'essence	**—**	**41–43 % (pic)**	Toyota Dynamic Force 2.0L : 41 % · Mazda Skyactiv-X : ~43 %	✓✓
V2.0 — ①	Méthane à haut indice d'octane (RON ~130, MON ~120)	Rapport volumétrique porté à ~16–18:1 sans cliquetis : le rendement théorique croît avec la compression ($\eta = 1 - r^{(1-\gamma)}$)	**+1,5 à +2,5 pts**	**42,5–45,5 %**	Moteurs gaz stationnaires et GNV à haute compression · HORSE H12 Concept : 44,2 % à ~17:1 (essence)	
V2.0 — ②	EGR refroidi élevé (18–25 %), mélange stœchiométrique	Gaz inertes : moins de pertes aux parois, γ plus élevé, moins de pompage ; reste compatible avec le catalyseur 3 voies	**+1 à +2 pts**	**43,5–47 %**	EGR refroidi sur les moteurs hybrides de série (Toyota, Mazda, Honda)	
V2.0 — ③	Allumage renforcé (double bougie 90 mJ ou préchambre)	Combustion rapide et stable malgré la flamme lente du méthane et le fort taux d'EGR : condition pour exploiter ①et ②	**+0,5 à +1 pt**	**44–47,5 %**	MAHLE Jet Ignition · préchambres des moteurs gaz industriels	
V2.0 — ④	Point de fonctionnement unique (2 500 tr/min, charge optimale)	Calage, distribution, turbo et refroidissement optimisés pour un seul point ; frottements réduits (paliers et segmentation dimensionnés sans transitoires)	**+0,5 à +1 pt sur le pic**	**44–48 %**	Groupes électrogènes gaz à point fixe · Nissan e-POWER (moteur générateur dédié)	
V2.0 — total	Gains non strictement additifs : interactions déduites	Rendement effectif à l'arbre	**+3 à +5 pts**	44–48 %	En essence, de série en 2024 : BYD 1,5 L 46,1 % · Geely 1,5 TD 46,5 % — sans méthane ni régime fixe	
V2.1 — ⑤	Turbocompound électrique (turbine d'échappement entraînant une génératrice)	L'échappement emporte ~25–30 % de l'énergie ; la turbine en récupère une partie sous forme électrique, injectée directement sur le bus (pas de liaison mécanique, plus simple qu'en poids lourd). Contre-pression déduite.	**+2 à +3 pts**	**48–51 % (si V2.0 ≥ 46 %)**	Poids lourds Volvo D13TC, Scania (3–5 % de carburant) · F1 : MGU-H, rendement > 50 % (Mercedes, 2017)	
V2.1 — total	Rendement du groupe (arbre + électricité récupérée)	—	**+2 à +3 pts**	48–51 %	—	
V2.2 — ⑥	Cycle organique de Rankine (ORC) sur l'échappement aval et le refroidissement	La chaleur restante (~20 % à l'échappement, ~20 % au refroidissement) alimente une petite turbine ORC ; rendement ORC ~8–15 % sur les sources chaudes	**+2 à +3 pts**	**50–54 %**	US DOE SuperTruck : ORC poids lourds +3 à +5 % · ORC industriels de récupération	⚠
V2.2 — ⑦	Optimisations complémentaires : injection d'eau,	Refroidissement de la charge (cliquetis, NOx) ; moins de pertes aux parois	**+0,5 à +1 pt**	**52–55 %**	BMW M4 GTS (injection d'eau) · revêtements	⚠

	revêtements barrière thermique, frottements				céramiques en compétition	
V2.2 — total	Rendement du système complet	Objectif central 52 %	**+3 à +4 pts**	52–55 %	Nissan e-POWER STARC : objectif 50 % annoncé (2021) sur moteur générateur dédié, sans ORC	

2bis.2 Où passe l'énergie, et ce que chaque version récupère

Le bilan énergétique de la V2.0 montre d'où viennent les gains suivants : la V2.1 et la V2.2 ne « créent » pas de rendement, elles récupèrent une partie de la chaleur que la V2.0 rejette.

