

MÉNARD, Raphaël

Énergies légères : usages, architecture, paysages. -- Paris : Pavillon de l'Arsenal, cop. 2023

248 p. : il., fot. col. y n., gráf., det., plan., secc. ; 30 cm.

Glosario

Bibliografía: p. 241-243

ISBN 978-2-35487-074-4

1. Francia 2. Centrales hidroeléctricas 3. Centrales nucleares 4. Consumo de energía 5. Energía eólica 6. Energía fotovoltaica 7. Energía hidroeléctrica 8. Energía hidráulica 9. Energía nuclear 10. Energía solar 11. Energías alternativas 12. Energías renovables 13. Fuentes de energía 14. Medio ambiente 15. Recursos naturales 16. Sostenibilidad

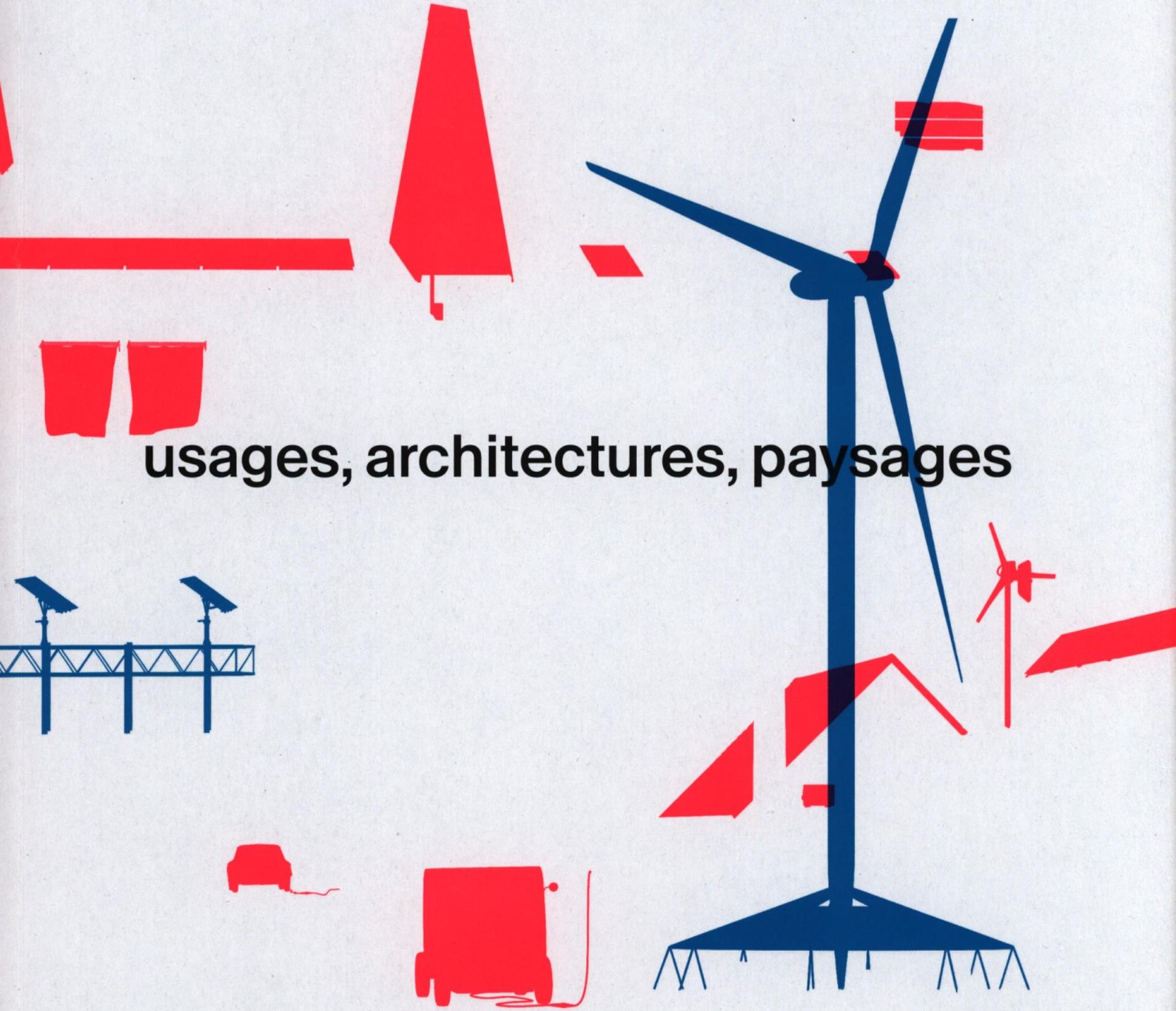
13.00 Medio ambiente

COAM 23378

énergies légères

Raphaël Ménard

usages, architectures, paysages



énergies légères

Raphaël Ménard

usages, architectures, paysages



L'oiseau fait son nid avec quelques brindilles, et le prélèvement qu'il fait sur la nature est tellement infime qu'il ne laisse à la surface de la terre que des traces évanescentes. Tel n'est pas le cas du nid de l'homme : son habitat — et la recherche de sa persistance induite par la sédentarisation — pèse d'emblée sur le monde d'un poids devenu, au fil des siècles, insupportable. Cet ouvrage stimulant, réalisé sous la direction de Raphaël Ménard, met les choses en perspectives, en plaçant au centre le sujet du cycle de la matière, autour du triangle énergie-matière-carbone.

Car l'homme est ainsi fait : il a eu le génie de voir la terre qui le porte comme un réservoir de ressources. Pendant des millénaires, le rythme de leur prélèvement était inférieur à celui de leur renouvellement. Non pas qu'il n'existât pas, de temps à autre, quelques tensions, comme sur le bois, lorsque la déforestation prenait une cadence un peu trop trépidante, mais un rappel naturel s'exerçait pour retrouver l'équilibre. Remarquer, comme il est fait ici, que c'est sous ce régime — 100 % renouvelable — qu'ont pu advenir la révolution copernicienne, la Renaissance, l'âge classique et les Lumières, constitue ainsi une belle invitation à changer notre regard, et donc notre trajectoire.

