

Jean-Christian Lhomme



LA GUERRE DES WATTS

TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUES ET PERSPECTIVES

éditions
Quæ

La guerre des watts

Transitions et perspectives

Sauf mention contraire, tous les dessins et les photos sont de Jean-Christian Lhomme.

Couverture

Maquette et réalisation : Marie Cherrier Georget.

Crédits photographiques : toutes les photos de la couverture sont de l'auteur sauf les éoliennes (©Xavier Kine/Enercon).

Maquette intérieure et mise en page

Claire Aujeau (Oxalis-scop).

Secrétariat d'édition

Valérie Mary.

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex
www.quae.com

ISBN : 978-2-7592-2231-5
© Éditions Quæ, 2014

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

La guerre des watts

Transitions et perspectives

Jean-Christian Lhomme

Éditions Quæ

Remerciements

Ce livre a été réalisé avec la participation de :

Vincent Arcis
Hervé Bardy
Xavier Braud
Jean-Pierre Broudic
Marie Cherrier
Nathalie Cointre
Anabelle Comte
Jean-Marcel Couteau
Michel Degouy
Stéphanie Delugeau
Steven Eon
Gérald Feray
Albert Genter
Xavier Kine
Emmanuel Lisze
Bruno Mailh
Cécile Maisonneuve

Delphine Maisonneuve
Olivier Martinet
Joël Mazet
Jessica Mesnard
Sylvie Nowak
Christian Panoux
Cyril Perrin
Bruno Primout
Philippe Reffay
Igor Rimbaud
Damien Rinsant
Daniel Rodier
Oswaldo Rodriguez
Peter Schuster
Céline Sireau
Carole Stéfanutti

Sommaire

Remerciements	5
Introduction	11

CHAPITRE 1 LES CHOIX DE TRANSITIONS **13**

En équilibre sur un fil	13
Factures négatives, de quoi s'agit-il ?	17
Mix européens, à quels coûts ?	18

CHAPITRE 2 L'ARCHITECTURE DU « NOUVEAU MIX » **23**

Contrastes citadins	23
Repenser l'urbanisme	24
Que la lumière soit !	24
Notions d'orientation efficiente	26
D'est en ouest, organiser le bonheur de vivre	28
Déterminer un coefficient de forme	29
Face au changement climatique	30
Au pied du mur, quels matériaux pour quels usages ?	31
Comment réaliser une isolation performante ?	33
Confort et vecteur air, le retour gagnant	36
Réhabilitation, par où commencer ?	37

CHAPITRE 3 LES « ÉCONO-PILIERS » DU MIX **41**

La révélation des compteurs	41
Cuisine d'aujourd'hui : mon frigo a la classe !	42
Réinventer l'eau chaude	44
Chauffage, trouver les bons réglages	45
Veiller aux veilles	46
Éclairage : la beauté fonctionnelle	46
Vers une généralisation des smarts ?	49

CHAPITRE 4 **HYDROCARBURES FOSSILES, LA QUÊTE DU GRAAL** **51**

—————	Le pétrole peut-il être inépuisable ?	52
	Peak oil	52
	Huiles de schistes	53
	La complexité des forages	53
	Boues de forage	56
	Fluides de fracturation	57
	Étanchéité	58
	Pétroles omniprésents	58
	Réduire l'addiction aux carburants	60
—————	Gaz de combustion	61
	Gaz naturel, le grand frère	61
	Le gaz naturel en France	64
	Gaz de pétrole liquéfiés (GPL)	65
	Gaz de charbon, le grisou du fond de trou	66

CHAPITRE 5 **AU BOUT DU FIL, LES ÉLECTRO-CHARBONS** **69**

	Une très vieille histoire	70
	Charbons combustibles	70
	Centrales électriques hautes performances	72
	Haute technologie et moindres pollutions	72
	Maîtriser les effluents	75