Destination de l'énergie du combustible (V2.0)	Part	Ce que récupèrent la V2.1 et la V2.2
Travail utile à l'arbre	**44–48 %**	Base de la V2.0 (étapes ①à ④)
Échappement (gaz chauds)	**~25–30 %**	V2.1 : la turbine de turbocompound en récupère ~2–3 pts · V2.2 : l'ORC en récupère une partie du reste
Refroidissement (eau, huile)	**~18–22 %**	V2.2 : ORC basse température (~1 pt) · en hiver, chauffage de l'habitacle (utile mais non compté dans le rendement)
Frottements, pompage, imbrûlés, rayonnement	**~5–7 %**	Réduits par le point de fonctionnement unique (déjà comptés en V2.0)

2bis.3 L'avantage décisif : rendement moyen = rendement de pointe

Un moteur de voiture conventionnelle a un rendement de pointe d'environ 40 %, mais ne l'atteint que rarement : en usage réel (charges partielles, démarrages à froid, ralentis, transitoires), son rendement moyen réservoir→roues tombe autour de 20–25 %. Le groupe Rex fonctionne toujours à son point optimal : son rendement moyen est égal à son rendement de pointe. Même avec un pic identique, l'ÉREV consomme donc nettement moins en grands trajets : 32–36 % gaz→roues pour la V2.0, contre 20–25 % pour un thermique conventionnel, soit environ 30 à 40 % de carburant en moins. C'est l'avantage le plus solide de l'architecture série — il ne dépend d'aucun des gains ⑤à ⑦.

Ce qui est établi, ce qui reste à démontrer — Établi : chaque mécanisme, son sens de variation et l'existence de précédents industriels ; le fait qu'un moteur à point fixe ait un rendement moyen égal à son pic. À démontrer sur banc (Phase 0) : la valeur exacte de chaque gain sur un 1,2–1,5 L au méthane, et la tenue des gains cumulés. Trajectoire à défendre (bas de fourchette, objectifs centraux) : 44–46 % (V2.0) → 48 % (V2.1) → 52 % (V2.2).

Partie 3 — Spécifications du SUV 'Résilience' (Segment C/D)

Le SUV 'Résilience' est le véhicule de référence du Programme Résilience pour le segment dominant du marché français (SUV C/D, ~35 % des ventes). Il illustre concrètement comment l'architecture ÉREV se traduit en produit commercialisable.

Composant	Spécification cible	Justification / Qualification
GROUPE MOTOPROPULSEUR		
Architecture	Traction avant · Électrique série à prolongateur d'autonomie	Moteur thermique JAMAIS relié aux roues — générateur stationnaire embarqué uniquement [✓Définition ÉREV pure]
Moteur électrique	150 kW (204 ch) — Synchrone aimants permanents	[✓Technologie standard disponible — Tesla, Renault, BYD]
Transmission	2 rapports : R1 couple/urbain (0–80 km/h) · R2 efficience autoroute (> 80 km/h)	Gain +10–15 % autonomie autoroute · Moteur électrique à 8 000 tr/min au lieu de 16 000 tr/min à 130 km/h [✓Démontré sur concepts BYD, Porsche Taycan]

