

exposition  
9.11.2023 - 17.03.2024

# énergies légères

usages, architectures, paysages



dossier de presse

# énergies légères

usages, architectures, paysages

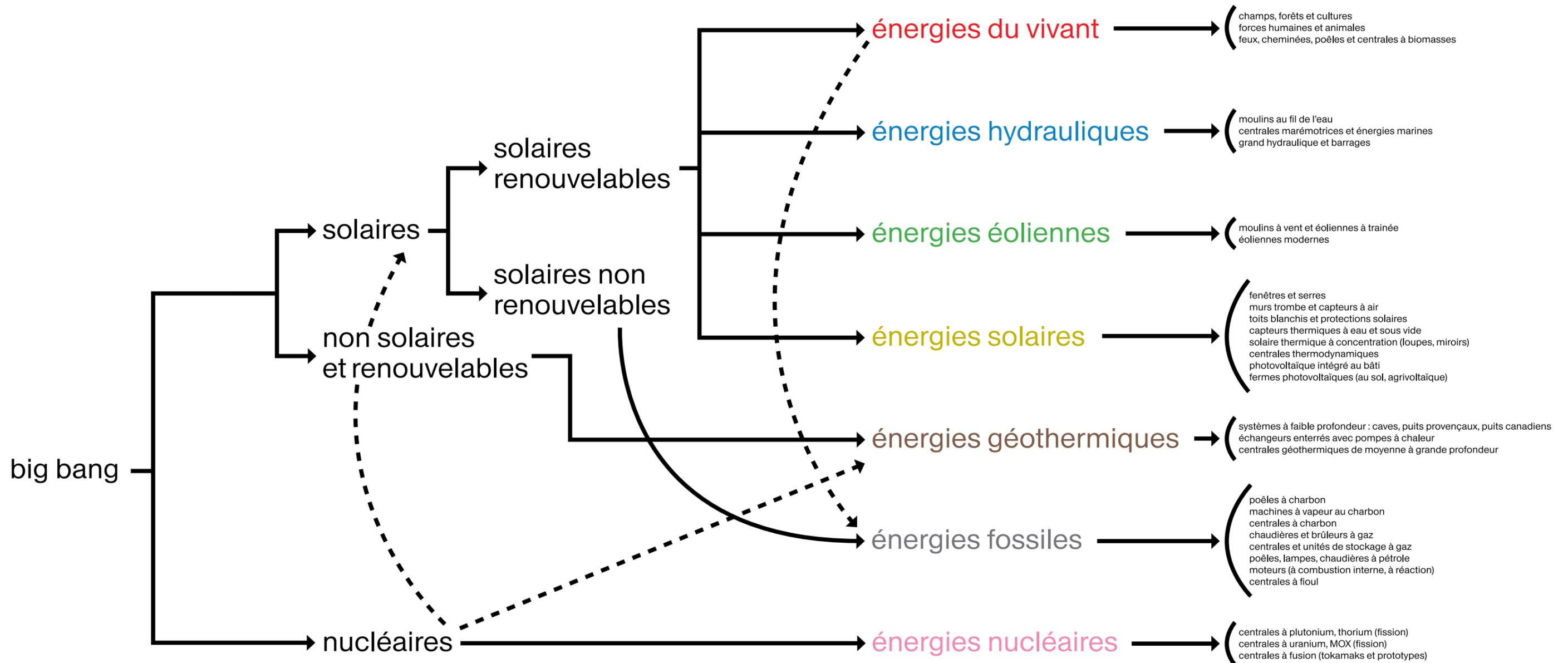
Voir l'énergie autrement, dessiner l'invisible, mesurer l'impondérable. Partager, transmettre, outiller, se donner les moyens de réparer ce monde. Le rendre plus léger et libéré des énergies fossiles : plus qu'un projet, un défi, presque aussi fou que Don Quichotte face aux moulins à vent. Énergies du vivant, hydrauliques, éoliennes, solaires, géothermiques, fossiles, nucléaires... Autant de types dont la conversion nécessite la construction d'architectures spécifiques, représentant une part des 30 000 milliards de tonnes de matières édifiées par l'humanité. Extraire, produire, convertir, transporter, distribuer, stocker de l'énergie est par essence « pesant ». L'analyse de ces infrastructures laisse apparaître la relation mouvementée entre architecture et énergie et questionne l'empreinte territoriale, esthétique et culturelle des techniques.

Des moulins à vent aux éoliennes, des premières utilisations du feu aux cheminées solaires, l'exposition présente des trajectoires de l'architecture énergétique, élément par élément, recense leur implantation actuelle et imagine leur avenir. Partant de l'imaginaire commun — les toits de Paris peints par Albert Marquet ou Camille Pissarro, les bords de Seine par Alfred Sisley, des plaines et forêts par Camille Corot, des intérieurs par Johannes Vermeer ou Pieter de Hooch —, l'exposition propose des paysages (légèrement) modifiés de notre quotidien ; six lieux et points de vue ordinaires où s'esquissent des lendemains post-carbone. Avec ces représentations inédites, avec des maquettes et prototypes, Énergies légères présente une exploration de lendemains, emprunts de sobriété, affranchis des énergies fossiles et libérés des matières non renouvelables.

# frise de l'énergie

En amont des familles, puis des architectures de l'énergie, une histoire cosmologique. Cette chronologie explicite les bifurcations des différentes formes de l'énergie, à travers les grandes étapes universelles : Big Bang, genèse du soleil et de la Terre, apparition de la vie sur Terre, ...

Cette frise détaille les 7 grandes familles terrestres de l'énergie ; elle fait apparaître leur origine, leur proximité et leur interdépendance. Tel un arbre du vivant, ce diagramme précise ensuite les différentes architectures de l'énergie, construites, exploitées (et parfois oubliées) par l'humanité.



# généalogie des formes de l'énergie



Quelques architectures de l'énergie emblématiques, élaborées au fil du temps, à Paris, en France et dans le monde, sont rassemblées ici. Les objets, maquettes, peintures, dessins, photographies de ce panorama - non exhaustif - sont organisés selon les sept familles d'énergie auxquelles ces architectures appartiennent: cinq familles de flux (énergies du vivant, hydrauliques, éoliennes, solaires et géothermiques); deux familles de stock (énergies fossiles et nucléaires).

Concevoir une fenêtre pour capter la chaleur du soleil en hiver; s'insérer dans le mouvement d'une rivière et extraire une fraction de son énergie cinétique; concentrer les rayons du soleil pour produire de la vapeur ... voilà quelques programmes qui conditionnent géométries et matériaux, formes et usages, paysages et climats.

Parcourir cette chronologie offre une « leçon de choses » qui permet de mieux comprendre la dualité énergie-matière des formes de l'énergie. Elle permet aussi de redécouvrir des architectures et des paysages d'un monde renouvelable, avant l'essor des énergies fossiles. Elle rappelle l'addition des nouveaux usages énergétiques, liés à l'ère thermo-industrielle, engendrant une multiplication par cinq de la consommation moyenne par habitant. Elle révèle que notre société s'est construite sur un principe d'accumulation, et qu'architectures et paysages contemporains résultent de la somme de nos usages énergétiques et de leurs impacts environnementaux.