CHAPITRE 6 **ÉNERGIES DE L'EAU, LE MAÎTRE DES FLUX** **77**

	Une répartition inégale	78
	Québec, des installations exemplaires	79
	Indispensable au réseau européen	81
	L'hydraulique gravitaire, comment ça marche ?	82
	Dordogne, la vallée des lacs	87
	Énergies marines en démonstration	89
	Turbinage des marées	89
	Hydroliennes	91
	Énergie des vagues	92
	Énergie thermique des mers (ETM)	92

CHAPITRE 7 ÉLECTRONUCLÉAIRE PARMIS LES GRANDS 95

Au large des poudrières	96
Fission, comment ça marche ?	96
Réacteurs à eau pressurisée (REP)	99
Les surgénérateurs détiennent-ils les clés de l'avenir électrique ?	101
Cycle des combustibles en France	102
Fusion thermonucléaire, objectif 2070	105
Combustion, fission ou flux renouvelables ?	106

CHAPITRE 8 BIOMASSE, L'ÉNERGIE DU VIVANT 107

————— Agrocarburants, le pétrole des champs	108
Agrocarburants de première génération	108
Concurrence alimentaire	108
Agrocarburants de seconde génération	110
Pétrole de microalgues, quand l'empire des minuscules s'éveillera...	111
————— Biogaz	114
Biométhane de première génération : les petits nouveaux	114
Biométhane de deuxième génération	115
————— Bois énergie, les escarbilles du nouveau siècle	117
Le bon, le pire et l'excellent	117
Combustion de bois et effluents atmosphériques	118
Bûches, plaquettes et pellets	120
Centrales électriques	121
Chaleur bois énergie, le meilleur sinon rien !	122
Micro-cogénération, la performance redéfinie	123
Les collectivités aussi !	125

CHAPITRE 9 ÉOLIEN, LA CLÉ DES MIX ? 127

————— À terre d'abord !	127
Vent de mer ou vent de terre ?	127
Un nouveau monde en marche	129
Mâts béton postcontraint, une productivité accrue	130
Pales du nouveaux mix	131
Nacelle, visite entre ciel et terre	133
Générateurs annulaires	134

—————	Éolien offshore	135
	L'Europe en leader !	135
	Haliade 150, la France aux avant-postes	136
	La technique et les chiffres	136

CHAPITRE 10 **DIX MILLE SOLEILS SUR TERRE** **139**

—————	Photovoltaïque	139
	Éléphant ou papillon ?	139
	Haute qualité électrique	141
	L'Europe photovoltaïque	141
	Rêvons un peu les transports solaires	145
—————	Systèmes solaires thermiques	146
	Efficients, fiables et différents	146
	Solaire thermique européen	146
	Chauffe-eau solaires	148
	Le paradoxe des systèmes solaires combinés	149
	Rafraîchissement solaire	149
	Face au soleil, intensément...	150
—————	Un renouveau des concentrateurs solaires ?	153
	Technologies de l'héliothermodynamique	154
	Demain peut-être ?	158

CHAPITRE 11 **GÉOTHERMIE, L'AUTRE NUCLÉAIRE** **161**

	L'énergie de la Terre	161
	Forages, l'évolution attendue	161
	Basses et hautes températures	162
	Réseaux de chaleur	162
	Électricité géothermique, comment ça marche ?	163
	Soultz-sous-Forêts, un pilote unique au monde	164
	Pompes à chaleur : l'air, la terre et l'eau	168
	Technologies de captage	169
	État de l'art	171
	Europe, où en sommes-nous ?	172
	Conclusion	174

Introduction

Statistiquement, la perfection énergétique attendra longtemps une proposition divine. Les alternatives aux ressources conventionnelles progressent mais sont loin d'être aussi évidentes qu'attendu, notamment à cause d'une productivité défavorable aux flux intermittents. Dans l'état de l'art connu en 2014, la transition peut se résumer à un choix de services et de nuisances piloté par les réalités économiques, chaque ressource présentant des caractéristiques intrinsèques perfectibles.

Les projections 2030 réalistes privilégient un outil de production équilibré incluant pour la première fois une requalification du parc immobilier existant et une gestion efficiente des postes de consommation.