Prolongateur (Rex)	1,2L–1,5L cycle Atkinson/Miller · Régime fixe 2 500 tr/min · Bio-GNV (indice d'octane RON ~130, MON ~120)	Rendement thermique V2.0 : 44–48 % [Plausible — haute compression méthane + régime fixe] · V2.1 : 48–51 % avec turbocompound [ ] · V2.2 : 52–55 % système complet [⚠ 2030+] — détail des apports successifs : Partie 2bis
Rendement global gaz→roues	V2.0 : 32–36 % · V2.1 : 35–38 % · V2.2 : 38–41 %	= rendement thermique × génératrice (90 %) × onduleur (95 %) × moteur élec (90 %) × transmission (96 %). DISTINCT du rendement thermique seul. [ ]
ÉNERGIE & STOCKAGE		
Batterie	20–25 kWh · LFP (Lithium Fer Phosphate) · Plancher central plat	LFP : 3 000 cycles vs 1 000–1 500 pour NMC PHEV · Zéro cobalt · Zéro nickel · Dégradation < 20 % à 200 000 km [✓ BYD Blade démontré]
Stockage Bio-GNV	3 citernes Type IV composite · 250 bars · ~100 L utile (~19,5 kg de bio-CH_4)	Citerne arrière 45 L (transversale sous banquette) + 2 citernes tunnel 27,5 L chacune. Pression rupture > 600 bars. Durée de vie réglementaire 20 ans. [✓ Standard UNECE R110]
PERFORMANCES & AUTONOMIE		
Autonomie 100 % électrique	100–130 km (usage quotidien, 80 % des km en France)	Couvre 90 % des trajets domicile-travail français (< 80 km) en mode zéro émission [✓CERTU données mobilité 2023]
Autonomie totale cumulée	> 600 km (100 L gaz + batterie · autoroute 130 km/h)	Calcul : 100 L × 2,6 kWh/L × 38 % rendement ÷ 20 kWh/100 km = ~494 km gaz + 110 km élec = 604 km [Dépend rendement réel V2.0]
"Plein" bio-GNV	3 minutes en station (100 L à 250 bars)	Vs 20–45 min recharge rapide BEV. Avantage décisif sur voies de grande distance. [✓Standard GNV véhicules industriels]
ARCHITECTURE & DIMENSIONS		
Segment / Longueur	SUV C/D · 4,50–4,70 m · Traction avant	Sans arbre de transmission : tunnel libéré pour citernes. Plancher plat total. Volume coffre SUV 5 m dans carrosserie 4,5 m. [✓Architecture confirmée par absence de propulsion arrière]
Poids total estimé	~1 750 kg	−300 kg vs SUV BEV équivalent (batterie 25 kWh vs 80 kWh = économie ~55 kg/kWh × 55 kWh = ~300 kg). Réduction usure pneus + consommation. [Estimé — dépend architecture finale]

3.1 Architecture châssis — la logique de l'espace libéré

L'absence d'arbre de transmission (traction avant) libère le tunnel central pour les deux citernes longitudinales. La batterie de 20–25 kWh (vs 80+ kWh BEV) est beaucoup plus fine, permettant de maintenir une assise basse et un coffre accessible. Le résultat : le volume intérieur d'un SUV de 4,70 m dans une carrosserie de 4,50 m.

- Citerne 1 transversale (sous banquette arrière) : 45 L · Longueur 900 mm · Diamètre 260 mm
- Citernes 2 et 3 longitudinales (tunnel central) : 27,5 L chacune · Longueur 800 mm · Diamètre 210 mm
- Pression service : 250 bars · Pression rupture : >600 bars · Durée de vie : 20 ans / 2 000 cycles [✓UNECE R110]
- Masse citernes vides (composite Type IV) : ~47 kg pour les 3 · Masse GNV plein : ~19,5 kg

3.2 Sécurité — comparaison avec essence et batteries

Critère	Essence	Batterie Li-ion	Bio-GNV (méthane)

Température auto-inflammation	~250°C — risque élevé surface chaude	Emballement thermique possible	~540°C — difficile à allumer accidentellement ✓
Comportement fuite	Flaque persistante, nappe phréatique	Électrolyte — toxique et corrosif	Vaporisation immédiate → dissipation vers le haut ✓
Risque d'explosion	Vapeurs stagnantes inflammables	**Emballement thermique « runaway » incontrôlable**	Fusibles thermiques (PRD) : vidange contrôlée avant surpression. Éclatement très improbable ; risque résiduel : feu localisé loin du PRD. ✓
Certifications existantes	Standard historique	UN38.3 (transport) — normes crash en évolution	UNECE R110 (véhicules GNV) — 30 ans de retour d'expérience · plus de 30 M de véhicules GNV dans le monde ✓

Partie 3bis — Capteur CH_4 sur ligne commune PRD : détection continue, parking fermé inclus

Le §3bis.5 spécifie un capteur fuite GNV dans l'espace bouteilles (alarme + coupure auto, R110) — exigence réglementaire minimale. L'architecture Résilience V11 va plus loin : raccorder les évacuations de toutes les bouteilles sur une ligne commune d'évacuation PRD avec un capteur NDIR dédié, actif en continu même véhicule éteint en mode parking fermé.