# énergies du vivant

L'énergie est au fondement de toutes les formes de vie. Des microorganismes aux humains, en passant par l'incroyable diversité de la flore, le vivant - qui est apparu sur Terre il y a environ 3,8 milliards d'années - se déploie sous d'innombrables apparences et témoigne d'une grande capacité d'adaptation à une multitude de milieux, exploitant, de différentes manières, l'énergie disponible. La photosynthèse joue un rôle fondamental dans l'équilibre des écosystèmes. Elle convertit l'énergie solaire qu'elle emmagasine sous forme de matières organiques dans les organismes cellulaires, générant les composés carbonés constituant la source de la vie sur Terre.

L'énergie photosynthétique est à la base de toute la chaîne alimentaire, et à l'origine de bon nombre d'activités humaines telles que la cueillette, la chasse, la pêche, l'agriculture, la cuisson, le chauffage et la construction, qui reposent donc, indirectement, sur l'énergie solaire. Le vivant possède une capacité unique à « s'autoengendrer » et à stocker du carbone, mais il est vulnérable, exposé au changement climatique, à la pollution due aux activités humaines et à l'exploitation excessive des ressources naturelles. Face à la dégradation des écosystèmes et à la perte de biodiversité, il est urgent de mieux comprendre la relation complexe et fragile entre le vivant et l'énergie, et d'apprendre à habiter avec plus de légèreté les écosystèmes dont nous dépendons.



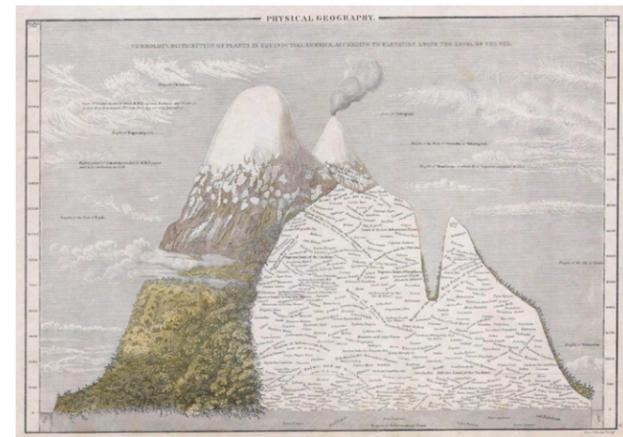
La Construction de Versailles, huile sur toile d'Adam Frans Van der Meulen, vers 1680.  
© Royal Collection Trust, His Majesty King Charles III 2023

## forces humaines et animales

Les énergies du vivant sont aussi celles délivrées par les muscles. Grâce à la biomasse ingérée, les animaux libèrent de l'énergie mécanique par contraction musculaire. Cela permet de transporter la matière, de hisser les matériaux, de labourer les sols et faucher les récoltes, ou encore de se déplacer. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Paris comptait 80 000 chevaux.

La puissance musculaire développée par l'homme est de l'ordre de quelques dizaines de watts. Sur une journée, l'énergie atteindra un kilowattheure pendant dix heures d'un travail épuisant. Aussi, assez tôt, les humains ont domestiqué les grands mammifères - bœufs, buffles, chevaux, mules, chameaux, chiens... - à des fins énergétiques. L'édification des châteaux (comme celle du Château de Versailles), palais, cathédrales et une multitude d'autres réalisations ont abouti grâce à l'aide de l'animal.

Entre l'an mil et le début du XIX<sup>e</sup> siècle, la population mondiale a triplé et cette croissance est l'une des conséquences de l'amélioration des techniques agricoles. Dès le Moyen Âge, la charrue lourde, le collier d'épaules et la stabulation participent à une révolution agricole. L'évolution des outils, tels les jougs, ces pièces d'attelage, augmente l'efficacité de la traction animale et facilite ainsi le rendement des récoltes. Aujourd'hui, une nouvelle symbiose avec les énergies animales reste à redécouvrir et à réinventer. Par ailleurs, les mobilités décarbonées de demain sont aussi musculaires: la marche, le vélo...



Répartition des plantes dans l'Amérique équinoxiale, selon l'altitude au-dessus du niveau de la mer, par le naturaliste Alexander von Humboldt, carte dessinée et gravée par George Aikman, 1839, d'après Alexander von Humboldt, *Essai sur la géographie des plantes*, Paris, F. Schoell, 1807. © The Picture Art Collection/Alamy Banque d'images

## champs, forêts et culture

La biomasse constitue une source essentielle d'énergies et de matières pour les humains. Depuis le Néolithique, grâce au travail humain (et souvent animal), savoirs et techniques ont permis d'augmenter le rendement des champs, forêts et cultures, en partageant les connaissances relatives à l'irrigation, aux climats, aux sols, à la botanique... Ces derniers sont répartis sur Terre selon les types de sols et les climats locaux, comme le représente le naturaliste allemand Alexander von Humboldt, en 1805, dans son *Essai sur la géographie des plantes*.

*La Moisson*, ce tableau peint par Pieter Brueghel l'Ancien en 1565, évoque cette relation indissociable entre l'agriculture et les sociétés humaines, rythmée par les saisons de récolte, que ce soit pour le blé, les céréales ou encore le bois. Cet « aménagement » de la photosynthèse a suscité des constructions spécifiques, des cabanes à foin dans les champs jusqu'aux silos à grains ; ainsi le silo imaginé par l'architecte et ingénieur Frei Otto (1925-2015) dans les années 1950. L'histoire de l'architecture entretient des liens étroits avec les usages agricoles.

Toutefois, le rendement de la photosynthèse est faible : un mètre carré d'un champ ou d'une forêt crée en général entre 0,1 et 0,5 watt par mètre carré. Aujourd'hui, plus de 70 % des terres agricoles sont utilisées pour la production de viande. Pourtant, l'alimentation carnée est peu efficace énergétiquement : pour une calorie de viande, l'animal en ingère en amont sept fois plus. Le changement climatique et l'érosion de la biodiversité questionnent l'exploitation intensive de la photosynthèse. La pluralité des usages (nourriture, combustibles, agrocarburants, matériaux biosourcés, etc.) génère des tensions spatiales et appelle à une nécessaire frugalité: régime alimentaire moins carné, production mesurée d'agrocarburants, sylviculture soutenable...



Intérieur avec une mère près d'un berceau, huile sur toile de Pieter de Hooch, entre 1665 et 1670. © Nationalmuseum, Stockholm

## feu, cheminées et poêles à biomasse

Le vivant est une source de chaleur. L'énergie chimique des chaînes carbonées issues de la photosynthèse est libérée lors de la combustion. Après la découverte du feu, il y a environ 400 000 ans, la biomasse est utilisée pour éloigner les prédateurs, chauffer, cuire (ou fumer) les aliments, éclairer (torche, lampe à huile), transformer les matériaux...