Car comment sortir de ce monde boursoufflé par une consommation de matières ? Comment sortir de ce cycle extraire/produire/convertir/transporter/distribuer/stocker, devenu infernal ? Ce n'est pas tant le poids toujours croissant, quelle que soit la métrique utilisée (en kg, en kWh, en CO₂), qui pose problème, mais l'insuffisante capacité de la terre elle-même à délivrer tous les matériaux dont nous avons soif. Le constat est devenu classique, mais le mérite de cet ouvrage est de présenter une belle synthèse des réflexions à ce sujet.

À cet insoutenable poids que nous faisons peser sur notre terre, avec la certitude de la dévorer et d'y périr toutes et tous, nous devons proposer une alternative : celle de la quête d'une indispensable et soutenable légèreté des choses. Une quête qui constitue un sport à haute émulation intellectuelle. Mais dans ces conditions, et avec cet objectif, peut-on encore construire ? La réponse doit devenir positive, à condition de tout changer, et de décrocher de l'orbite sur laquelle nous nous sommes installés depuis la mise en exploitation des énergies fossiles. Il s'agit donc d'atterrir, et une certaine dose de virtuosité pour engager la manœuvre sera nécessaire. Cet ouvrage est en quelque sorte le manuel de rentrée dans une atmosphère vivable et viable.

Quant au point d'atterrissage, cet ouvrage en suggère un : produire des structures habitables produisant plus de matières qu'elle n'en consomme sur son cycle de vie. Un point ultime, sublime. Révolution copernicienne, défi, impératif ? Sans doute tout cela à la fois, pour au bout du compte, retrouver une légèreté qui conditionne l'habitabilité de notre planète.

L'énergie a besoin d'architecture. En publiant *Énergies légères*, le Pavillon de l'Arsenal lance l'appel : mobilisez les architectes, les paysagistes, les urbanistes pour façonner la transition énergétique !

Un panorama historique de l'architecture de l'énergie nous enseigne à quel point les barrages, centrales et autres installations ont inspiré les plus grands concepteurs de leur temps. Aujourd'hui, pour réussir le nécessaire déploiement des énergies renouvelables, doivent être imaginées une nouvelle intégration paysagère, une nouvelle esthétique post-carbone et post-pétrole, une nouvelle architecture. Ce livre esquisse des pistes en ce sens, montrant que la transition énergétique peut s'accompagner d'architectures sobres, insérées avec simplicité dans une diversité de paysages et respectueuses de l'existant. Il ouvre la voie à une génération inédite d'installations énergétiques, les rendant désirables, voire poétiques.

Depuis toujours, architecture et énergie sont intimement liées, l'une ne peut être détachée de l'autre, et de cette friction émergent les solutions les plus diverses. Des moulins à vent aux éoliennes, l'énergie crée des architectures qui réinventent continuellement notre relation aux éléments. À son tour, l'architecture consomme, préserve et transforme de l'énergie, pouvant être soit une alliée, soit un poids, dans la quête de sobriété.

La légèreté, métrique développée dans cet ouvrage, permet d'esquisser des alternatives après des décennies de démesure, d'exploitation parfois illimitée de l'énergie et des ressources, de non-respect des paysages. La transition énergétique implique une transformation sans précédent, mais celle-ci peut être légère. Il ne s'agit pas de figer les villes, les plaines agricoles, les toits, les abords des fleuves, mais de s'y insérer en douceur. Par leur profondeur historique, leur précision scientifique, leur finesse architecturale, les approches et les démarches présentées dans les pages suivantes témoignent de ce talent.

En comprenant mieux les dynamiques mises en jeu, en termes de poids, de quantité et de type de matières, de production et de consommation d'énergie, chaque concepteur sera à même d'apporter les réponses les plus appropriées à nos paysages, chaque citoyen de porter un regard éclairé sur ces projets et de participer à la transition écologique. L'énergie offre l'opportunité d'une nouvelle forme de créativité architecturale, il est essentiel de s'en saisir.

CHRONIQUES DES A
DE L'É
1 AUX ORIGINES DE L'É
ET DE LA MATIÈR
La Terre avant l'Homme
Avant le feu
Après le feu
Formes de l'efficacité
2 L'ARCHITECTURE RENOU
Un âge d'or
Une chaumière du XVI
La chasse aux courants
Formes et courants d'
Formes et courants d'
La combustion du bois
et les menaces gr
3 L'ARCHITECTURE FOS
L'émergence des foies
Formes et charbon
Formes et pétrole
Électricité et énergies
Tergiversations autour
d'un revêtement à
La démesure qui dure
4 L'ARCHITECTURE ÉNT
L'architecture sans én
La fin des croissances
Libérer l'architecture des énergies fossiles
Le soleil et les formes des énergies
renouvelables
Trop de matières pour peu d'énergie ?

Le quartier pavillonnaire
Un intérieur en ville
La plaine agricole
Les toits
L'horizon
Le fleuve
Six légèretés
Glossaire
Bibliographie