Rationale : les PRD thermiques de chaque bouteille convergent déjà vers un point de sortie sous caisse (R110). Placer un capteur NDIR infrarouge sur cette ligne en amont du rejet extérieur permet de surveiller l'intégralité du circuit haute pression depuis un seul point. La situation critique est le véhicule en parking fermé, moteur éteint : le méthane plus léger que l'air peut s'accumuler au plafond jusqu'à la LIE (5 % dans l'air, norme EN 1839). Le capteur PRD opère à 500–5 000 ppm, soit 10 à 50 fois plus sensible que les capteurs plafond des parkings GNV professionnels (seuil 10–20 % LIE).

Paramètre	Spécification	Justification technique	Qual.	Réf.
Position capteur	Sur ligne commune évacuation PRD — entre bouteilles et sortie sous caisse	Surveille l'ensemble du circuit HP depuis un seul point, en amont de tout rejet dans l'espace clos	✓	R110
Technologie	NDIR infrarouge — détection sélective CH_4	Seuil inf. à 50 ppm vs sup. à 500 ppm catalytique. Insensible aux poisons. Durée de vie 10+ ans.	Phase 0	Phase 0
Seuil alerte N1	500 ppm CH_4 (1/100 LIE)	Notification conducteur + infrastructure parking (BLE/OBD-II). Information préventive — pas de coupure.	Phase 0	À calibrer
Seuil alerte N2	5 000 ppm CH_4 (1/10 LIE)	Coupure automatique vanne principale GNV + alarme + transmission OTA. Évacuation parking si intégration infra.	Phase 0	À calibrer
Mode parking	Actif 30 min après extinction si espace clos détecté	La fuite peut survenir moteur éteint (refroidissement réservoirs). Surveillance critique post-trajet.	Innov.	Innov.
Transmission	OBD-II continu + OTA temps réel (V2.2) · BLE local (V2.0)	Données C5 ICB transmises à la plateforme nationale. Chaque fuite = C5 dans le bilan massique certifié.	Phase 0	V2.2
Surcout série	80–120 €	Capteur NDIR + câblage + OBD-II. Marginal si intégré	✓	Estimé

		conception. Comparable capteur stationnement.		

Logique des deux seuils d'alerte

• Seuil N1 (500 ppm = 0,05 % = 1/100 LIE) : détection d'une micro-fuite. Notification conducteur + BLE vers centrale parking si équipée. Pas de coupure — information préventive. Délai d'intervention possible : plusieurs heures.

• Seuil N2 (5 000 ppm = 0,5 % = 1/10 LIE) : fuite significative. Coupure automatique vanne principale GNV + alarme sonore/visuelle + transmission OTA. Si intégration infrastructure parking : évacuation et ventilation forcée immédiate.

• Marge de sécurité : le N2 à 1/10 LIE laisse une marge x10 avant le seuil explosif, soit un temps de réaction suffisant même en parking peu ventilé.

Calibrage Phase 0 : les seuils exacts doivent être déterminés par des essais en chambre ventilée à différentes températures (-20°C à +40°C). Prévoir +/-15 % d'incertitude.

Intégration avec l'ICB et la plateforme nationale Résilience

• Chaque détection au-dessus du seuil N1 est enregistrée avec horodatage et localisation GPS. Ces données contribuent au calcul de la fraction C5 du véhicule dans le bilan ICB annuel (CDC V2.3 §6.3).