Avant les énergies fossiles, la biomasse a été le combustible de l'essor de l'humanité. Dans un foyer ouvert, le feu atteint des températures de 200 à 300 °C. L'évacuation des fumées a conditionné des formes, comme les tipis. L'apparition de la cheminée au Moyen Âge a amélioré à la fois températures et rendements. Au début du XIV<sup>e</sup> siècle, à Londres, chaque habitant consommait annuellement l'équivalent de 1500 kg de bois. Pour assurer durablement ce besoin, il fallait près d'un demi-hectare de forêt par habitant. Au XVI<sup>e</sup> siècle, le bois commence à manquer du fait de la construction navale et de la production de charbon de bois. Avec ce dernier, fours et cheminées atteignent des températures plus élevées et accélèrent le développement de la métallurgie et, plus tard, l'apparition de la machine à vapeur (grâce aux recherches de James Watt au XVIII<sup>e</sup> siècle).

Aujourd'hui, la biomasse est exploitée pour la cuisson dans beaucoup de pays et les sous-produits du bois sont aussi utilisés dans les réseaux de chaleur urbains. Les crises géopolitiques, la tension sur l'énergie, notamment les incertitudes sur l'approvisionnement en gaz, ont redynamisé l'installation d'inserts dans l'habitat individuel. Toutefois, la combustion peut impacter la qualité de l'air intérieur et avoir des effets néfastes sur la santé publique du fait des émissions de particules fines.

# énergies hydrauliques

Les énergies hydrauliques sont en très grande majorité dérivées du soleil (et plus marginalement de l'interaction gravitationnelle avec la Lune en ce qui concerne l'énergie de la marée). La source chaude émanant du soleil est à l'origine des mouvements dans les mers et dans les océans. L'astre anime le cycle de l'eau, et, ainsi, le courant des rivières et des fleuves. Alors que les océans et les mers couvrent 71% de la surface du globe, sur les continents, les espaces côtiers, les lacs, fleuves et rivières sont structurants pour les activités humaines et souvent essentiels à de très nombreux territoires.

Les formes de l'énergie associées à l'eau ont d'abord été celles des embarcations, mues par les énergies humaines (rames) et animales (halage), par celles du vent (voile), ou par les courants d'eau descendants. Après l'invention de la roue (vers -4000 avant notre ère), l'énergie des rivières et des fleuves est exploitée grâce aux moulins, qui comptent parmi les architectures de l'énergie convertissant la puissance des flux hydrauliques. Aujourd'hui, cette famille d'énergies constitue la première production électrique renouvelable à l'échelle mondiale, notamment par l'exploitation des grands barrages.



Vue de la Machine de Marly, de l'aqueduc et du château de Louveciennes, huile sur toile de Pierre-Denis Martin, XVII<sup>e</sup> siècle. © Château de Versailles

## moulins au fil de l'eau

Après l'invention de la roue (vers -4000 avant notre ère), le courant des rivières et des fleuves a donné naissance à une grande variété d'architectures de l'énergie. Largement disséminés, les moulins à eau ont été utilisés pour la meunerie, la scierie, les presses hydrauliques, le pompage de l'eau, etc.

En France, ces formes étaient très répandues jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle. À Paris, pour l'adduction en eau, la pompe de la Samaritaine fut construite entre 1684 et 1700, en reprenant des principes techniques de la machine de Marly. Cette dernière, érigée en 1681, fut fonctionnelle jusqu'en 1817. Située en aval sur la Seine, « lourde » de 100 000 tonnes de bois et de 17 000 tonnes de fer, elle délivrait l'équivalent de 500 kilowatts de puissance mécanique, soit sans doute l'un des pires rapports poids-puissance de l'histoire !

Pourtant, dans le lit d'une rivière, la densité de puissance est très vite élevée : 100 watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) pour un courant à 2 km/h ; elle augmente à plus de 1000  $W/m^2$  pour une rivière plus rapide (à 5 km/h). Pour convertir ce flux, les formes et les mécanismes doivent résister à la forte pression de l'eau. Aujourd'hui, le petit hydraulique (dit au fil de l'eau) reste une énergie intéressante, dotée d'une production plutôt régulière et généralement prévisible, mais devant intégrer les évolutions des régimes d'eau liées au changement climatique.

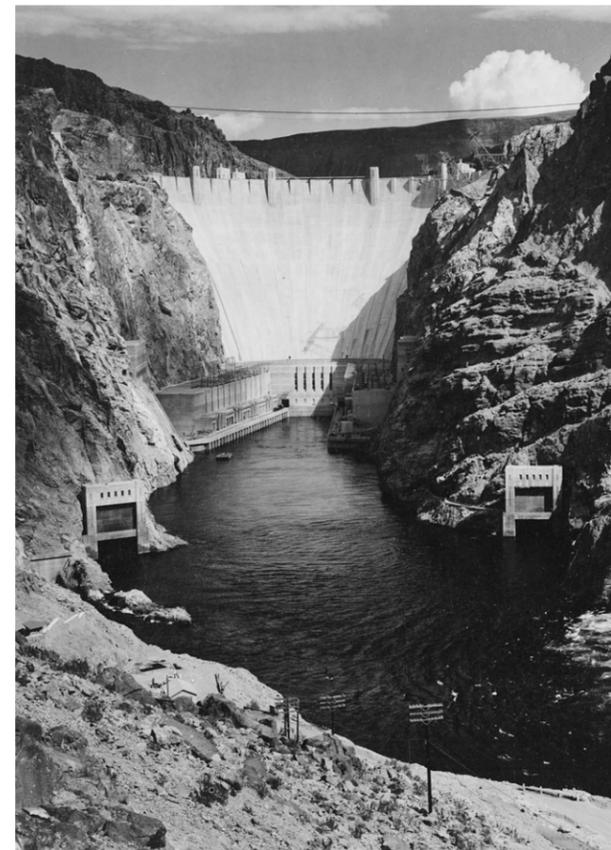


L'usine marémotrice de la Rance (La Richardais et Saint-Malo, Ille-et-Vilaine), Robert Gibrat et Albert Caquot, ingénieurs, Louis Arretche, architecte-conseil, 1966. Photographie, juin 1996. © Gérard Halary/EDF

## centrale marémotrice et énergie marine

L'énergie marémotrice n'est pas d'origine solaire ; elle est liée aux forces de gravité s'exerçant entre la Terre, la Lune et le Soleil. Cette interaction déforme de façon périodique les volumes océaniques. Le gisement de puissance des marées est évalué à 3,5 térawatts, ce qui reste marginal comparé au gisement solaire (elle en représente le cinquante-millième). L'énergie marémotrice a connu quelques développements en France, comme les moulins à marée en Bretagne (à Rothéneuf en 1867 par exemple), ou l'usine marémotrice de la Rance, en activité depuis 1966, avec une capacité électrique installée de 240 mégawatts.