Nouvelles venues dans les mix électriques, les technologies *smart grids*¹ travaillent à une réduction du parc de centrales électriques vétustes en maîtrisant les pics de consommation. Les réseaux *smart homes*² coalisés avec les nouvelles performances des bâtiments croiseront le fer avec le marché du watt pour réduire les factures domestiques. Une grande part de l'avenir du monde se construira autour de l'optimisation des usages de l'énergie.

Côté production, l'exploitation des gaz et pétroles de schistes propulse les États-Unis parmi les plus importants producteurs d'hydrocarbures de la planète. À terme, la première puissance mondiale pourrait assurer son indépendance énergétique. Dans le même temps, la Russie perd 8,2 % de ses exportations de gaz vers l'Europe au profit des charbons américains et attend impatiemment la fonte des glaces pour faire main basse sur les gisements pétroliers de l'océan arctique. Le continent de l'ours blanc dissimulerait la plus forte concentration de sous-marins nucléaires du monde, de quoi envoyer *Ursus maritimus* et la lutte contre le changement climatique aux tréfonds de l'enfer.

Grand parmi les grands, vers 2030, le tout puissant Empire du Milieu dépendrait à 80 % d'approvisionnements pétroliers extérieurs, mais l'exploitation des hydrocarbures de schistes pourrait pérenniser sa compétitivité euphorique.

De l'autre côté du Rhin, nos voisins allemands dépenseraient jusqu'à 1 700 milliards d'euros pour négocier un empannage électrique radical. Cependant, dès 2020, l'Allemagne ne serait plus en mesure d'assumer seule sa propre consommation d'électricité et exposerait l'Europe à un *black out*.

Le 20 septembre 2013, le président François Hollande confirmait à mots choisis un maintien de la capacité nucléaire française pendant son quinquennat. Le propos suggérait que la contribution de l'atome représenterait 50 % du mix électrique en 2025 (75 % en 2014) sans réduire le parc existant. Outre une forte croissance des consommations, cette hypothèse suppose la construction et le financement d'un équivalent « puissance » de dix réacteurs EPR, seize mille

1 Systèmes d'optimisation de la rentabilité des moyens de production d'électricité.

2 Techniques d'optimisation des consommations d'électricité.

éoliennes de trois mégawatts produisant au fil du vent, ou encore vingt centrales thermiques gaz, charbon et bois brûlant chaque année 90 millions de tonnes de combustible et rejetant presque autant de CO₂.

Dans cet imbroglio de grandes manœuvres aux senteurs de guerre froide, il est difficile de décider à quel saint se vouer. Les carences en expertises capables d'orienter les politiques face aux réalités sont soulignées par les scénarios de transition énergétique précipitant le remplacement des fondamentaux de la civilisation par des baronnies *green business* fort éloignées de leurs idéaux référents.

Pour l'heure, le recours aux ressources conventionnelles reste incontournable. Leur productivité cinq fois supérieure à celle du photovoltaïque garantit un coût du kilowattheure compétitif et accessible au plus grand nombre.

Le nouveau millénaire s'inscrit dans une évolution technologique graduelle. Les progrès historiques glissent au fil des découvertes, parfois étalés sur plusieurs siècles. Le vent et l'eau, le soleil, le charbon, l'atome, les hydrocarbures et bien d'autres ressources ont progressivement contribué à l'édification du quotidien des Terriens. Dans ce vaste panel, les énergies intermittentes et compensées disposent d'un potentiel de développement planétaire incontestable, mais sont en difficulté technologique pour prendre les commandes d'un bouleversement de masse à l'horizon 2030. Passer outre les réalités pour refondre les structures fondamentales de la production d'énergie reviendrait à descendre prudemment d'un aéronef en vol avec sur le dos une voile dont les coutures ne sont pas terminées et un secours dont l'ouverture ne serait pas certaine. Comment dessiner un avenir sûr en phase avec les grands défis du nouveau siècle ?

Bien plus qu'une orientation philosophique, la lutte contre le réchauffement climatique et le kilowattheure cher est un combat citoyen de tous les instants. La production d'électricité marche à la pointe de l'innovation et investit lourdement pour améliorer l'efficacité des électrons.

