



# HARMONIE ÉLECTRIQUE : LES ÉNERGIES RENOUVELABLES RESPONSABLES

## Mandat pour le stockage obligatoire et la stabilité du réseau

LIVRE BLANC PRÉSENTÉ PAR L'ASSOCIATION ENVIRONNEMENT JUSTE  
«bien comprendre pour mieux décider»

### SOMMAIRE

1. **Synthèse Exécutive**
2. **Introduction** : Le Grand Concert Électrique
3. **Diagnostic** : Le coût caché de l'instabilité (règle du cube, Loi APER)
4. **La Solution** : Stockage intégré et garantie de profil de puissance
5. **Paliers de Responsabilité et Mutualisation** : Du résidentiel à l'industriel
6. **Technologie Cible** : La rupture Sodium-Ion (Na-Ion)
7. **Économie** : Épargne publique, Prix négatifs et Pollueur-Payeur
8. **Souveraineté** : Emploi et réindustrialisation européenne
9. **Cadre Réglementaire** : Priorisation foncière et ZAN
10. **Conclusion**
11. **Glossaire**
12. **Sources et Références**

# 1. SYNTHÈSE EXÉCUTIVE

## Le Problème

Le déploiement actuel des énergies renouvelables intermittentes (éolien et solaire) introduit une variabilité physique importante dans le réseau électrique, se traduisant par des profils de production en « dents de scie ».

Cette variabilité entraîne des coûts systémiques significatifs : activation de moyens pilotables, renforcement des infrastructures, gestion de congestions locales et nationales.

La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE 3, février 2025) programme 48 GW de solaire et 31 GW d'éolien terrestre d'ici 2030 — sans fixer le moindre objectif de stockage par batteries. **C'est précisément cette lacune que le présent mandat entend combler.**

En 2025, le marché *day-ahead* France d'**EPEX SPOT** a enregistré près de 500 heures de prix négatifs, révélant une inadéquation ponctuelle entre production et demande (Source : données marché / RTE).

Ces déséquilibres ne sont pas uniquement financiers : ils reflètent une contrainte physique du réseau, qui doit rester équilibré à chaque seconde.

## La Solution

Nous proposons que toute nouvelle installation éolienne ou solaire au-delà d'un seuil de puissance défini réglementairement intègre une capacité minimale de stockage proportionnée à sa puissance installée.

Ce dimensionnement pourrait être établi par la CRE et RTE, selon des critères régionaux objectifs (profil de production, tension locale, capacité réseau).

L'évolution récente des technologies Sodium-Ion — avec des coûts cellule industriels annoncés inférieurs à 20 €/kWh (hors intégration système) et des durées de vie pouvant atteindre 15 000 cycles selon fiches techniques fabricants — rend cette exigence techniquement crédible et économiquement envisageable.

Le principe est simple :

**Responsabilité physique du producteur = stabilité du système.**

## 2. INTRODUCTION : LE GRAND CONCERT ÉLECTRIQUE

Ce document s'adresse à la fois aux citoyens et aux décideurs. Les sections techniques peuvent être approfondies via les sources citées.

Imaginez notre réseau électrique comme un immense orchestre symphonique.

L'éolienne et le panneau solaire sont des musiciens talentueux, mais dépendants de conditions extérieures : le vent et l'ensoleillement. Leur production ne répond pas directement à la demande des consommateurs.

Aujourd'hui, l'équilibre du système est maintenu grâce à :

- des centrales pilotables (nucléaire modulé, hydraulique, thermique),
- des importations/exportations européennes,
- des capacités d'effacement,
- et des installations de stockage existantes (notamment les STEP).

Cependant, l'augmentation rapide des capacités intermittentes accroît mécaniquement les besoins de flexibilité.

Notre objectif n'est pas de remettre en cause les énergies renouvelables, mais d'aligner leur déploiement sur les contraintes physiques fondamentales du réseau électrique :

**l'électricité ne se stocke pas naturellement sur le réseau — elle doit être équilibrée en permanence.**

Rendre chaque installation partiellement autonome en gestion de sa variabilité permettrait de soulager l'ensemble du système sans surcoût collectif.

## 3. DIAGNOSTIC : LE COÛT CACHÉ DE L'INSTABILITÉ EN "DENTS DE SCIE"

L'instabilité des EnR n'est pas qu'un défi technique, c'est une charge financière et structurelle.