Les énergies marines (courants marins, houles, gradients de température, etc.) sont en revanche issues de l'énergie solaire. Le gisement est colossal : 67,5 térawatts (ou 67500 milliards de watts), presque le quadruple de la consommation énergétique mondiale. Ces formes restent balbutiantes et les quelques prototypes d'hydroliennes, systèmes houlomoteurs, etc. n'ont, à ce jour, pas franchi le cap du déploiement à grande échelle. Pourtant la France dispose du second territoire maritime mondial. L'énergie de l'eau est aussi utilisée comme gisement thermique (thalassothermie) pour des réseaux de froid et/ou de chaud (comme à Marseille avec le réseau Massileo inauguré en 2017).



Le barrage Hoover sur le fleuve Colorado, près de Boulder City (Arizona et Nevada, États-Unis), construit en 1936. © PF-(usna)/Alamy Banque d'images

## grand hydraulique et barrages

Le grand hydraulique correspond aux plus grandes capacités électriques installées au monde, avec un cumul de 1,35 térawatt (1350 milliards de watts). Les barrages sont des formes en prise avec la grande topographie. Avec leur retenue d'eau, ils transforment durablement les paysages, de l'amont à l'aval des cours d'eau qu'ils interceptent, et interfèrent sur les écosystèmes et les activités humaines.

La conversion de l'énergie du cycle de l'eau réclame beaucoup de surface pour capter les précipitations et une grande hauteur de chute. Il faut donc un bassin versant gigantesque pour parvenir à une puissance importante. Quant à la matière, la retenue d'eau doit résister à une pression croissante avec la hauteur du volume retenu. À un mètre de profondeur, la pression qui s'exerce sur une paroi est d'une tonne par mètre carré. Les barrages sont bâtis selon une grande variété de géométries, réclamant souvent des quantités importantes de béton armé et de déblais : barrages gravitaires (comme à Grand'Maison dans l'Isère, 1988) ou barrages poids-voûte (tel le barrage Hoover dans le Colorado, aux États-Unis, 1936). En France, l'hydraulique représente la seconde source d'électricité derrière le nucléaire, couvrant entre 10 et 12 % de la production électrique nationale. Quelques ouvrages participent aussi au stockage d'énergie, par le biais du pompage-turbinage, et apparaissent intéressants pour le pilotage de l'adéquation entre l'offre et la demande d'électricité. En France, les barrages se concentrent dans les régions Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Midi-Pyrénées et Alsace. Toutefois, le dérèglement climatique peut avoir un impact sur leur production.

# énergies éoliennes

Les énergies éoliennes sont issues de l'énergie du soleil, source chaude à l'origine des mouvements météorologiques, dont les déplacements d'air dans l'atmosphère. Le vent matérialise cette énergie cinétique et ses différentes formes.

La domestication du vent débute vers -3300 avant notre ère, sur les rives du Nil, où les voiles installées sur des bateaux égyptiens sont probablement les premières formes qui apparaissent. Les ancêtres des éoliennes tirent les enseignements de la voile, et de la façon de faire « travailler » la pression du vent. Depuis plus de cinq mille ans, ces formes ont largement évolué et ont totalement changé d'échelle : certaines éoliennes maritimes dépassent aujourd'hui 10 mégawatts de capacité !

À l'échelle mondiale, le gisement éolien est évalué à 72 térawatts (72 000 milliards de watts), soit près de quatre fois la consommation énergétique actuelle. La densité de puissance d'un flux d'air (comme celle d'un flux d'eau; l'air est cependant 800 fois plus léger) croît avec le cube de sa vitesse : c'est-à-dire qu'elle est, par exemple, multipliée par huit lorsque la vitesse du vent passe de 10 à 20 km/h.

La disponibilité de l'énergie éolienne est contrastée selon les géographies : certaines zones du monde n'ont presque pas de vent, alors que d'autres sont très venteuses. La France possède le deuxième gisement éolien européen, après la Grande-Bretagne. Cette disponibilité de la ressource conditionne la visibilité de ces architectures du vent dans les paysages.

## éoliennes modernes

La première éolienne utilisée pour produire de l'électricité date de 1888 ; Paul La Cour (1902-1956) est considéré comme le père des éoliennes modernes. Depuis un siècle et demi, des progrès ont été réalisés dans la conception permettant d'accroître rendements, puissances et fiabilités.

Aujourd'hui, les éoliennes terrestres ont une capacité d'environ 5 mégawatts (MW), et souvent plus de 10 MW pour les maritimes. Ces éoliennes sont dites rapides, car la vitesse en extrémité de pales peut atteindre trois à quatre fois celle du vent. Comme les moulins, elles s'orientent pour se placer frontalement par rapport au vent. Pour des turbines plus petites, telle celle conçue par l'agence de l'architecte Renzo Piano (2013), les rotors bipales présentent un intérêt paysager : en l'absence de vent, les pales s'alignent avec le mât et la forme devient verticale. À échelle plus modeste, les éoliennes Piggott promeuvent l'autoconstruction et recourent à des matériaux biosourcés. Les éoliennes Darrieus sont des variantes à axe vertical, qui exploitent l'effet de portance du vent. Profilées comme des ailes d'avion, leurs pales sont soumises à des forces centrifuges importantes. Ceci explique la forme en fuseau utilisée pour la plus grande Darrieus jamais construite, celle de Cap-Chat, au Québec (4 MW).

En 2022, la capacité installée dans le monde a atteint 906 gigawatts. En France, l'éolien est la deuxième source de production d'électricité renouvelable après l'hydroélectricité. Près de 10 000 éoliennes terrestres sont réparties sur plus de 2000 sites et couvrent environ 8% de la consommation électrique. Selon les scénarios énergétiques envisagés, il faudrait à terme entre 14 000 à 35 000 mâts éoliens.



Hugh Piggott sur l'une de ses éoliennes autoconstruites, Scoraig (Écosse), s.d.  
© Hugh Piggott



Vue cavalière de Paris prise du dessus de Belleville, huile sur toile de Charles-Léopold van Grevenbroeck, 1741. © Paris-Musées/Musée Carnavalet – Histoire de Paris

## moulins à vent et éoliennes à traînée

La marine à voile et les techniques de toiles tendues ont inspiré la fabrication des premières machines.

Les moulins à vent de Nashtifan, en Iran, présentent l'avantage de ne pas réclamer de système d'orientation en fonction de la direction du vent. La dissymétrie de la forme (ou de l'obstacle statique) convertit le vent en mouvement du rotor autour de son axe vertical. Ces éoliennes sont dites lentes (ou à traînée aérodynamique). Ces architectures sont rudimentaires, leur rendement médiocre, mais elles démarrent par vent faible. Ces équipements prendront plus tard le nom de l'inventeur Sigurd Johannes Savonius, qui les met au point dans les années 1920 ; une éolienne de ce type avait déjà été conçue en 1887, par l'Écossais James Blyth.