Quel est l'avenir des gaz et pétroles de schistes ? Que pouvons-nous attendre du nucléaire ou de l'éolien ? Pourquoi le solaire photovoltaïque doit-il changer de cap ? Comment améliorer l'efficacité de nos habitats ? Le bois et la géothermie sont-ils vraiment des solutions pérennes ? Quel modèle d'industrie pour exister durablement ? Les grands barrages et le charbon sont-ils des monolithes incontournables ?

Au-delà des débats passionnés, ce livre construit un avenir avec des réalités tangibles. Il lève le voile sur le quotidien du réseau électrique européen et les capacités des nouvelles ressources, pointées heure par heure et mises à nu pour la première fois. Les plus grands acteurs de l'énergie planétaire, et d'autres plus modestes mais néanmoins essentiels, partagent leurs passions et ouvrent les coulisses d'un univers hors du commun.

LES CHOIX DE TRANSITIONS

Le watt devient surdoué, obéissant et s'adaptant à la microseconde aux impératifs des usages et de la production. L'efficacité énergétique quitte son image dégradée d'énergie des pauvres et s'oriente vers une écono-révolution de premier plan. Le nouveau siècle prend la mesure des événements ; il se prépare à user d'une kyrielle d'outils communicants sophistiqués et de technologies puisées dans la nature pour élaborer un panel énergétique « quatre étoiles ».

Au pied du mur, les flux renouvelables chahutés par leur productivité en dent de scie perdent l'exclusivité des solutions d'avenir.

En équilibre sur un fil

Sans régulation des consommations, le monde doublera sa puissance électrique installée avant 2030. Tricoter l'efficacité du second siècle énergétique devient un facteur de survie pour l'ensemble de la planète.

Dans l'absolu, l'électricité est difficilement stockable à l'échelle d'un pays, sauf investissements prohibitifs. La production s'adapte donc constamment à la demande du réseau, elle-même dépendante d'une multitude d'envies et de besoins, chauffage, éclairage, cuisine, heures ouvrées dans l'industrie... Dans la réalité quotidienne, les anticipations de consommations s'inspirent d'un historique pluriannuel et de la météo du lendemain. Les ingénieurs gestionnaires ajustent au plus près l'offre à la demande pour assurer la continuité du service en préservant l'intégrité des installations.

De l'autre côté du rideau, la demande d'électricité s'adapte aussi aux capacités de production, notamment par des incitations tarifaires (effacement jour de pointe - EJP, Tempo, heures creuses). Dès 2015, les compteurs télépilotes favoriseront un meilleur lissage des consommations et limiteront les productions de pointe.

Schématiquement, le réseau électrique européen est une trame très organisée, structurée autour de moyens de production chargés de compenser les prélèvements aléatoires de centaines de millions de postes de consommation. Les uns et les autres sont raccordés aux mêmes câbles, le plus souvent séparés par de nombreux kilomètres, une cascade de transformateurs, et surtout des compteurs, eux-mêmes connectés à des systèmes de facturation performants !



PHOTO 1 ■ **Au sud ou à l'ouest ?** (© Igor Rimbaud/www.girouette.fr).

La guerre des watts menace l'approvisionnement énergétique de la planète. Ballottée entre fantasmes et réalités, une mutation menée à marche forcée au nom de nouveaux idéaux cherche des vents porteurs. L'horizon 2030 verra-t-il d'autres ressources rivaliser avec le charbon, les hydrocarbures ou le nucléaire ?

Certaines centrales sont exploitées en « base », d'autres en « pointe » et une minorité en « hyperpointe ». Le rôle assigné à chaque type d'installation dépend de critères techniques certes, mais surtout économiques, les productions moins chères étant les plus sollicitées.

En France, la fourniture électrique de base est presque exclusivement assurée par les groupes nucléaires. Ils représentent un investissement important mais fournissent inlassablement des kilowattheures à bas coût. De nombreux pays assurent tout ou partie de cette mission avec du combustible charbon, voire du gaz ou du fioul. D'autres recourent à la grande hydraulique, par exemple le Québec et la Norvège. Toutefois, dans l'Hexagone, cette ressource est insuffisamment disponible pour couvrir l'intégralité de la fourniture électrique.