**Les réalités physiques de l'intermittence :**

**Le facteur de charge : la réalité derrière les chiffres annoncés.** Derrière les grandes annonces de « gigawatts installés » se cache une réalité que les promoteurs mentionnent rarement : le facteur de charge. C'est le rapport entre ce qu'une installation pourrait produire si elle tournait à plein régime toute l'année, et ce qu'elle produit réellement.

En France, les chiffres sont éloquentes (Source : Bilan Électrique RTE 2024) :

- Solaire photovoltaïque : 13% — pour 1 kW installé, seuls 130 watts sont effectivement produits en moyenne sur l'année
- Éolien terrestre : 21,8% — un peu plus d'un cinquième de la puissance théorique
- Éolien en mer : 31,6% — le meilleur des trois, mais toujours moins d'un tiers

Ces chiffres posent le cadre de tout ce qui suit : une installation renouvelable n'est jamais aussi puissante que son nom l'indique. Voici pourquoi.

**L'éolien et la règle du cube : pourquoi le vent est si capricieux ?** En physique, la puissance d'une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. En langage courant : si le vent diminue d'un tiers, la production chute de moitié. C'est une sensibilité extrême aux variations météo, créant ainsi des chocs de puissance massifs.

**Le photovoltaïque : la chute brutale.** Le passage d'un nuage dense peut provoquer un effondrement immédiat de 70 à 80% de la production en quelques secondes. Sans stockage tampon, le réseau doit compenser ce "trou" en temps réel.

**La barrière nocturne.** Le solaire s'arrête net dès la tombée du jour, pile au moment du pic de consommation des ménages en soirée. En langage courant : une éolienne terrestre est à l'arrêt ou en sous-régime plus des trois quarts du temps. Un panneau solaire, plus de huit heures sur dix. C'est précisément ce vide que les centrales à gaz de secours — et demain, les batteries — doivent combler.

**Le recours contraint aux centrales à gaz de secours.** Le nucléaire est puissant mais peu flexible — il ne peut pas s'arrêter et redémarrer en quelques minutes pour combler un creux de vent ou un passage nuageux. Ce rôle de « pompier énergétique » est donc assuré par des centrales thermiques à gaz, maintenues sous pression en permanence, prêtes à démarrer à tout moment. Résultat : chaque kilowattheure solaire ou éolien produit sans stockage garde en réserve, dans l'ombre, une centrale à gaz qui tourne — et qui émet du CO<sub>2</sub>. Le stockage coupe ce lien invisible entre EnR et fossile.

**Optimisation estivale et déséquilibre saisonnier (cadre Loi APER).** Dans le cadre de la loi du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production des énergies renouvelables (Loi APER), certains projets au sol adoptent des inclinaisons réduites des panneaux (environ 15–20°). Cette configuration n'est pas imposée par la loi elle-même, mais résulte de choix d'optimisation.

Ces configurations techniques visent principalement à augmenter la densité d'implantation et à maximiser la production estivale, améliorant ainsi le rendement financier annuel. Toutefois, cette logique privilégie les périodes déjà excédentaires en production électrique, au détriment des mois hivernaux où la demande nationale est la plus élevée.

Il en résulte un désalignement structurel entre production et besoin système : la performance annuelle optimisée ne correspond pas nécessairement à l'optimum de sécurité énergétique. Ce constat justifie l'intégration d'un critère de contribution saisonnière ou d'une obligation de stockage associé, afin que les nouvelles installations participent réellement à la stabilité du réseau.

## 4. LA SOLUTION : STOCKAGE INTÉGRÉ ET GARANTIE DE PROFIL DE PUISSANCE

**Le principe est simple:** Chaque producteur d'énergie intermittente significative doit contribuer à la stabilité du système en garantissant un profil de puissance plus régulier. Le stockage devient ainsi un composant intrinsèque de la centrale, et non une option secondaire.

Le stockage agit comme un tampon physique : il absorbe les pics de production, compense les chutes rapides et réduit la variabilité injectée sur le réseau. Il limite les appels instantanés aux moyens thermiques et protège les infrastructures de transport (lignes haute tension) contre les surcharges locales.

Concrètement, cela revient à exiger que toute nouvelle installation de production intermittente dépassant la puissance minimale fixée par décret intègre une capacité minimale de stockage proportionnée à sa puissance installée. On ne sépare plus production et stabilité : comme pour tout équipement industriel, la fonction et la sécurité vont ensemble.

## 5. PALIERS DE RESPONSABILITÉ ET MUTUALISATION

Afin de garantir la stabilité du système électrique sans faire peser l'intégralité des coûts de flexibilité sur la collectivité, nous proposons l'instauration de paliers de responsabilité de stockage obligatoires basés sur la technologie **Sodium-Ion (Na-Ion)**. Avec un coût cellule annoncé par CATL à **19 €/kWh** — soit près d'un tiers du coût du Li-Ion — cette solution offre une viabilité économique inédite.