Introduction	8	5 L'ARCHITECTURE MATIÈRE	
		Fin de la matière, fin de l'architecture ?	111
1		Moins de matière	120
CHRONIQUES DES ARCHITECTURES		De la matière pour longtemps	128
DE L'ÉNERGIE		Faire circuler la matière	131
		Matières renouvelables	134
1 AUX ORIGINES DE L'ÉNERGIE		2	
ET DE LA MATIÈRE		ATLAS DES ARCHITECTURES	
La Terre avant l'<i>Homo sapiens</i>	17	DE L'ÉNERGIE	
Avant le feu	18	Atlas des architectures de l'énergie	146
Après le feu	22	Consommation énergétique en France	148
Formes de l'efficacité	26	Centrale nucléaire	150
2 L'ARCHITECTURE RENOUELABLE		Centrale à charbon	154
Un âge d'or	31	Centrale hydroélectrique	158
Une chaumière du XVII^e siècle	33	Éolienne terrestre	162
La chasse aux courants	36	Éolienne en mer	166
Formes et courants d'eau	37	Centrale solaire	170
Formes et courants d'air	42	Photovoltaïque en toiture	174
La combustion du bois		Traction animale	178
et les menaces sur les forêts	45	Pompe à chaleur	180
3 L'ARCHITECTURE FOSSILE		Chaudière à gaz	184
L'émergence des fossiles	53	Fenêtre	188
Formes et charbon	61	Isolant thermique	192
Formes et pétrole	67	Demain sans énergies fossiles ?	196
Électricité et énergies invisibilisées	70	3	
Tergiversations autour		DEMAIN	
d'un revirement énergétique	76	LES ÉNERGIES LÉGÈRES	
La démesure qui dure	80	Moins d'énergie	202
4 L'ARCHITECTURE ÉNERGIE		Six paysages post-carbone	203
L'architecture sans énergies fossiles ?	85	Le quartier pavillonnaire	204
La fin des croissances	86	Un intérieur en ville	208
Libérer l'architecture des énergies fossiles	92	La plaine agricole	212
Le soleil et les formes des énergies		Les toits	216
renouvelables	94	L'horizon	220
Trop de matières pour peu d'énergie ?	109	Le fleuve	224
		Six légèretés	228
		Glossaire	238
		Bibliographie	241

Voir l'énergie autrement, dessiner l'invisible, mesurer l'impondérable, partager, transmettre, outiller, se donner les moyens de réparer la Terre, plus léger, sevré des énergies fossiles. Un projet fou, digne de Don Quichotte affrontant les moulins à vent ! Évidemment nous ne sommes pas les premiers, ni les derniers, à nous atteler à ce projet, défi de l'habitabilité du monde.

Biomasse, énergie musculaire, énergie hydraulique ou éolienne, combustibles fossiles, fission nucléaire, énergie solaire, chacune de ces énergies a contribué à bâtir une fraction des 30 000 milliards de tonnes édifiées par l'humanité¹. Ces formes indispensables aux activités humaines que sont les architectures de l'énergie convoquent en amont la consommation de ressources et, en aval, nos usages.

Suivant une approche historique, contemporaine puis prospective, *Énergies légères* « pèse » plus spécifiquement les architectures de l'énergie : la masse d'une centrale nucléaire, la lourdeur d'une retenue d'eau, le poids de la machine à vapeur, l'embonpoint de la voiture électrique... Extraire, produire, convertir, transporter, distribuer, stocker de l'énergie est par essence « pesant ».

Ces infrastructures, ces objets, par leur dimension spatiale, constructive, culturelle et esthétique, font œuvre d'architecture, mettent en évidence les multiples paramètres de la relation mouvementée entre architecture et énergie, et révèlent l'empreinte territoriale et matérielle des technologies. La question de l'énergie nourrit aussi un vaste champ de recherche au croisement de l'architecture, du paysage, de l'écologie territoriale et des sciences de l'environnement. Des publications récentes ont analysé l'impact du déploiement des énergies renouvelables² et partent de l'hypothèse que le paysage, du fait de son caractère esthétique, social et politique, joue un rôle central dans l'avènement d'un nouveau régime énergétique. En ce sens, cette transition serait « l'un des moteurs de l'évolution du cadre de vie, des lieux où nous vivons, travaillons et nous divertissons »³.

Le poids des choses

Le constat de notre dépendance aux énergies fossiles est globalement bien connu, mais la conscience de notre appétit extractiviste, de notre consommation de ressources est probablement moins partagée. Mettons notre monde sur la balance. Non pas une « pesée » de la planète entière, mais des choses construites (et défaites aussi) par l'espèce humaine. En effet, en à peine deux siècles, depuis l'essor des hydrocarbures (charbon, gaz, pétrole), notre addiction aux « énergies faciles » a déplacé les montagnes (parfois littéralement) ; les énergies fossiles ont remué, transformé, cuit, brûlé, mélangé, pollué une quantité démesurée de matières présentes sur le globe, d'abord sur les continents, au fond des océans et à leur surface⁴, puis dans l'atmosphère.

En 2017, pour la première fois, une équipe de vingt-cinq chercheurs en géologie publie une estimation de la masse de l'ensemble des artefacts amoncelés par l'humanité sur la Terre⁵. Ils ont additionné les quantités de béton, d'acier, de verre, d'aluminium, etc. composant les bâtiments ; ajouté les innombrables objets de notre quotidien ; agrégé les inextricables réseaux de routes, parkings, tunnels, ponts qui supportent le milliard et demi d'automobiles,

1 Jan Zalasiewicz et al., « Scale and diversity of the physical technosphere – A geological perspective », *The Anthropocene Review*, vol. 4, n° 1, 2017, p. 9-22.

2 Dirk F. Sijmons (dir.), *Landscape and Energy. Designing Transition*, Rotterdam, nai010 publishers, 2014 ; Sven Stremke et al., *Power of Landscape. Novel Narratives to Engage with the Energy Transition*, Rotterdam, nai010 publishers, 2022.

3 Stremke et al., *Power of Landscape* [...], op. cit.

4 Dragage pour récolter du sable et certains minerais, et activité des plateformes pétrolière maritimes.

5 J. Zalasiewicz et al., « Scale and diversity of the physical technosphere – A geological perspective », op. cit.

camions et autobus en circulation ; intégré bateaux, trains, avions, centrales électriques, ports, réseaux, biens de consommation, ainsi que les machines et outils peuplant nos environnements. Enfin, ils ont estimé le volume et la masse des sols transformés pour l'élevage et l'agriculture. Le résultat paraît incomparable : 30 000 milliards de tonnes de matériaux, de produits et d'objets, de toutes les tailles et de toutes les formes. Soit l'équivalent de 4 000 tonnes par humain.