Les moulins à vent représentés dans les dessins et peintures sont des éoliennes à axe horizontal. Ils apparaissent vers 800. Ces formes exploitent directement la puissance générée pour la meunerie, le pressage d'huile, le pompage de l'eau, etc. Ces architectures s'orientent suivant la direction du vent et du fait aussi de connaissances limitées en aérodynamique, leur rendement ne dépasse guère 15 à 20 %. Ainsi, par un vent de 15 km/h, pour un moulin dont le rotor mesure 20 mètres de diamètre, la puissance mécanique est de l'ordre de 2 kilowatts. En 1850, il y avait en Europe plus de 50 000 moulins à vent (dont 9000 en France, parmi lesquels ceux implantés sur la butte Montmartre, à Paris).

Les éoliennes multipales, hautes d'une dizaine de mètres, sont particulièrement reconnaissables. Elles orientent leur rotor avec un gouvernail et servent généralement au pompage de l'eau. Leur utilisation directe pour créer de la chaleur (par simple friction) peut aussi constituer une variante pour animer le compresseur d'une pompe à chaleur : une façon de produire du chaud (ou du froid) directement à partir du vent.

# énergies solaires

L'énergie solaire est un rayonnement électromagnétique composé de lumière visible, d'infrarouges et d'ultraviolets. La température du rayonnement est d'environ 6000 °C et l'énergie solaire se prête donc à une grande variété d'usages énergétiques, au-delà de ses apports naturels en lumière et en chaleur. En concentrant la lumière du soleil, il est possible d'atteindre des températures de quelques milliers de degrés, puis de convertir ce flux en énergie mécanique par exemple.

L'énergie solaire est disponible partout et aucune région du monde n'en est dépourvue. C'est une vertu importante de cette énergie vis-à-vis des énergies de stock, qui, elles, sont extrêmement localisées. À l'échelle mondiale, l'écart du gisement

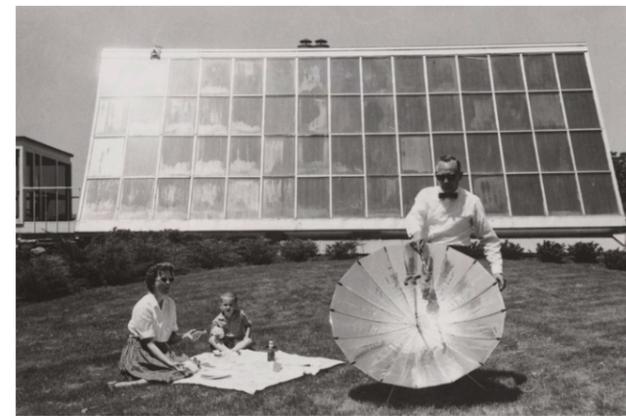
n'est que d'un facteur trois d'un endroit à l'autre et la densité de puissance moyenne du rayonnement solaire est de 169 watts par mètre carré.

Avec un rendement théorique parfait (soit de 100 %), une douzaine de mètres carrés par personne seraient suffisants pour couvrir les besoins d'un humain. En France, l'énergie solaire reçue par le département du Val-d'Oise équivaut ainsi à la totalité de la consommation nationale. Aussi, les énergies solaires recouvrent une grande variété de formes qui permettent de transmettre lumière et chaleur ; de concentrer le « feu solaire » pour chauffer les aliments ; de produire de la vapeur ou de faire fondre des matériaux ; ou encore de convertir le flux électromagnétique en électricité.

lumineux. Avec les serres et pour l'horticulture, l'architecture devient un capteur solaire : le Crystal Palace construit par le jardinier Joseph Paxton pour l'Exposition universelle de Londres en 1851 en est un exemple célèbre. L'invention du vitrage isolant (avec le verre Thermopane breveté par l'ingénieur américain Charles D. Haven 1934) offre de diviser par deux les déperditions thermiques par rapport à un simple vitrage. En 1948, la scientifique Maria Telkes met au point une maison autosuffisante aux trois quarts de ses besoins dans le cadre du programme de recherche sur l'énergie solaire du Massachusetts Institute of Technology qui aboutira à la construction de cinq autres Solar Houses entre 1938 et 1978. Utilisé à bon escient, le vitrage isolant fait pénétrer plus d'énergie qu'il n'en perd.

Les formes du solaire thermique tirent parfois parti du tirage thermique (l'air chaud monte), notamment avec l'invention du mur Trombe-Michel, récemment adapté par l'agence d'Armand Nouvet pour un immeuble de logements dans Paris (2011-2013). Dans une variante contemporaine, l'agence Harquitectes a intégré des cheminées solaires dans un centre civique, à Barcelone, afin de renforcer la ventilation naturelle (2015) : des extensions verticales de l'architecture sans combustion.

Ces formes solaires se déclinent aussi pour la production d'eau chaude (comme les capteurs solaires installés sur la Maison Blanche, à Washington, par le président Jimmy Carter) ou pour les réseaux de chaleur. Le changement climatique induit une contrainte accrue sur la colorimétrie de la transparence, sur les risques qu'elle peut faire encourir aux constructions, en amplifiant les inconforts en situation caniculaire. Les vitrages zénithaux, en toiture, non protégés sont de potentiels générateurs de surchauffe.



Solar House IV, 1959  
Solar Energy Research, projet de recherche du Massachusetts Institute of Technology (MIT) sur la faisabilité technique et économique de l'utilisation exclusive de l'énergie solaire pour produire de la chaleur, mené pendant plusieurs décennies.  
© Courtesy MIT Museum

## fenêtres, serres et capteurs thermiques

Le solaire thermique est la plus ancienne des énergies solaires et il est étroitement lié au verre, dont les premières traces de fabrication remontent à plus de 4000 ans en Mésopotamie. Dès le I<sup>er</sup> siècle, son emploi dans la construction permet de bénéficier des apports thermiques et



Four solaire, Henri Vicariot, architecte, et Félix Trombe, ingénieur, Odeillo (Pyrénées-Orientales), 1969. Photographie Thomas Bellanger, 2021. © Thomas Bellanger

## solaire thermodynamique ou à concentration

Sans concentration optique, il est difficile d'atteindre des températures supérieures à 100 °C. Pour dépasser ce seuil, il est nécessaire de concentrer les rayons solaires grâce à des loupes ou des miroirs ; tels ceux mis en place par le physicien grec Archimède, destinés à mettre feu aux gréments romains au large de Syracuse (en 212 avant J.-C.). Au cours des années 1860, Augustin Mouchot parvient à fabriquer des miroirs de grand diamètre ; pour l'exposition universelle de 1878, l'inventeur français présente une imprimerie solaire capable de publier cinq cents tirages par heure.