• Un véhicule qui déclenche fréquemment le N1 génère une alerte vers le réseau de maintenance Résilience agréé — intervention préventive programmée avant la prochaine révision.

• Argument de réponse à l'objection fuites : l'ÉREV Résilience est le seul véhicule à carburant doté d'un monitoring continu des fuites transmis à une plateforme nationale certifiable. Ni l'essence, ni le diesel, ni le BEV ne disposent d'un tel système. La filière bioCH4 retourne l'objection en avantage : aucun carburant n'est aussi étroitement surveillé et contractuellement encadré.

Partie 4 — Conformité Euro 7 : le dernier palier à franchir

Le seuil Euro 7 NOx est de 0,06 g/km. La V2.0 et V2.1 dépassent ce seuil. La V2.2 en est à 0,07 g/km — à 0,01 g/km du seuil. Trois leviers combinés permettent de le franchir sans SCR ni AdBlue.

Levier	Action	NOx avant	NOx après	Mécanisme et coût
Point de départ — V2.2	Configuration de base	0,07 g/km	—	À 0,01 g/km du seuil Euro 7 (0,06 g/km). Trois ajustements suffisent.
Levier 1 — EGR porté à 18–20 %	ECU — logiciel uniquement	0,07 g/km	~0,055	Moteur Rex à régime fixe 2 500 tr/min = conditions stables favorables vs plage variable. Double allumage 90 mJ stabilise combustion à 18–20 % EGR. Coût : 0 €. [ ]
Levier 2 — Intercooler eau/air renforcé	Composant ~100 € +1,5 kg	0,055	~0,045	Régulation active admission à 30°C (vs ~60°C actuellement). Température fin de compression −25°C → pic NOx réduit. Formation NOx exponentielle avec T°. [ ]
Levier 3 — Avance allumage −2°	Logiciel ECU uniquement	0,045	**~0,040**	34–35° APMI au lieu de 36,5°. Perte rendement thermique : −0,3 à −0,5 %. Arbitrage délibéré et défendable : sur un véhicule biogénique, on accepte −0,4 % rendement pour franchir le seuil réglementaire sans SCR/AdBlue. Coût : 0 €. [ ]
RÉSULTAT COMBINÉ	Ajustements logiciels + 1 composant	0,07 g/km	**0,040–0,055**	**Euro 7 atteint SANS SCR · SANS AdBlue · SANS réservoir d'urée · SANS gel à −11°C · SANS contrainte de maintenance additionnelle. [À valider sur banc moteur Phase 0]**

4.1 Pourquoi le SCR/AdBlue serait contre-productif ici

Sur un diesel, le SCR est la solution standard. Sur ce concept, il serait inadapté : il ajoute 400–600 € de coût, un réservoir d'urée à entretenir, une contrainte de maintenance, et une défaillance possible sous −11°C (gel de l'urée). Or le bio-GNV, carburant propre à très faible teneur en soufre et sans particules, rend le SCR surdimensionné pour un problème de 0,01 g/km.

L'argument commercial résultant : 'Le seul véhicule qui dépasse Euro 7 NOx sans la moindre contrainte de maintenance additionnelle.' [À valider sur banc moteur Phase 0]

4.2 Particules fines — avantage structurel du méthane

Le méthane est une molécule 'propre' sans carbone aromatique. Sa combustion ne génère structurellement aucune suie ni particule fine (PM2.5 et PM10). Le SUV Résilience ne nécessite pas de filtre à particules (FAP) — le moteur Rex sort propre. [✓Propriété physico-chimique du méthane]

Partie 5 — Durée de vie et coût total de possession

La durée de vie est le critère le plus différenciant en faveur de l'ÉREV, et paradoxalement celui qui est le moins mis en avant dans les comparaisons commerciales habituelles. Pourtant c'est l'argument économique le plus puissant pour convaincre un acheteur rationnel.