Le tableau ci-dessous illustre les capacités de stockage cibles selon la taille des installations. Ces paliers ont vocation à être affinés avec RTE et la CRE selon les réalités régionales du réseau.

Tableau des capacités de stockage cibles (Technologie Na-Ion)

Palier	Puissance installée	Ratio de Stockage	Solution proposée (Na-Ion)	Finalité Physique
<b>Micro-résidentiel</b>	< 10 kW	Exemption ou 0,5 kWh/kW	Packs domestiques compacts	Soulagement local du réseau BT
<b>Résidentiel / Tertiaire</b>	10 - 250 kW	<b>1 kWh / kW</b>	Armoires de quartier mutualisées	Lissage de la courbe de charge
<b>Industriel &amp; PME</b>	250 kW - 10 MW	<b>1,5 - 2 kWh / kW</b>	Conteneurs stationnaires dédiés	Effacement des pointes & résilience
<b>Utilitaire (Fermes EnR)</b>	> 10 MW	<b>3 - 5 kWh / kW</b>	Parcs massifs (BESS) sur site	Soutien de fréquence & report de charge

## 6. TECHNOLOGIE CIBLE : LA RUPTURE SODIUM-ION (Na-Ion)

Les données industrielles de 2025/2026 confirment que le Sodium-Ion est la clé de cette transition :

Caractéristique	Lithium Fer Phosphate (LFP)	<b>Na-Ion (CATL Gen 2 / Naxtra)</b>
<b>Durée de vie (Cycles)</b>	6 000 - 10 000 cycles	<b>15 000 cycles (jusqu'à 40 ans de service)</b>
<b>Coût Cellule (kWh)</b>	~60 €	<b>19 € (vise 10 € en 2027)</b>
<b>Métaux Critiques</b>	Lithium (critique)	<b>Aucun (Sodium/Sel)</b>
<b>Collecteurs</b>	Cuivre (critique)	<b>Aluminium (abondant)</b>
<b>Températures</b>	Sensible au froid	<b>Stable (-40°C à +70°C)</b>

### Les Leaders Industriels de la Rupture

La souveraineté européenne et la disponibilité technologique sont désormais garanties par des acteurs industriels majeurs implantés sur notre sol :

1. **CATL (Leader Mondial & Européen)** : Premier producteur mondial, CATL déploie sa technologie **Naxtra (Gen 2)** en Europe. Avec ses usines d'**Erfurt (Allemagne)** et de **Debrecen (Hongrie)** — cette dernière devenant opérationnelle au printemps 2026 — CATL assure une capacité de production massive (visant 100 GWh) pour sécuriser le stockage stationnaire européen à un coût cellule inférieur à 20 €/kWh. (Source : fiche technique CATL Naxtra Gen 2, 2025)
2. **TIAMAT Energy (France)** : Fleuron de l'innovation française basé à **Amiens**, Tiamat Energy se spécialise dans les cellules Sodium-Ion à haute puissance, capables de répondre instantanément aux variations brutales ("dents de scie") des parcs éoliens et solaires.
3. **Altris (Suède)** : Spécialiste de la cathode "Blanc de Prusse", Altris fournit les matériaux essentiels aux assembleurs européens, sécurisant ainsi l'intégralité de la chaîne de valeur sans dépendance asiatique.
4. **Batri (Royaume-Uni)** : Pionnier de l'utilisation de **carbone issu de l'antracite gallois**, Batri démontre qu'une souveraineté totale est possible en utilisant des ressources minières locales pour les anodes des batteries (Anthracite).

## 7. ÉCONOMIE : ÉPARGNE PUBLIQUE, PRIX NÉGATIFS ET POLLUEUR-PAYEUR

- **Le paradoxe des prix négatifs** : Faute de stockage, l'énergie produite en surplus lors des pics météo sature le réseau, obligeant les producteurs à **payer** pour évacuer leur électricité. Le stockage obligatoire met fin à ce gaspillage : l'énergie est conservée pour être réinjectée à un **prix normal** au moment où la demande est réelle.
- **Éviter le gaspillage de l'argent public** : Le stockage intégré réduit de manière significative le besoin de travaux coûteux sur les lignes haute tension (payés par les contribuables) pour encaisser les pics brutaux.
- **Bascule Pollueur-Payeur** : Le coût de la stabilité est transféré du contribuable vers le producteur d'instabilité. C'est ce que les économistes appellent le **Coût Système Complet** — **FSCOE** (Source : UNECE 2025) : le vrai prix de l'électricité, qui inclut non seulement la production, mais aussi la stabilisation, le transport et les centrales de secours.