Le solaire thermodynamique exploite la quintessence du flux solaire : en concentrant les rayons pour activer un cycle thermodynamique, il devient possible de produire de l'électricité comme dans la centrale d'Odeillo (Pyrénées-Orientales) ou de faire fondre des métaux (tel le Solar Metal Smelter, cette machine créée par Jelle Seegers, dont la loupe permet d'atteindre plus de 1000 °C au foyer). Les tours solaires (ou les montagnes solaires), d'autres formes qui tirent parti de la convection naturelle sur une très grande hauteur (au moins 200 mètres), peuvent aussi générer de l'électricité.

Le solaire à concentration réclame idéalement des climats à fort rayonnement direct. Le solaire thermodynamique comprend une importante variété de formes : les centrales à tour (dont l'utopie de leur intégration urbaine a été dessinée par les architectes Georges et Jeanne-Marie Alexandroff), les centrales avec un miroir secondaire, les centrales à faisceau descendant, les centrales cylindro-paraboliques... Pour des usages domestiques, le barbecue solaire permet une cuisson sans combustion.



« Forest », NMBS Power Station (Belgique), Baukunst, architectes, 2019.  
© Baukunst / Artefactorylab – Olivier Campagne, Maxime Delvaux

## systèmes photovoltaïques

Le photovoltaïque est une forme récente de l'énergie solaire, produisant un courant électrique continu à partir du rayonnement du soleil. Il diffère de la grande majorité des autres formes solaires qui exploitent d'abord la chaleur. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel (1839), et les premières expérimentations ont lieu aux États-Unis, comme sur les toits de New York, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Aujourd'hui, la technologie basée sur le silicium est la plus répandue, avec un rendement de l'ordre de 20 %. À Paris, correctement exposé, un panneau d'un mètre carré produira entre 150 et 200 kWh d'électricité par an, soit un flux moyen d'environ 20 W/m<sup>2</sup>.

Les formes d'intégration du photovoltaïque sont très variées, pour ce qui est des situations d'implantation comme des échelles : fermes photovoltaïques de toute taille, agrivoltaïsme (par exemple avec des poutres de câbles portant un système photovoltaïque orientable), ou intégré à l'enveloppe des bâtiments (comme les maisons en bande de l'écoquartier Vauban à Fribourg- en-Brigau, en Allemagne, ou sur la toiture de la halle Pajol à Paris, dans le 18<sup>e</sup> arrondissement).

L'apparition des panneaux photovoltaïques bifaces suscite aussi l'émergence de formes inédites. Pour le projet « Forest », le bureau Baukunst a imaginé un écran solaire inséré verticalement dans l'entremêlement des voies et des caténaires : un « écran producteur » dans un océan de consommation électrique.

# énergies fossiles

Les énergies fossiles sont des vestiges d'énergies du vivant, des restes de plantes ou d'animaux, transformés pendant des millions d'années dans les sols, sous des conditions particulières de température et de pression. Charbon, gaz et pétrole dérivent donc de l'énergie solaire. Depuis plus de deux siècles, les énergies fossiles sont partout : dans les processus d'extraction et de transformation de la matière (pompage d'eau dans les mines, coke des hauts fourneaux, cimenteries, plasturgie...); indissociables des constructions (poêles, chaudières et cuisinières à gaz, réseaux de chaleur aux fossiles, engins de chantier...); inséparables de l'agriculture industrielle (carburants des machines agricoles, pétrochimie des engrais...); ou encore, devenues

indispensable aux transports (machines à vapeur, moteurs des deux-roues, voitures, camions, bateaux, réacteurs d'avion...).

Aujourd'hui, les énergies fossiles couvrent plus de 80 % de la consommation mondiale d'énergie. Elles représentent un flux de 15 térawatts extrait du sol, parfois à grandes profondeurs (jusqu'à 3000 mètres pour certains puits de pétrole). En pompant frénétiquement ces trésors souterrains, « élixirs de biomasse », nous avons dilapidé en quelques centaines d'années un capital énergétique constitué pendant des millions d'années. Chaque année, l'usage des énergies fossiles libère plus de 40 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère; or, le dioxyde de carbone est l'un des principaux responsables du dérèglement climatique...



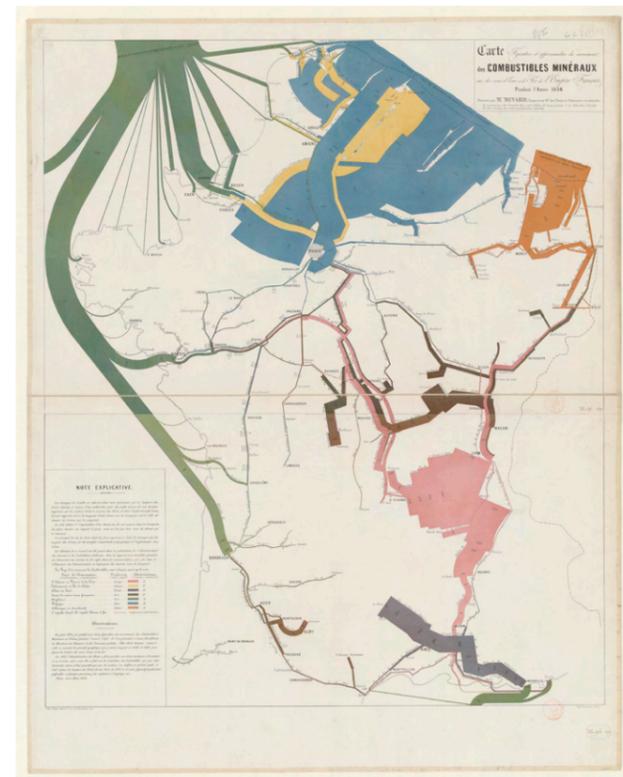
Gazomètres, usine à gaz de la Villette, Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz, (Paris). Photographie d'Albert Fernique, 1878-1879. © École nationale des Ponts et chaussées

## gaz

Le gaz fossile (appelé gaz naturel) est principalement composé de méthane. Son essor est lié à la révolution industrielle, notamment à l'urbanisation dans quelques pays, à la demande en éclairage public et en énergie pour les industries. Les premières usines à gaz naissent en Angleterre à partir des années 1810. En chauffant du charbon, elles produisent du gaz de houille (ou gaz d'éclairage), qui est stocké dans des réservoirs. Des conduites souterraines l'acheminent vers les lampadaires des rues et vers les bâtiments, il est ensuite brûlé pour apporter la lumière.

À mesure que les villes se développent, les besoins en gaz augmentent, tout comme la nécessité de le stocker. Les gazomètres font alors leur apparition: ces grands réservoirs cylindriques ou sphériques permettent de réguler la production et la distribution du gaz en fonction de la demande. Leurs structures deviennent emblématiques des paysages urbains industrialisés.

Vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la consommation du gaz s'étend à d'autres domaines que l'éclairage. Les chaudières à gaz, présentes dans les usines, les bâtiments commerciaux et certains logements aisés, se multiplient peu à peu. Moins contraignantes que les poêles à charbon ou à bois, elles déchargent les habitants de la logistique pour alimenter le foyer. L'essor de l'électricité au début du XX<sup>e</sup> siècle conduira à un déclin progressif de l'utilisation du gaz d'éclairage. Aujourd'hui, le gaz représente plus d'un cinquième de la consommation énergétique mondiale; en 2022, il a fourni près de 20 % de l'électricité mondiale.



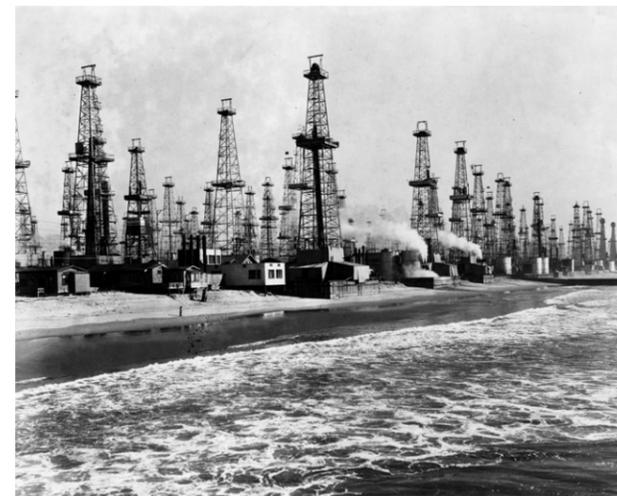
Carte figurative et approximative du mouvement des combustibles minéraux sur les voies d'eau et de fer de l'Empire français pendant l'année 1856, Charles-Joseph Minard ingénieur, Paris, Regnier et Dourdet, 1857. © BnF

## charbon

Le charbon est d'abord une roche sédimentaire formée à partir de la dégradation des végétaux, un processus nécessitant au moins 300 millions d'années. L'essor du charbon (comme la tourbe et le lignite) commence au XIX<sup>e</sup> siècle et offre alors un substitut à la pénurie de bois.

Depuis l'invention de Thomas Newcomen (première machine à vapeur industrielle, 1712), on sait transformer le mouvement linéaire du piston de la machine à vapeur en balancier. Dorénavant, on pompe l'eau hors des mines grâce au combustible extrait; on peut actionner des roues pour l'industrie et pour le transport. Après quelques décennies, une révolution est en marche, un accroissement des usages énergétiques, notamment pour le transport (développement des chemins de fer et des embarcations à vapeur). Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, la part du charbon dans la production mondiale passe de 3% à plus de 50 % et permet une expansion importante de la production industrielle dans plusieurs pays.

Le charbon dessine une nouvelle géographie (comme sur la carte de l'ingénieur civil Charles-Joseph Minard) et de nouveaux paysages : en amont, extractions à ciel ouvert de la tourbe, infrastructures des mines et terrils, formant, à l'horizon, des reliefs inhabituels; en production, hauts fourneaux, architectures industrielles, nouvelle alliance énergie-matière, charbon-acier. Dans les villes, de hautes cheminées s'invitent dans la skyline et les quais de la Seine participent au transport du charbon (comme à celui du bois durant les siècles précédents); enfin le poêle Franklin (ou la Salamandre) redessine la canopée des toits avec leurs cheminées. Aujourd'hui, l'usage du charbon est le premier émetteur de CO<sub>2</sub>. Il reste la deuxième énergie consommée (27%) dans le monde après le pétrole.



Puits de pétrole, Venice Beach, Los Angeles (Californie, États-Unis), 1952. © Library of Congress

## pétrole

Pour les historiens de l'énergie, l'usage globalisé du pétrole signe le départ de ce qu'on appelle la « grande accélération ». Depuis les premiers derricks en bois du colonel Drake dans l'Est américain et ceux de Bakou en Azerbaïdjan, dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, le pétrole, considéré au début comme un substitut à l'huile de baleine pour l'éclairage, voit son essor lié au succès de la Ford T, puis au développement de l'automobile.

Aussi, et, par comparaison au charbon, son extraction est plus facile et réclame moins d'efforts. Très dense énergétiquement (près de 12 kilowattheures par kilogramme), sa fluidité facilite sa distribution et son stockage. Utilisé comme carburant d'un moteur thermique, un seul litre de pétrole peut dégager autant d'énergie mécanique que trois personnes pendant une journée de travail acharné. Avec le pétrole, les paysages mutent à grande vitesse, au début du XX<sup>e</sup> siècle, une partie de l'Ouest américain devient ainsi méconnaissable, comme la côte de Los Angeles. Carburants des moteurs, le pétrole voit aussi son usage se diversifier comme composants de matériaux (plasturgie) et recouvre sols et routes (bitume).

Ingrédient central de la modernité depuis les années 1950, omniprésent, le pétrole reste la première énergie consommée : en moyenne, l'équivalent de près de 800 watts par humain, avec de grandes disparités selon les pays et les niveaux de richesse. Malgré la conscience de la crise climatique, la demande de pétrole a pourtant franchi un triste seuil, celui des 100 millions de barils produits par jour en 2019. Sa consommation n'a donc toujours pas entamé sa nécessaire et urgente décroissance alors que le dérèglement climatique se révèle plus précoce encore.

# énergies géothermiques

L'énergie géothermique, comme l'énergie marémotrice (de la marée), constitue une famille énergétique particulière : ce sont toutes deux des formes renouvelables non issues du soleil. La géothermie correspond au flux de chaleur de l'activité nucléaire du noyau terrestre. Sa densité de puissance moyenne est bien plus faible que l'énergie solaire : de l'ordre de 0,006 watt par mètre carré ( $W/m^2$ ) à comparer aux 169  $W/m^2$  du solaire, et sa distribution est hétérogène à la surface du globe.

Il y a deux mille ans, les Romains et les civilisations du Japon utilisaient déjà l'eau tiède des sources géothermales pour se laver et pour cuisiner. Souterraine, l'énergie du sol est discrète, sa présence se manifestant généralement dans les « racines » de l'édifice. La géothermie de faible profondeur bénéficie des apports solaires des couches

superficielles du sol. De ce point de vue, un puits canadien (ou un puit provençal) peut être considéré comme une forme hybride, un mariage entre l'énergie géothermique et solaire. Il en est de même pour les échangeurs enterrés qui, associés à une pompe à chaleur, offrent des systèmes de production thermique efficaces pour chauffer une construction.

Localement, la géothermie peut jouer un rôle important dans l'approvisionnement d'un territoire : ainsi, quelques centrales électriques exploitent les sources chaudes de grande profondeur en Islande ou en Martinique. Pour la production de chaleur également, telle la nappe aquifère du Dogger, qui, avec une température comprise entre 55 et 80 °C à 1500 mètres de profondeur, irrigue les réseaux de chauffage par géothermie en Île-de-France.