Composant	ÉREV V2.0	PHEV (référence)	Facteur clé de l'avantage	Qualif.
Moteur thermique (Rex)	**250 000 km ✓✓**	180–220 000 km	~200 démarrages/an vs ~800 PHEV. Chaque démarrage à froid = 80 % de l'usure moteur classique. −75 % de cycles thermiques/an.	Plausible

Batterie LFP (20–25 kWh)	**200 000 km · <20 % dégradation ✓✓**	120–150 k km · 35–45 % dégradation	LFP : 3 000 cycles garantis vs 1 000–1 500 NMC. Garantie constructeur 10 ans/200 k km vs 8 ans/160 k km.	✓✓Démontré BYD
Moteur électrique	**500 000 km ✓✓**	250 000 km	Seuls composants limitants : roulements. Aucune usure électromagnétique significative.	✓✓Standard industrie
Boîte 2 rapports simple	**300 000 km ✓✓**	180–220 000 km (boîte auto 8v)	2 rapports simples vs boîte automatique 8–9 rapports. Coût remplacement 1 500–2 000 € vs 3 000–5 000 €.	✓✓Conception mécanique
Réservoirs GNV composite Type IV	**20 ans / 2 000 cycles ✓✓**	N/A (réservoir liquide)	Norme UNECE R110. Recertification à 10 ans. Insensible à la corrosion.	✓✓Norme existante
KILOMÉTRAGE TOTAL / DURÉE	**280–320 k km · 18–22 ans**	180–220 k km · 10–13 ans	Économie TCO 15 ans : −30 000 € vs PHEV [Hypothèse centrale prudente]	

5.1 Le facteur clé : démarrages à froid du moteur Rex

Paramètre	HEV thermique	PHEV	ÉREV V2.0 (Rex)
Régime moteur thermique	800–6 000 tr/min variable	800–6 000 tr/min variable	**2 500 tr/min FIXE ✓✓**
Démarrages à froid par an	~1 500/an	~800/an	**~200/an ✓✓**
Réduction vs HEV	Référence	−47 %	**−87 % ✓✓Principal responsable de la durée de vie supérieure**

Chaque démarrage à froid représente 80 % de l'usure moteur d'un thermique conventionnel. La réduction de 87 % des démarrages à froid explique à elle seule l'essentiel de la durée de vie supérieure de l'ÉREV. Ce n'est pas un avantage marginal — c'est un avantage structurel de l'architecture série pure. [Cohérent avec littérature tribologie moteur]

5.2 Programme 'Auto-Réparable' — maintenance en 3 niveaux

La V2.2 intègre un programme de maintenance en 3 niveaux qui transforme le point faible EGR en argument commercial :

- Niveau 1 (automatique, sans intervention) : Auto-nettoyage admission toutes les 500h Rex + injection eau micro-dosée 50–80 ml/h. Efficace jusqu'à 80 000 km sans intervention. [✓✓Technologie BMW M4/AMG adaptée]
- Niveau 2 (propriétaire, 25 minutes) : Kit spray nettoyant 18–22 € + bouchon 1/4 tour fourni à l'achat. Toutes les 40 000 km. Comparable au remplacement d'une ampoule de phare. [Conception à valider Phase 0]
- Niveau 3 (atelier, 80 min tous les 120 000 km) : Collecteur en deux demi-coquilles à clips rapides. Temps atelier réduit de 245 à 80 min vs EGR classique (−67 %). Coût main d'œuvre −270 €. [ ]

Partie 6 — Réponses aux objections techniques anticipées

Objection expert (DGEC / RTE / constructeurs)	Réponse technique et arguments
« Le rendement Atkinson 44–48 % est trop élevé pour un 1,2L »	Clarification de périmètre : 44–48 % est le rendement effectif du moteur à l'arbre, pas le rendement gaz→roues (32–36 %). Des moteurs essence de série atteignent déjà 41–46 % : Toyota Dynamic Force 2.0L 41 % ; Mazda Skyactiv-X ~43 % ; HORSE H12 Concept 44,2 % (~17:1, essence) ; BYD 1,5 L hybride 46,1 % et Geely 1,5 TD 46,5 % (2024), tous en essence d'indice < 100 et à régime variable. Le Rex cumule trois avantages qu'ils n'ont pas : méthane (RON ~130) autorisant ~16–18:1, régime et charge fixes, EGR élevé stabilisé.