Nous avons transformé la surface du globe en une vaste brocante, un « grenier d'objets » parmi lesquels certains servent peu et beaucoup sont à l'abandon. Il n'a été possible de produire un tel « torrent » qu'en sollicitant la puissance des énergies fossiles, le feu thermo-industriel de notre époque (parfois nommée « anthropocène »). Ces 30 000 milliards de tonnes représentent 100 000 fois la masse de l'humanité : uniformément réparties sur la Terre, cela équivaut à 50 kilos de matière par mètre carré⁶. Pour donner une idée de ce flux continu, les nouveaux objets produits chaque semaine correspondent au poids de l'humanité, soit 8 milliards d'individus. À l'échelle d'une journée, le grand tapis roulant extractiviste génère l'équivalent du poids d'un milliard de nos semblables. Le métabolisme de notre monde est décidément bien peu léger, cette lourdeur peu soutenable.

En 2020, une nouvelle étude parue dans la revue *Nature*⁷ précise que la masse totale des matières plastiques utilisées ou amoncelées dans les décharges, les mers et les océans représente près de deux fois celle de l'ensemble des animaux sur Terre. Quant aux bâtiments et infrastructures érigés sur les cinq continents, ils pèsent à eux seuls près de 1 000 milliards de tonnes, un poids comparable à la masse (sèche) des arbres et arbustes sur l'entièreté du globe (environ 900 milliards de tonnes). Ceci donne une première mesure de l'empreinte des activités humaines, de la transformation des sols qu'elles induisent, de leurs impacts sur le vivant. Bien sûr, cette « remorque de désordre », ce « sillage d'entropie » varie suivant les individus, selon les régions, en fonction du niveau de vie. En 2019, la consommation moyenne de matières premières des Français s'élevait à 17 tonnes par habitant, quand un Américain atteignait 30 tonnes⁸, un Algérien 10 tonnes et un Indien 5 tonnes.

Au-delà des impacts sur la biodiversité, sur les sols, sur la vulnérabilité aux risques naturels et au changement climatique, cette « consommation du monde » se confronte aux limites physiques et naturelles de notre planète, à la quantité limitée des ressources (minerais, métaux, sable, hydrocarbures, eau, etc.) et à leur extraction de plus en plus compliquée, énergivore et onéreuse (les mines et gisements faciles d'accès ayant été très largement exploités). L'empreinte matière provient notamment des activités industrielles qui, inlassablement, extraient, transportent et transforment les ressources nécessaires à fabriquer les matériaux dont sont composés nos environnements. C'est l'industrie dite « lourde⁹ » qui satisfait l'insatiable appétit de nos économies, en ingérant une quantité d'énergie colossale. Une fois puisées et acheminées, les ressources minières sont transformées dans d'immenses fours à une température pouvant dépasser 1 000 °C, produite par la combustion d'énergies fossiles. Pas d'acier, d'aluminium, de verre, de ciment (ni, évidemment, de plastique)

6 Cette « densité de choses » est bien plus importante si on la rapporte aux continents, et plus encore aux zones habitées.

7 Emily Elhacham et al., « Global human-made mass exceeds all living biomass », *Nature*, vol. 588, décembre 2020, p. 442-444.

8 United Nations Environment Programme (UNEP) et International Resource Panel (IRP), « Global Material Flows Database », 2023, www.resourcepanel.org/global-material-flows-database. L'empreinte matière (Material footprint ou Raw material consumption, RMC) correspond à l'ensemble des matières premières mobilisées pour satisfaire la consommation finale d'un pays, y compris les flux indirects (matières premières utilisées lors de la production à l'étranger, lors du transport, etc.).

9 Mines, métallurgie, sidérurgie, pétrochimie, chimie, construction navale, production électrique, etc.

sans pétrole, gaz et charbon brûlés dans les vastes installations des complexes industriels qui parsèment nos territoires.

La seule production annuelle de quelque 4,5 milliards de tonnes de ciment et de 2 milliards de tonnes d'acier génère près de 15 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales¹⁰. Quant à l'industrie des combustibles fossiles, elle extrait des mines de charbon et des champs pétroliers et gaziers de quoi assurer plus de 80 % de la consommation d'énergie primaire mondiale. En 2022, la combustion de ces ressources énergétiques dans les innombrables machines thermiques (sans doute des centaines de milliards) disséminées sur la planète a émis plus de 41 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂)¹¹.

Des usages sans énergies fossiles

Bâtir la « soutenable légèreté du monde », plus frugale en matières, plus sobre en énergie, mais aussi modifier les usages et, plus largement, les organisations, les normes et les systèmes de valeurs : tel est le double impératif. Pourtant, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, le développement des sociétés et l'évolution des modes de vie reposent principalement sur la combustion des énergies fossiles. Entre 1950 et 2008, la part du charbon, du gaz et du pétrole dans l'usage mondial d'énergies primaires est passée de 70 % à 79 %¹². L'omniprésence des hydrocarbures dans nos objets et dans nos activités (chaudières à gaz, voitures thermiques, matériaux plastiques, pétrochimie, etc.) suffit à nous rappeler que le sevrage sera long et éprouvant.

En 2021, alors que l'humanité se remettait du choc de la pandémie de Covid-19, seules 13 % des énergies provenaient de sources dites « renouvelables », c'est-à-dire de la biomasse, des centrales hydrauliques, de l'éolien, du solaire et de la géothermie. Le dernier rapport du Giec¹³ est sans équivoque : pour atténuer le changement climatique, éviter un emballement du système, se donner une chance de réduire le réchauffement global à +1,5 °C, les émissions de gaz à effet de serre doivent être réduites de manière drastique et atteindre un niveau quasi nul d'ici 2050¹⁴. Dès lors, à l'exigence de sobriété s'ajoute celle de la création de nouvelles architectures de l'énergie, moins dépendantes des énergies fossiles. Parmi celles-ci, les énergies renouvelables, et particulièrement celles dédiées à la production d'électricité. À ce titre, le Giec positionne l'énergie éolienne et l'énergie solaire en tête du palmarès des solutions de production énergétique. En aval du cycle de l'énergie, toute réduction de demande est à considérer (y compris concernant les besoins satisfaits par le biais d'énergies renouvelables), car la sobriété des usages rétroagit sur les consommations en ressources, comme sur l'empreinte spatiale et l'impact visuel sur les paysages.