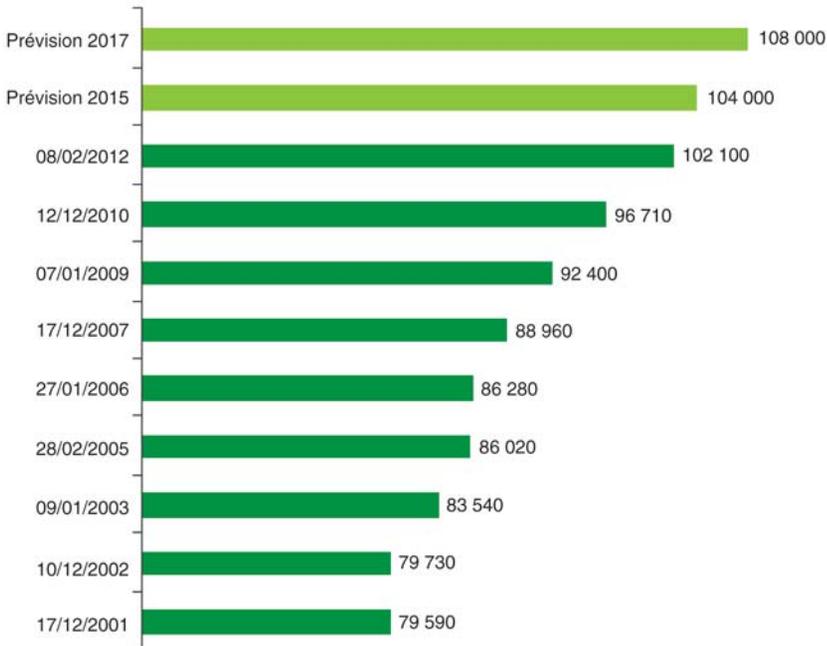


FIGURE 1 ■ Pics de production électrique de 2001 à 2017 en France (MW) (source : RTE).

Les pics de puissance du 7 et 8 février 2012 à 19 heures ont mobilisé l'ensemble des centrales disponibles dans l'Hexagone et atteint le cap historique de 102 100 mégawatts. Les capacités d'importation étaient alors saturées. Un tel scénario ne peut pas se répéter à l'infini. L'avènement des réseaux électriques intelligents dédiés à la réduction des pics de consommation est une nécessité incontournable.

TABLEAU 1 ■ Consommation et export d'électricité, hypothèses 2014-2030 exprimées en TWh par filière en France (source : RTE).

	2014	2015	2017	2030
Consommation nationale	486,5	490,9	497,4	516,4
Pompage des STEP*	7,0	7,0	7,0	9,1
Export	52,7	60,4	58,9	31,8
Total	546,2	558,3	563,3	557,3

* STEP : station de transfert d'énergie par pompage.

TABLEAU 2 ■ Contribution de chaque filière au mix énergétique français, hypothèses 2014-2030, en TWh (source : RTE).

Filières	2014	2015	2017	2030
Thermique nucléaire	409,4	418,6	412,1	271,5
Thermique charbon	13,1	12,1	12,0	9,8
Cycles combinés gaz	16,6	17,0	22,5	41,1
Moyens de pointe (fioul, TaC*)	0,8	1,0	2,0	4,7
Thermique décentralisé non EnR	8,6	8,3	7,9	7,2
Thermique décentralisé EnR	6,5	7,9	8,8	30,1
Hydroélectricité et STEP	69,3	69,3	69,3	73,9
Éolien	17,4	19,0	22,5	77,5
Photovoltaïque	4,5	5,1	6,2	32,9
Énergies marines	0	0	0	8,6
Total	546,2	558,3	563,3	557,3

* Turbine à combustion.

TABLEAU 3 ■ Parc électrique français, hypothèses de puissance installée « nouveau mix » 2020-2030, en GW (source : RTE-SOES-FEE).