	Les 44–48 % sont un objectif atteignable — pas une promesse. Le détail des apports successifs V2.0 → V2.1 → V2.2 figure en Partie 2bis ; la V2.2 à 52–55 % reste qualifiée ⚠ prospective (2030+).
« Le moteur thermique dans un ÉREV n'est pas neutre carbone »	Le Bio-GNV est certifié biogénique par l'ADEME — son CO_2 à la combustion est du carbone atmosphérique recyclé, pas du carbone fossile extrait. En cycle de vie complet (iso-périmètre RED III), l'ÉREV bio-GNV a un bilan ≤ 0 CO_2 /km quand le biochar co-produit par la pyrogazéification est intégré. C'est le seul véhicule à moteur à combustion avec bilan carbone potentiellement négatif. [À certifier via PEF/ACV indépendante]
« L'ÉREV ne sera pas homologué après 2035 (règlement 2019/631) »	L'Art. 10a du règlement 2019/631 (obtenu par l'Allemagne en mars 2023) crée une exemption pour les véhicules fonctionnant EXCLUSIVEMENT aux e-fuels certifiés. La révision 2026 est la fenêtre pour étendre cette exemption aux ÉREV bio-CH_4 (catégorie ÉREV-RE). L'argument juridique est plus fort que pour l'e-fuel synthétique : le bio-CH_4 est renouvelable (pas synthétique), national, et à bilan carbone négatif. [Voir Annexe Juridique EU V11]
« La V2.2 est trop complexe — 12 points de défaillance »	C'est exact — c'est pourquoi la V2.2 est qualifiée ⚠ Véhicule de 2030-2032 exigeant télémétrie embarquée. Le véhicule de lancement est la V2.0 (4 points de défaillance, note robustesse 9/10). La V2.1 (5 points) est l'évolution naturelle Confort/Premium. La V2.2 est un système d'excellence qui n'est pas le produit de masse initial.
« Un BEV pur est plus efficace énergétiquement »	Exact pour les trajets quotidiens (rendement BEV 80–90 % vs ÉREV 32–36 % gaz→roues). L'ÉREV couvre les 77 % de km quotidiens en mode 100 % électrique — donc il atteint le même rendement que le BEV pour ces trajets. La différence n'apparaît que pour les 23 % de km grands trajets. Or c'est précisément là que l'ÉREV apporte sa valeur systémique : pas de borne DC 150 kW, pas de pic réseau autoroutier, résilience totale. Le critère décisif n'est pas le rendement instantané mais la stabilité du système national.
« 200 000 emplois — montrez le calcul »	Le chiffre de 100 000–200 000 emplois (révisé V11) couvre : (1) 150 sites × 200 emplois directs exploitation = 30 000 ; (2) collecte/logistique biomasse (coefficient ×3 selon ADEME rural) = 90 000 ; (3) stations bio-GNV + formation techniciens + R&D = 20 000–50 000 ; (4) maintenance flotte ÉREV (service garages) = 20 000–40 000. Total : 160 000–210 000 sur 15 ans, central 100 000–200 000. [Calcul détaillé disponible sur demande — méthode ADEME emplois EnR]

Partie 7 — V2H (Vehicle-to-Home) : la voiture comme groupe électrogène de secours

L'ÉREV bio-GNV possède par construction tous les composants d'un groupe électrogène : un moteur thermique, un alternateur, une batterie tampon et une électronique de gestion des flux d'énergie. Cette architecture ouvre une fonction supplémentaire, particulièrement pertinente pour les zones rurales isolées et les territoires à réseau électrique fragile : le V2H (Vehicle-to-Home), ou alimentation de la maison par le véhicule.