Tout au long de la chaîne de l'énergie, de l'amont à l'aval, le transport, le stockage, la distribution, les objets de consommation finale sont « en mue » de décarbonation, à commencer par l'automobile, en prise avec sa « révolution électrique ». Cette évolution de la voiture (ainsi que des véhicules légers) engage de multiples reconfigurations : les stations-services et leur logistique, les bornes de recharge, etc. Un « stress d'adaptation » qui questionne évidemment le transport lui-même, son impact en ressources (particulièrement les

10 Voir Vaclav Smil, *How the World Really Works. The Science Behind How We Got Here and Where We're Going*, New York, Viking, 2022 ; Robbie M. Andrew, « Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018 », *Earth System Science Data*, vol. 11, n° 4, Copernicus GmbH, 2019, p. 1675-1710 (données actualisées en 2022 : <https://zenodo.org/record/6553090>).

11 Voir Agence internationale de l'énergie (IEA), *CO₂ Emissions in 2022*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>, p. 14.

12 Voir Hannah Ritchie et Max Roser, « Energy Mix », *Our World in Data*, 2022, <https://ourworldindata.org/energy-mix>

13 Le Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) évalue l'état des connaissances sur l'évolution du climat, ses causes et ses impacts. Il analyse des scénarios de limitation du changement climatique et d'adaptation aux bouleversements attendus. À ce sujet, voir Kari De Pryck, *GIEC. La voix du climat*, Paris, Les Presses de SciencesPo, 2022.

14 Giec, *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, 2022.

batteries) et les externalités associées. Alors que l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) pointe la quasi-proportionnalité entre le poids d'un véhicule électrique et son impact CO₂¹⁵, la relation entre masse et empreinte carbone ne doit pas être éludée.

Le chantier a démarré. Il est encore loin d'être à la hauteur des enjeux socio-écologiques liés à la dégradation de la biosphère, mais un regard optimiste porté sur l'évolution récente des politiques énergétiques dans de nombreux pays donne à penser qu'une modification profonde de notre relation à l'énergie est amorcée. Si la Chine continue à financer la construction de nombreuses centrales à charbon, elle investit aujourd'hui plus qu'aucun autre pays dans les énergies renouvelables¹⁶. Dans un contexte de déstabilisation des équilibres géopolitiques, la Commission européenne a publié en mai 2022 le plan REPowerEU qui entend porter à 45% la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale d'ici 2030. L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique de nombreux pays (en Allemagne, elle représente 47% de l'électricité¹⁷) entraîne une transformation majeure des infrastructures et des paysages. Début 2023, la France, le « mauvais élève » de l'Europe en matière de développement des énergies renouvelables¹⁸, a voté une loi visant à en accélérer le déploiement.

D'un paysage de stocks à un paysage de flux

Cette mutation impliquera de relocaliser la production d'énergie. En récolter les fruits (ainsi que les matières renouvelables comme le biosourcé) nécessitera de la surface, y compris sous « descente énergétique¹⁹ » rapide. En amont de cette récolte figure le soleil. Le flux d'énergie solaire atteint notre planète en 8 minutes, principalement sous forme de rayonnement visible et d'infrarouges. Si la Terre ne reçoit qu'une infime proportion de cette énergie, celle-ci nous garantit une température clémente, condition indispensable à la forme de vie que nous connaissons²⁰. Émis à 5 500 °C, ce flux développe une puissance 5 000 fois plus importante que la demande mondiale d'énergie. Ainsi, l'énergie consommée par l'humanité n'équivaut qu'à 0,02% du flux solaire atteignant la surface du globe (ou encore 0,06% de celui reçu sur les continents).

L'une des différences fondamentales entre un champ pétrolier (stock d'énergie fossile) et un parc éolien (flux d'énergie renouvelable)²¹ tient à l'emprise au sol de ces installations au regard de la quantité d'énergie qu'elles extraient (ou convertissent). Les énergies fossiles sont en effet d'une densité exceptionnelle, et leur extraction se concentre dans quelques régions du monde (Moyen-Orient, Russie, États-Unis, etc.). À l'inverse, l'exploitation de l'énergie solaire, de l'éolien et de la biomasse se déploie sur de vastes surfaces; pour une production énergétique équivalente, l'écart est de 10 à 100 entre les énergies concentrées (plusieurs centaines de watts par mètre carré pour les fossiles ou le nucléaire) et la plupart des renouvelables (quelques watts par mètre carré, quelques dixièmes de watts pour la biomasse)²².

La transition énergétique n'implique donc pas seulement un transfert technologique, mais également un changement profond de relation aux infrastructures énergétiques, à leur architecture, à leur visibilité. D'un « paysage de points »

15 Cet impact est principalement lié aux batteries et au coût carbone des ressources minérales qui les composent.

16 « China to speed up construction of coal power plants this year », *Bloomberg News*, 20 janvier 2023.

17 Chiffre de 2020 : voir Cécile Boutelet, « Même sans gaz russe, l'Allemagne poursuit sa croissance et sa transition énergétique », *Le Monde*, 26 février 2023.

18 19% de la consommation finale en 2021 : voir Datalab, *Chiffres clés des énergies renouvelables*, ministère de la Transition énergétique, 2022, www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/CGDD_A6_CHIFFRES_CLES_EnR_2022_v3_010922_GB_signets.pdf.

19 Voir David Holmgren, *Comment s'orienter ? Permaculture et descente énergétique*, Marseille, Wildproject, 2023.

20 La température moyenne de notre planète est de l'ordre de +15 °C, alors que le froid cosmique est à -270 °C.

21 Ou entre une centrale électrique au charbon et une ferme photovoltaïque.

22 Voir David JC MacKay, *Sustainable Energy – Without the Hot Air*, Cambridge, UIT Cambridge Ltd., 2009.

(les énergies fossiles) à un « paysage de surfaces » (les énergies renouvelables), l'énergie devient plus proche, locale et diffuse. Tel est le paradoxe des énergies dites « légères » : conjuguer la légèreté de leurs empreintes (matérielle, visuelle, etc.) avec la légèreté de leur densité énergétique.