- **Le rétablissement de la responsabilité financière.** La responsabilité signifie ici la fin du transfert de charges. Aujourd'hui, le producteur encaisse le profit du kWh intermittent, tandis que la collectivité assume la responsabilité financière de l'équilibrage et de la sécurisation du réseau. Nous proposons de réaligner ces deux fonctions : celui qui génère la variabilité physique doit en assumer la gestion économique.

## 8. SOUVERAINETÉ, EMPLOI ET RÉINDUSTRIALISATION

Notre mandat est un moteur de croissance locale. La fabrication de batteries Sodium-Ion repose sur des composants abondants en Europe (sel, aluminium).

- **Création d'emplois** : Les premières estimations industrielles évoquent plusieurs dizaines de milliers d'emplois directs et indirects à l'échelle européenne — en France, au moins les sites de TIAMAT Energy à Amiens et les filières de recyclage associées.
- **Maillage Européen** : La production est déjà sécurisée par les sites de **TIAMAT Energy**, **CATL** (Erfurt en Allemagne et Debrecen en Hongrie dès ce printemps 2026).

## 9. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET PRIORISATION FONCIÈRE

Transition énergétique ≠ industrialisation des campagnes.

- **Priorisation Foncière et ZAN** : Moratoire sur l'installation d'EnR sur terres agricoles, naturelles ou forestières. Priorité stricte aux surfaces artificialisées existantes. (toitures, parkings et zones de stationnement, infrastructures de transport, friches et sites dégradés, espaces urbains artificialisés, autres surfaces techniques, etc.)
- **Économie Circulaire** : La chimie simplifiée du Sodium-Ion facilite un recyclage propre et local, transformant les batteries en ressources plutôt qu'en déchets complexes.

## 10. CONCLUSION

La transition ne peut plus reposer sur une simple vérité comptable de "kWh produits". Elle doit s'aligner sur la réalité physique du réseau — la règle du cube, la Loi APER, et le lien invisible entre EnR sans stockage et centrales à gaz de secours.

Cet enjeu prend toute sa dimension à la lecture de la **Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE 3)**, publiée en février 2025. Les objectifs fixés sont considérables :

<b>Énergie</b>	<b>Aujourd'hui</b>	<b>Objectif 2030</b>	<b>Objectif 2035</b>
Solaire photovoltaïque	~31 GW	48 GW	55 à 80 GW
Éolien	~22 GW	31 GW	35 à 40 GW
Éolien en mer	~2 GW	4 GW	18 GW
<b>Stockage batteries</b>	~0,5 GW	<b>Aucun objectif</b>	<b>Aucun objectif</b>

**Ces chiffres appellent une question fondamentale : à quoi sert** une puissance installée si elle ne peut pas être livrée quand nous en avons besoin ?

Avec un facteur de charge solaire de **13%**, les 48 GW prévus en 2030 ne produiront en réalité que l'équivalent de **6,2 GW en continu** — et quasi rien les soirs d'hiver, au moment précis où la demande est la plus forte.

Mais le chiffre le plus révélateur de ce tableau est peut-être le dernier : pour le stockage, la PPE 3 ne fixe **aucun objectif**. Des dizaines de gigawatts d'énergie intermittente programmés, sans la moindre obligation de les stabiliser.

Sans stockage obligatoire, ces objectifs resteront une promesse comptable, pas une garantie énergétique.

C'est pourquoi le mandat que nous proposons est d'une importance capitale : en responsabilisant chaque producteur via le stockage Sodium-Ion, nous transformons une promesse comptable en énergie réellement disponible — stable, souveraine, décarbonée et économiquement juste pour chaque Français.

© 2026 Association Environnement Juste

---

## GLOSSAIRE

- **EnR (Énergies Renouvelables)** : Énergies de flux (vent, soleil) qui dépendent de la météo et non de la demande des usagers.
- **Facteur de charge** : Rapport entre l'énergie réellement produite par une installation sur une année et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à pleine puissance sans interruption. En France, ce facteur est de 13% pour le solaire, 21,8% pour l'éolien terrestre et 31,6% pour l'éolien en mer (Source : Bilan

Électrique RTE 2024). Un facteur de 13% signifie qu'une installation solaire de 1 kW ne produit en moyenne que 130 watts sur l'année.