Filières	2014	2020	2030
Thermique nucléaire	63,1	63	40
Charbon	6,9	2,9	1,7
Cycles combinés gaz	4,5	6,9	8,9
Moyens de pointe	10,2	7,9	15
Thermique décentralisé non EnR	7,4	4,5	4,5
Thermique décentralisé EnR	1,3	1,8	6,3
Hydroélectricité	25,2	25,2	28,2
Éolien	8,1	16	40
Photovoltaïque	4,2	8	30
Énergies marines	0	0	3
Total	130,9	136,2	177,7

L'hypothèse « nouveau mix » 2030, élaborée par RTE, suppose un effort d'efficacité énergétique de 116,7 TWh et un soutien très marqué en faveur du photovoltaïque et de l'éolien (28 GW terrestres/12 GW offshore).

Relativement tendu, le « nouveau mix » fonctionne avec les échanges européens, l'interconnexion des réseaux électriques au sein de l'Union devant assurer la sécurité d'approvisionnement de chaque État.

En 2030, la capacité maximale à l'import aux frontières françaises serait portée à 23 GW (9,5 GW en janvier 2013). D'autres scénarios font état de 649 TWh consommés annuellement à cette échéance, la capacité du parc nucléaire serait alors élevée à 65 GW. À plus court terme, le parc français recevra l'appui du réacteur EPR 1 600 MW de Flamanville en 2016 (Manche) mais perdra les deux groupes de Fessenheim (Haut-Rhin), déclassés en 2017.

Les centrales thermiques à flamme, quant à elles, seront réduites de 3 855,1 MW sur la même période mais 2 300 MW de cycles combinés gaz seront progressivement mis en service jusqu'en 2017. Le parc éolien poursuit sa progression avec des hypothèses fluctuantes : des parcs offshore d'importance sont attendus avant 2020. L'hydroélectricité, maintenu en état, reçoit l'appui du nouvel aménagement de la Romanche.

Malgré une puissance installée de 5 700 MW dès 2017, les apports photovoltaïques restent dépendants de l'ensoleillement.

La réponse aux consommations de pointe, quant à elle, est garantie par des centrales nettement moins coûteuses mais fournissant de l'énergie à prix élevé. Les excellentes performances des cycles combinés gaz³ s'imposent fréquemment dans ce rôle, secondées par les cycles ouverts des turbines à combustion.

Les hyperpointes de consommation et les urgences sont assumées par les grands barrages et les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), en mesure de délivrer une puissance importante en quelques minutes, mais pendant une durée limitée (1800 MW disponibles en deux minutes à Grand-Maison, en Isère, France). Contrairement aux chaudières hautes températures confrontées à de fortes contraintes thermiques lors des démarrages, les turbines hydrauliques gèrent sans difficultés les mises en service et arrêts répétés.

L'intermittence du solaire photovoltaïque et du grand éolien tend à accentuer les fluctuations du réseau. Les moyens de production conventionnels compensent leurs aléas de fonctionnement en devenant plus flexibles.

Les réseaux électriques d'un futur proche moduleront précisément la quantité d'énergie demandée selon la disponibilité des ressources, par exemple en déplaçant les consommations importantes vers des heures moins chargées. En complément, l'optimisation de tous les usages, domestiques, tertiaires, industriels permettra la réduction effective des consommations sans altérer le confort de vie.

Pour l'heure, toutes filières énergétiques confondues, la croissance des consommations de l'arc ouest-européen marque le pas, calée dans le sillage de la crise économique. Cependant, le monde va dépenser chaque année 1 500 milliards de dollars supplémentaires pour faire face à la demande en énergie, essentiellement des grands pays asiatiques. Cumulée, la dépense aura dépassé la somme vertigineuse de 38 000 milliards de dollars en 2035.

La réalité des besoins en appelle à l'ensemble des moyens disponibles. Ainsi, énergies renouvelables, compensées, fossiles et fissiles apprennent à collaborer pour atteindre un objectif de service commun et répondre aux impératifs de l'évolution démographique, entre autres. La Terre accueillera onze milliards d'humains à la fin du siècle.