À leur sujet, le rapport « Futurs énergétiques 2050 », publié en 2021 par les experts du Réseau de transport d'électricité français (RTE), parle de « surgissement²³ ». Comme l'indique cette prospective très complète de l'électricité française à l'horizon 2050, combinant les hypothèses d'offre (notamment les quantités produites par les énergies renouvelables et/ou le nucléaire) et les projections de demande (efforts de sobriété, investissements dans l'efficacité...), la France devra largement déployer les énergies renouvelables, à commencer par le solaire et l'éolien. Pour le photovoltaïque, il faudra exploiter quelques millièmes de la surface nationale ; pour l'éolien, devront être installées des dizaines de milliers de mâts complémentaires. Ainsi, demain, panneaux solaires, éoliennes, méthaniseurs « surgiront » dans les régions françaises : sur les toitures, les friches, les parkings, les terres agricoles et les océans. De façon moins visible car souterraine, du côté de la géothermie, les pompes à chaleur complètent, avec les poêles à bois, ce « catalogue » de composants (« elements of energy » pour paraphraser les *Elements of Architecture* de Rem Koolhaas).

Des études antérieures à celle de RTE, comme les rapports de l'association négaWatt, l'étude *Un mix électrique 100 % renouvelable* et le rapport *Transition(s) 2050* de l'Ademe²⁴ annonçaient déjà ce nouveau « kit » énergétique. Il est désormais temps de questionner la « bonne échelle », puisque notre soif d'énergie se traduit parfois dans le gigantisme, y compris pour les énergies renouvelables : champ solaire de plusieurs kilomètres carrés, éolienne de plus de 200 mètres de haut, barrage hydroélectrique visible depuis l'espace... Concernant l'éolien, le dimensionnement se paie cher car, plus la turbine est haute, plus son mât est large et épais, plus ses fondations profondes et imposantes, et donc son impact matière important. La nouvelle visibilité de l'énergie qu'incarnent ces paysages de flux a des répercussions sur l'architecture, posant des questions relatives à la taille, à la géométrie, à l'intégration dans le bâti, en particulier pour les énergies solaires.

Architectures légères

À l'heure de la non-artificialisation des sols, la solarisation des bâtiments apparaît comme une évidence. Soulevant des enjeux architecturaux majeurs, celle-ci ne peut se limiter à intégrer des systèmes décarbonés à l'enveloppe de tissus existants. L'impact esthétique des installations d'énergies renouvelables reste un sujet architectural polémique²⁵ (la pose de panneaux solaires à proximité d'un édifice patrimonial peut être refusée) et insuffisamment traité²⁶. Conjugée à la nécessité de l'adaptation au changement climatique (albédo des toits, végétalisation, systèmes d'occultation des baies exposées, systèmes de rafraîchissement, etc.), l'« adaptation esthétique » reste un chantier ouvert et stimulant. Les architectes et, de manière plus globale, les concepteurs de projets doivent se saisir de cet appel à l'inventivité pour éviter que les villes et les paysages soient transformés par des objets industriels « achetés sur étagère ».

23 Réseau de transport d'électricité (RTE), *Futurs énergétiques 2050 : principaux résultats*, Paris, RTE, octobre 2021.

24 Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), *Un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations*, Angers, Ademe, 2015 ; Ademe, *Transition(s) 2050. Choisir maintenant, agir pour le climat*, Angers, Ademe, 2021.

25 Voir *ibid.*

26 Concernant la transformation des toits dans un contexte métropolitain et patrimonial, voir Raphaël Ménard, « Post-combustion », dans *La Beauté d'une ville. Controverses esthétiques et transition écologique à Paris*, Paris, Pavillon de l'Arsenal, et Marseille, Wildproject, 2021, p. 534-545.

Par-delà les considérations formelles, la « légèreté globale » de ce nouveau régime énergétique mérite de renouveler la façon de « faire projet » et les méthodes de conception. Si la relation entre énergie et masse des architectures de l'énergie est à aborder sous l'angle de la quantité (quantité d'énergie produite et quantité de matière nécessaire), la qualité (nature de l'énergie produite, complexité constructive, rareté des matériaux utilisés) doit également être au centre des réflexions. Nous nous attachons ainsi dans le présent ouvrage à établir un bilan global entre, d'un côté, les valeurs énergétiques et, de l'autre, la quantité et la nature des matières nécessaires. Nous nous efforçons de prendre du recul en analysant l'ensemble du cycle de vie, de l'amont (origine des matières premières) à l'aval (étapes de démantèlement, de déconstruction, de démolition).

L'obsolescence des architectures de l'énergie figure à l'agenda du débat public, à l'heure où la France souhaite prolonger la durée de vie des centrales nucléaires ; ou, à l'inverse, lorsqu'une éolienne n'ayant qu'une quinzaine d'années est démontée pour être remplacée par un modèle plus récent et plus puissant. De fait, l'architecture résulte d'actes de transformation, de déplacement, d'assemblage de matières qui mettent en œuvre des énergies ; une fois réalisée, elle nécessite aussi de l'énergie pour son usage (chauffage, éclairage, etc.). Plutôt que de l'aborder comme une quête de la permanence, d'une durabilité intrinsèque, de sa résistance illusoire au parcours du temps, il faut envisager l'architecture par le biais de son obsolescence — « l'architecture, c'est ce qui fait les belles ruines », disait Auguste Perret —, de sa fragilité (inhérente à toute complexité), *a fortiori* dans le contexte actuel du changement climatique et des vulnérabilités accrues.

Et demain ?

Quelles architectures non extractivistes concevoir pour des infrastructures débarrassées des énergies fossiles ? Comment bâtir des formes à partir de matières renouvelables (biosourcées, issues du réemploi, etc.) qui produiront elles-mêmes des énergies renouvelables (ou très peu carbonées) ? Une centrale nucléaire en terre crue ? Des barrages en adobe ? Des éoliennes en roseaux ? Des pompes à chaleur de réemploi ? Si ce programme de travail semble naïf, les questions posées sont plus complexes et les réponses ici esquissées objectiveront les résultats sur la base de quelques paramètres simples, telle la quantité d'énergie et de matières mobilisées. Moins de matière donc pour une même quantité (et qualité) d'énergie, mais assurément moins d'énergie tout court : voilà le plan de vol de notre « descente énergétique ».