- **Stockage Intégré** : Une batterie installée directement sur le lieu de production pour "lisser" le courant et garantir une puissance stable avant qu'il n'entre sur le réseau.
- **Centrale de secours (« veille chaude »)** : Centrale thermique à gaz maintenue en fonctionnement permanent à faible régime, prête à monter en puissance en quelques minutes pour compenser une chute soudaine de production éolienne ou solaire. Ce fonctionnement permanent consomme du gaz et émet du CO<sub>2</sub>, même quand l'électricité n'est pas encore injectée sur le réseau.
- **LCOE (Coût moyen de production)** : Indicateur utilisé par les promoteurs de projets pour présenter le coût de chaque kilowattheure produit sur la durée de vie d'une installation. **Attention** : cet indicateur ne tient pas compte des coûts que la société doit ensuite payer pour stabiliser ce courant, le transporter et pallier les moments sans vent ni soleil.
- **FSCOE / Coût Système Complet (Source UNECE 2025)** : C'est le "vrai prix" de l'électricité pour la société. Il inclut la production, mais aussi le coût des batteries, le renforcement des câbles électriques et les centrales de secours.
- **Prix Négatifs** : Situation paradoxale où la surproduction d'électricité sature le réseau ; les producteurs doivent alors payer pour qu'on évacue leur surplus afin d'éviter l'effondrement du réseau.
- **Sodium-Ion** : Nouvelle génération de batteries utilisant du sodium, un élément chimique abondant en Europe — contrairement au lithium ou au cobalt, rares et majoritairement importés d'Asie ou d'Afrique. Durée de vie : jusqu'à 15 000 cycles de charge complète, soit environ 40 ans d'utilisation quotidienne (Source : CATL Naxtra Gen 2, 2025).
- **Règle du cube** : Loi physique selon laquelle la puissance d'une éolienne varie avec le cube de la vitesse du vent. Exemple concret : si le vent est deux fois plus fort, la puissance produite est multipliée par huit. À l'inverse, une légère baisse de vent entraîne une chute brutale de production — d'où les « dents de scie » sur le réseau.
- **ZAN (Zéro Artificialisation Nette)** : Loi visant à protéger les terres agricoles en interdisant de construire sur des espaces naturels sauf avec une compensation acceptée.

## SOURCES ET RÉFÉRENCES (La base scientifique du Mandat)

- **Économie Systémique** : UNECE (2025) - *Understanding Full System Cost of Electricity (FSCOES)*. Rapport GECES-21/2025/INF.2. (Démontre la nécessité de passer du LCOE partiel au coût système complet).
- **Données Réseau France** : RTE (Réseau de Transport d'Électricité) : • Bilan Électrique 2024 : facteurs de charge solaire (13%), éolien terrestre (21,8%), éolien en mer (31,6%) • Rapports sur l'équilibre offre-demande et historique des 500 heures de prix négatifs en 2025.
- **Marchés Européens** : EPEX SPOT - Données sur la volatilité des prix et la destruction de valeur lors des pics de production.
- **Technologie Sodium-Ion** :
  - *CATL (2025/26)* : Fiches techniques de la cellule Naxtra Gen 2 (15 000 cycles / 19 € par kWh).
  - *CNRS / TIAMAT Energy* : Données sur la puissance de décharge et l'implantation industrielle à Amiens.
  - *Altris (Suède)* : *Données sur les cathodes Blanc de Prusse et certifications sur les batteries sans métaux critiques (Lithium/Cobalt)*.
  - **Législation** : Loi APER (Accélération de la Production des Énergies Renouvelables) du 10 mars 2023 et ses impacts sur l'inclinaison des panneaux (Agrivoltaïsme).
- **Potentiel Foncier** : Étude ADEME (2024) sur le gisement photovoltaïque prioritaire sur zones artificialisées.
- **Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE 3)** : Ministère de la Transition Énergétique (2025) — Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2025-2035. Objectifs retenus : 48 GW solaire en 2030 (55 à 80 GW en 2035), 31 GW éolien terrestre en 2030, 4 GW éolien en mer en 2030 (18 GW en 2035). **Absence notable : aucun objectif de stockage par batteries fixé pour 2030 ni 2035.**

 <https://www.ecologie.gouv.fr/programmation-pluriannuelle-energie>

**Association Environnement Juste - 19 février 2026.**

**Contact:** Tim ABADY. [tim.abady@environnement-juste.fr](mailto:tim.abady@environnement-juste.fr)

+33 (0) 6 60 55 66 64