Les perspectives de l'Hexagone et de l'Europe électrique sont freinées par une visibilité économique réduite. L'installation et la mise à niveau de centrales d'horizons énergétiques divers, voire l'élaboration de nouvelles filières implique des investissements lourds à long terme et des prises de risques difficilement supportables. Plusieurs pays européens, dont la France et la Grande-Bretagne, travaillent à la mise en œuvre d'un mécanisme de rémunération des capacités de production participant à la sécurité électrique du réseau, indépendamment des kilowattheures vendus.

Factures négatives, de quoi s'agit-il ?

Le grand éolien et le photovoltaïque ont le vent en poupe. En moins de vingt ans, ils sont devenus des puissances énergétiques de premier plan. Cependant, élaborer des matériaux composites, imaginer des structures sophistiquées et des alliages légers ou grimper dans

3 Les cycles combinés gaz associent une turbine à combustion et un cycle à vapeur dans un même équipement.

les statistiques ne suffit pas à assurer la pérennité des systèmes électriques. La plupart des énergies renouvelables raccordées aux réseaux fonctionnent avec les apports en base de ces mêmes réseaux, chaque source étant dépendante de l'ensemble des autres. Les exploitants de centrales fossiles, nucléaires ou hydrauliques ne sont pas libres de leurs agissements mais strictement coordonnés pour assurer une qualité de fourniture irréprochable.

Les flux renouvelables fortement intermittents et le biogaz, quant à eux, déversent leurs mégawattheures selon les vents, l'ensoleillement du moment ou les contraintes des digesteurs.

Pour assurer la sûreté du réseau et coller au plus près des fluctuations de production, les gestionnaires gardent en demi-sommeil une forte réserve de puissance mobilisable quasi instantanément. Les missions d'adaptation de la production à la consommation (suivi de charge) sont confiées aux « réserves tournantes » d'unités thermiques maintenues en température et sollicitées si nécessaire. Pour des questions de coût, les turbines à combustion et les STEP sont réservées aux pics de puissance exceptionnels.

Additionnée aux flux renouvelables et productions de base, la surcapacité thermique de sécurité dépasse la puissance appelée par les consommations. De ce fait, maîtriser la fréquence du courant à 50 hertz (Hz) implique le recours à des exutoires rémunérés pour consommer de l'électricité.

Les fameux prix négatifs exigés par d'importants « clients » pour enlever l'électricité surabondante et maintenir le réseau en équilibre dépassent largement les tarifs moyens pratiqués pour la vente de courant très haute tension. La course aux mégawatts post éoliens est devenue une spécialité des traders-exploitants de STEP autrichiennes, suisses et bientôt norvégiennes de fortes capacités, payés pour remplir leurs barrages et les vider. En bout de file, les surcoûts sont épongés par les clients domestiques *via* les taxes EnR en France et en Allemagne.

Le grand éolien et le photovoltaïque doivent évoluer vers une garantie de fourniture minimale en associant des moyens de compensation à leur puissance installée. Le cas échéant, le démantèlement prématuré et la mise sous cocon d'outils de production de base conduira inéluctablement à des baisses de fourniture liées au manque de vent ou d'ensoleillement. À ce stade de développement des nouvelles venues dans le système électrique, il n'est pas blasphématoire de mentionner les obligations de service inhérentes à chaque producteur d'électricité, y compris filières éoliennes et photovoltaïques.

Mix européens, à quels coûts ?

Imaginer le futur bouquet énergétique planétaire soulève des questions écologiques et technologiques, mais ne peut pas se suffire d'un langage idyllique. La pérennité de la société est en jeu pour bien d'autres raisons, notamment économiques et géopolitiques : la crise ukrainienne en atteste.

La dépendance énergétique européenne dépassera 80 % en 2030. Les énergies renouvelables et compensées, indépendantes par nature, offrent une contribution potentiellement conséquente aux mix électriques des différents pays et progresseront fortement jusqu'en 2030, *a minima*. Cependant, leur intégration dans le panel électrique est complexe. Des investissements lourds accompagnent leur progression, notamment le développement de