Dans cette optique, quels sont les « optima énergie-matière » ? Demain, des architectures à dimensions plus modestes, plus facilement réparables et transformables ? La légèreté implique assurément de mettre en œuvre un mix de matériaux : moins de composants sans doute, plus de simplicité constructive, une meilleure utilisation des ressources locales, dont le biosourcé, le géosourcé et le réemploi. En cela, ce livre s'inscrit dans le sillage des ouvrages qui ont accompagné les expositions « Matière grise » (2014) et « L'Empreinte d'un habitat » (2022) au Pavillon de l'Arsenal. Il s'agit de raconter la

27 Cédric Carles, Thomas Ortiz et Éric Dussert (dir.), *Rétrofutur. Une contre-histoire des innovations énergétiques*, Paris, Buchet-Chastel, 2018.

28 Nous attirons l'attention (et la bienveillance) du lecteur sur le caractère approximatif du séquençage adopté ; seul un travail d'historien permettrait d'affiner ce découpage chronologique.

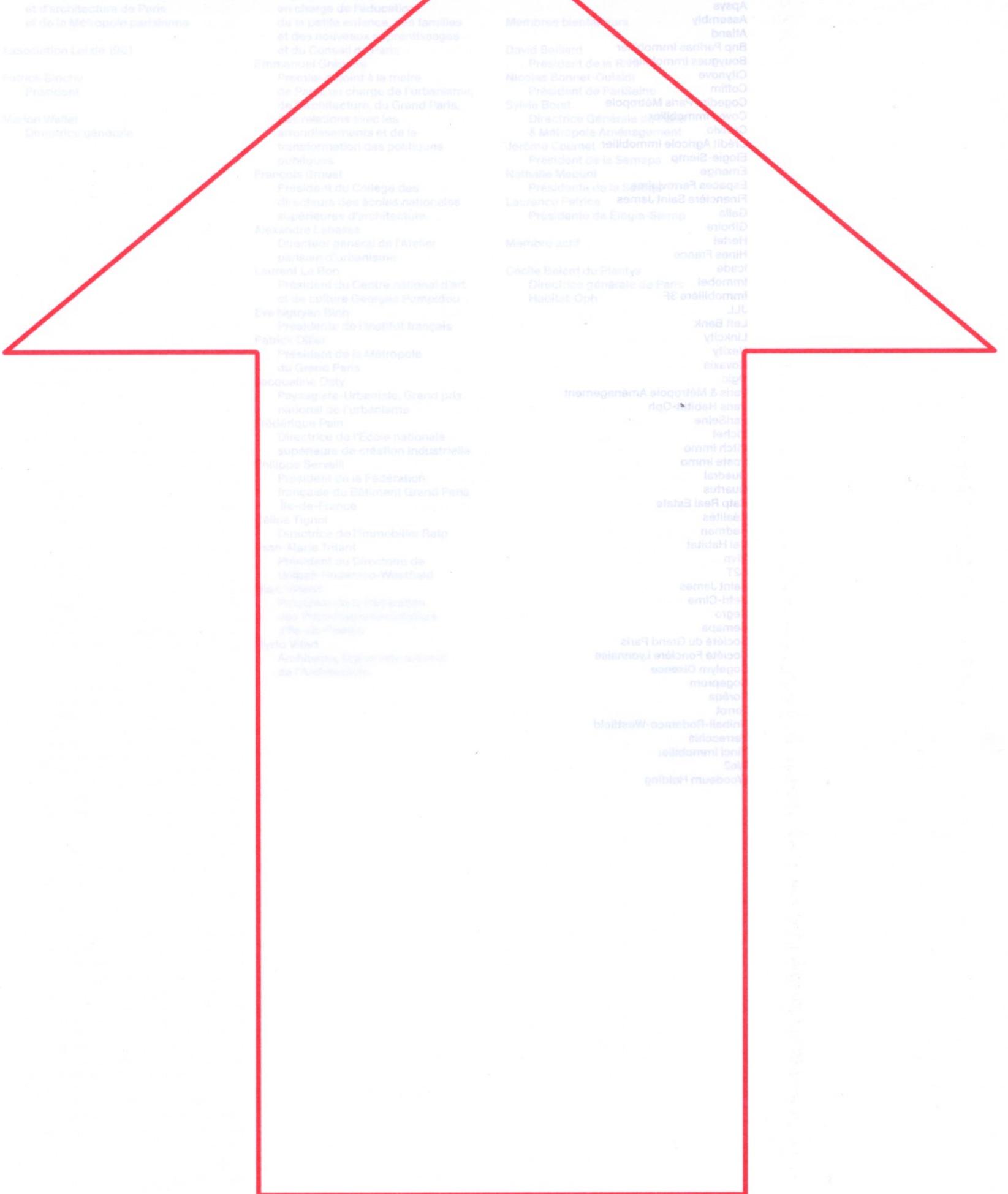
quête, sympathique, inspirante, touchante d'architectes, d'inventeurs et de bricoleurs, tels Hugh Piggott et ses éoliennes en *open source* ou les créateurs de nombreuses « machines à vent » recensées dans l'ouvrage *Rétrofutur*²⁷.

Pour commencer ce récit, « Chroniques des architectures de l'énergie » met en lumière les relations entre architecture, matière et énergie au fil des âges²⁸.