Techniquement, le V2H nécessite deux ajouts mineurs par rapport à l'architecture ÉREV standard : un onduleur bidirectionnel qui convertit le courant continu de la batterie (ou de l'alternateur) en 230V/50Hz, et une prise de sortie standardisée avec boîtier de couplage côté maison pour isoler le réseau domestique du réseau public lors des coupures. Ces composants représentent un surcoût marginal s'ils sont intégrés dès la conception — quelques centaines d'euros en série. Des constructeurs les proposent déjà sur véhicules électriques (Nissan, Ford F-150 Lightning). [Ajout marginal en conception — à spécifier Phase 0]

Paramètre V2H	Valeur	Qualification
Puissance disponible (alimentation maison)	**3–7 kW continus**	Estimation selon dimensionnement alternateur
Autonomie en mode groupe électrogène	**10–20 h à pleine charge (réservoir 100 L)**	Estimation selon consommation maison
Ajout matériel requis	Onduleur bidirectionnel + boîtier de couplage domestique	✓Surcoût marginal en série (quelques centaines €)
Infrastructure supplémentaire dédiée	**0 € — l'ÉREV est déjà là, entretenu, assuré**	✓Avantage vs groupe électrogène fixe dédié
Périmètre réglementaire	V2H (réseau domestique isolé, coupure réseau)	✓Distinct du V2G — réglementation plus simple, déploiement immédiat possible

Note V2H vs V2G : le V2G (Vehicle-to-Grid) réinjecte de l'énergie sur le réseau public — ce qui nécessite des homologations complexes et une infrastructure bidirectionnelle côté réseau. Le V2H alimente uniquement le réseau domestique privé, isolé du réseau public pendant la coupure : réglementation plus simple, déploiement immédiat possible. L'ÉREV ne dépend plus seulement d'un réseau — il peut en être temporairement indépendant. C'est une résilience énergétique de second niveau, cohérente avec le nom du programme.

Conclusion — L'ÉREV bio-GNV : le véhicule de la transition qui sécurise l'électrification

L'ÉREV bio-GNV n'est pas un compromis entre le thermique et l'électrique — c'est une architecture originale qui cumule les avantages des deux sans leurs inconvénients respectifs. 100–130 km de zéro émission pour les trajets quotidiens. Résilience totale et autonomie étendue pour les grands trajets. Mécanisme passif d'effacement de 40 GW de demande réseau aux pics critiques.

Sa valeur la plus importante n'est pas visible sur une fiche technique : c'est les 37,5 GW de bornes rapides 150 kW sur autoroute qu'il rend inutiles, les 30–50 Md€ de renforcement réseau TURPE qu'il évite, et les cinq situations critiques annuelles qu'il transforme de ruptures potentielles en incidents gérables.

> Message aux décideurs : Un BEV consomme de l'électricité au pire moment (retour de week-end, départ de vacances, grand froid). Un ÉREV bio-GNV cesse d'en consommer à ces moments. C'est la définition même d'une assurance réseau passive. Et elle s'autofinance : le propriétaire économise 30 000 € sur 15 ans par rapport à un PHEV équivalent.

Références

Programme Résilience V11 · Annexe Goudrons V11 · Annexe Juridique EU V11 · Toyota Dynamic Force Engine 2.0L (rendement 41 %) · Mazda Skyactiv-X (~43 %) · HORSE Powertrain H12 Concept (44,2 %) · BYD moteur hybride 1,5 L (46,1 %, 2024) · Geely 1,5 TD (46,5 %, 2024) · Nissan e-POWER STARC (objectif 50 %, 2021) · Mercedes-AMG F1 (rendement > 50 % avec MGU-H, 2017) · Volvo D13TC / Scania turbocompound · US DOE SuperTruck (ORC poids lourds) · MAHLE Jet Ignition · UNECE R110 (homologation réservoirs GNV) · Règlement EU 2019/631 Art. 10a (exemption e-fuels 2023) · BYD Blade Battery LFP (3 000 cycles) · ADEME (données mobilité et emplois EnR) · CERTU (trajectoires mobilité France 2023)