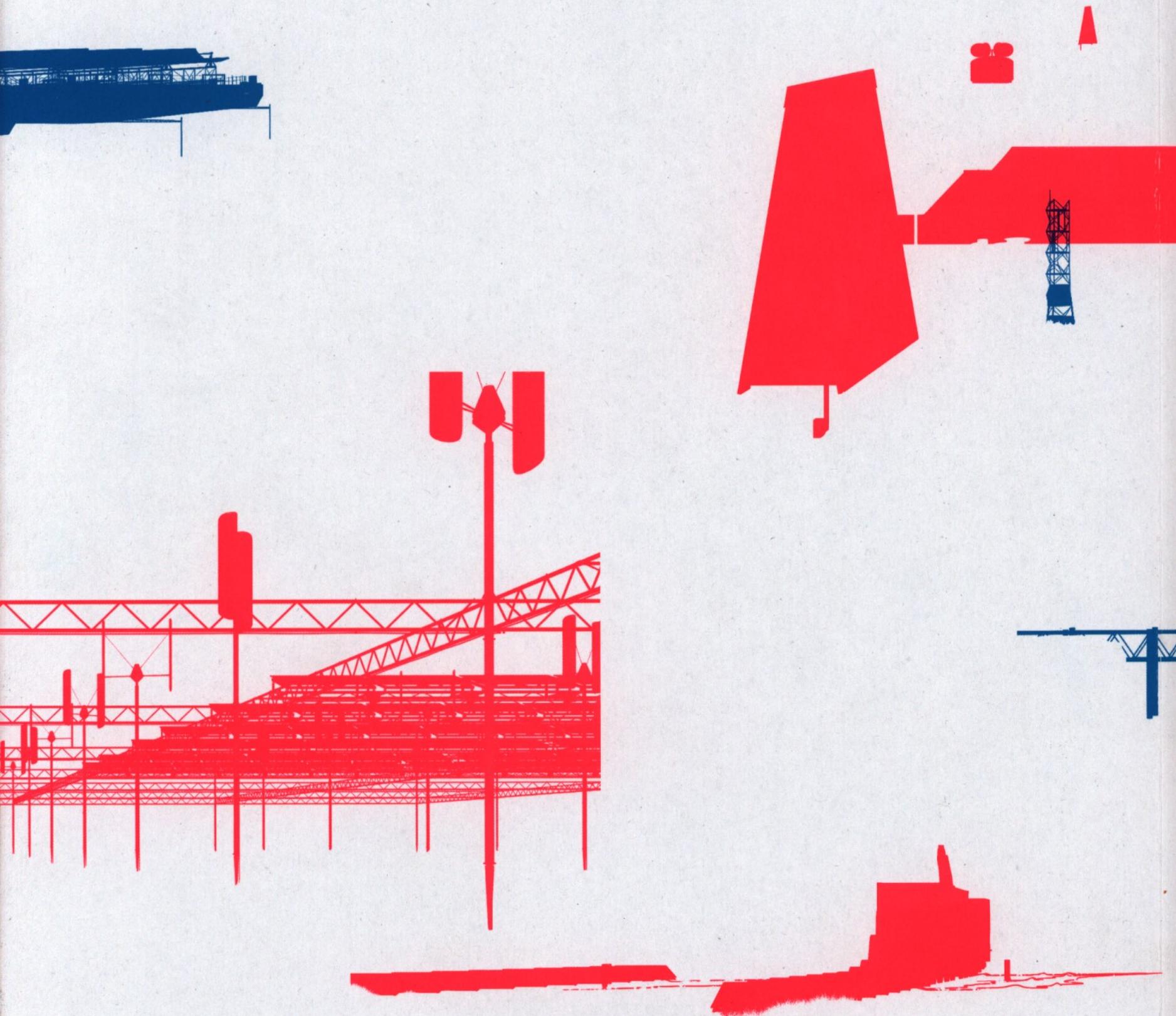
En cinq chapitres sont examinés les architectures et objets impliqués dans la conversion de l'énergie, du moulin à vent à la centrale nucléaire. Parcourir cette chronologie offre une leçon de choses qui permet de mieux comprendre la dualité énergie-matière de ces architectures ainsi redécouvertes. Un constat à l'issue de cette partie : la société actuelle s'est construite sur un principe d'accumulation, sans aucune transition d'une époque à l'autre. Architectures et paysages contemporains résultent aussi de la somme exponentielle des usages en matière d'énergie et de leurs impacts environnementaux.

« L'Atlas des architectures de l'énergie », premier inventaire de ce type, témoigne de la pluralité des modes d'exploitation des ressources. En utilisant les outils de l'architecte et de l'ingénieur, cet atlas tente d'établir l'écologie territoriale d'une série d'objets impliqués dans la production, la transformation et la consommation de l'énergie. Depuis la centrale nucléaire de Nogent-sur-Marne jusqu'à la traction animale en Alsace, ces contextes énergétiques français sont organisés par échelle spatiale décroissante et analysés sous les angles de l'énergie, des matières, de l'empreinte spatiale, des émissions de carbone... Véritable mise à nu énergétique, cet inventaire remet sur un pied d'égalité des situations qui semblaient *a priori* peu comparables.

« Demain les énergies légères » consiste en une approche prospective à travers six « paysages post-carbone », composés avec Olivier Campagne et qui illustrent la mise en œuvre de nouveaux usages et architectures. Sur ces six scènes franciliennes — paysage de toits parisiens, quartier pavillonnaire, plaine agricole, etc. —, la transformation légère de situations existantes permet de proposer des formes et approches inédites de l'énergie : grandes éoliennes aux fondations allégées, grilles aéro-solaires, quadricycles, mobilier climatique... Dans un contexte de contraintes écologiques majeures, le temps est court pour enclencher la symphonie des mutations. À partir des stocks rémanents, l'ingéniosité collective doit prendre le pouvoir pour bâtir les formes légères de demain.



Voir l'énergie autrement, dessiner l'invisible, mesurer l'impondérable pour relever le défi de l'habitabilité du monde, le rendre plus léger, libéré des énergies fossiles. Parmi les 30 000 milliards de tonnes d'artefacts fabriqués et amoncelés par l'humanité, *Énergies légères* tente d'évaluer le poids des architectures qui extraient, produisent, convertissent, transportent, stockent, distribuent de l'énergie et jalonnent nos paysages. Selon trois éclairages, historique, contemporain et prospectif, cet ouvrage explore les relations mouvementées entre formes et énergies, et révèle l'empreinte territoriale et environnementale de ces architectures. Il invite également à imaginer de nouvelles figures de l'énergie, sobres, simples, désirables, à juste échelle et respectueuses des espaces naturels — en un mot, plus légères.



9 782354 870744 34 €