Centrale thermique de Geyserville (Californie, États-Unis), 1982.  
© U.S. Department of Defense Imagery

# énergies nucléaires

Les énergies nucléaires comprennent deux sous-familles : la fusion et la fission. La fusion des noyaux légers est la source de la puissance du soleil. L'exploitation civile de l'énergie de fusion fait l'objet de recherches destinées à obtenir la fusion dite « contrôlée » – pour le moment, l'homme n'a su créer, à partir de cette énergie, qu'une arme de destruction (la « bombe H »). Le projet de réacteur à fusion nucléaire ITER, mené en France, dans le centre de recherche de Cadarache (Bouches-du-Rhône), constitue la plus importante expérimentation scientifique internationale. D'autres initiatives sont à l'œuvre, mais la promesse d'un déploiement à grande échelle ne pourrait, au mieux, se concrétiser qu'au cours de la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle.

La fission est répandue pour les usages électriques. Elle consiste à séparer des atomes lourds (uranium enrichi, marginalement plutonium ou thorium). Le défaut de masse de la séparation crée une chaleur intense qui est utilisée pour obtenir de la vapeur ; cette vapeur fait tourner un générateur produisant à son tour de l'électricité. Les centrales nucléaires

nécessitent des systèmes de refroidissement pour évacuer la chaleur émise. Les tours de refroidissement, parfois hautes de 150 mètres, sont la principale « signature paysagère » du nucléaire. En France, pour penser l'intégration de ces formes, quelques centrales nucléaires ont fait l'objet de recherches, comme lors du plan gouvernemental, dit « plan Messmer », de 1974, ayant pour but une accélération du programme électronucléaire français ; dans ce cadre, on peut citer les travaux de l'architecte Claude Parent (1923-2016) autour des surfaces hyperboloïdes des tours réfrigérantes.

Aujourd'hui, plusieurs initiatives cherchent à déployer des réacteurs de plus faible puissance, plus facilement industrialisables (small modular reactor ou SMR). Actuellement, 443 réacteurs nucléaires sont en activité dans le monde. Les États-Unis en comptent 93, la France 56, la Chine 53 et la Russie 37. Avec environ 10 % de la production mondiale, le nucléaire est la troisième source d'électricité.



Centrale nucléaire EDF, Avon (Indre-et-Loire), Pierre Dufau, architecte, 1963. Photographie 1982. © Roger-Viollet

# débats, luttes et controverses

Les controverses émaillent l'histoire de nos rapports à l'énergie. Les débats, parfois les luttes, voire les affrontements, impliquent de nombreux acteurs – citoyens, riverains, militants, associations, organisations non gouvernementales (ONG), élus, scientifiques, intellectuels, partis politiques – autour d'enjeux environnementaux, économiques, démocratiques, culturels, esthétiques, ou encore de justice sociale, de santé ; ce à quoi répond une grande variété de modes d'action.

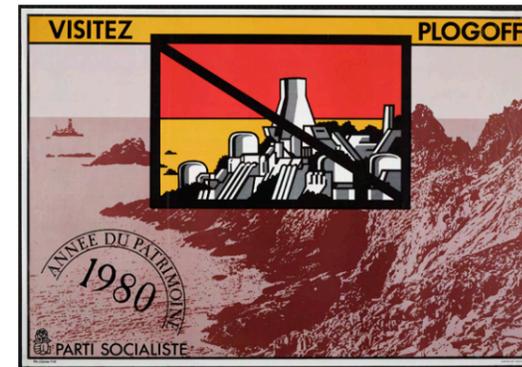
Au cours des cinquante dernières années, les enjeux et les thèmes ont évolué. Dans les années 1970-1980, des mouvements s'opposaient au nucléaire (notamment quant à son impact paysager), d'autres fustigeaient les pollutions engendrées par les marées noires (celle causée par le naufrage du pétrolier Amoco Cadiz en mars 1978, dont le chargement s'est déversé sur les côtes bretonnes, est emblématique). Cette période voyait parallèlement émerger l'écologie politique, des initiatives citoyennes et associatives, ou encore l'apparition de politiques publiques encourageant la limitation des consommations d'énergie en réaction aux chocs pétroliers.

Aujourd'hui, les controverses et résistances s'expriment à travers des zones à défendre (ZAD), interrogeant l'usage et le mode d'occupation des sols, par des actions radicales questionnant l'impact écologique des ressources (blocage de cimenteries par des militants du mouvement Extinction Rebellion), ou alertant sur l'urgence de la rénovation énergétique des bâtiments (collectif de résistance civile Dernière Rénovation). Les actions contemporaines interpellent notre ébriété énergétique, pointent des modes de vie incompatibles avec l'urgence écologique et alertent sur

une nécessaire sobriété : actions contre les SUV, ces gros véhicules utilitaires, ou pour l'extinction nocturne de la lumière des magasins, campagnes contre l'exploitation animale, dénonciation du tourisme aérien ou des jets privés, manifestations ou squats contre la sous-occupation des logements ou le mal-logement, etc.

L'essor des renouvelables suscite aussi des résistances : des associations s'organisent pour contrer le développement des éoliennes (Vent de Colère !); l'éolien maritime suscite la désapprobation d'une partie des pêcheurs ; le solaire photovoltaïque provoque son lot de controverses, notamment quand son implantation touche les espaces naturels (déboisement forestier, usage d'espaces agricoles, etc.), ou dès lors qu'il jouxte un contexte bâti patrimonial. Les enjeux liés au stockage des déchets nucléaires font naître des oppositions ; ainsi, Cigéo, le projet d'enfouissement des déchets de moyenne et haute activité à Bure, dans la Meuse, est largement contesté.

Concernant les énergies fossiles, les mouvements restent souvent antagonistes, tiraillés entre les actions pour mettre fin à l'extraction des hydrocarbures (luttes contre l'extension de mines de charbon en Allemagne, actions contre les gaz de schiste en France), dénonçant l'inconséquence de quelques grands groupes pétroliers (telle la controverse quant au mégaprojet de construction d'un oléoduc de 1500 kilomètres, mené par TotalEnergies en Afrique, entre Ouganda et Tanzanie) ; mais, en cas de renchérissement du prix des carburants, les paradoxes se réveillent et suscitent d'autres réactions (notamment en France, avec le mouvement des Gilets jaunes apparu en octobre 2018), illustrant la difficulté à migrer vers un régime sans énergies fossiles.



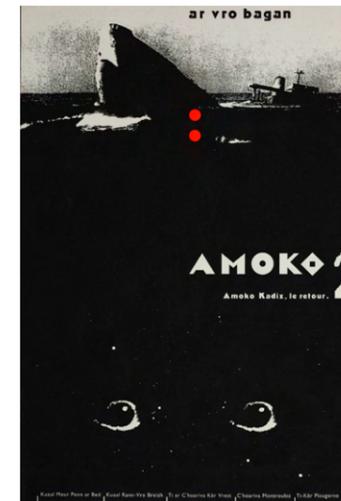
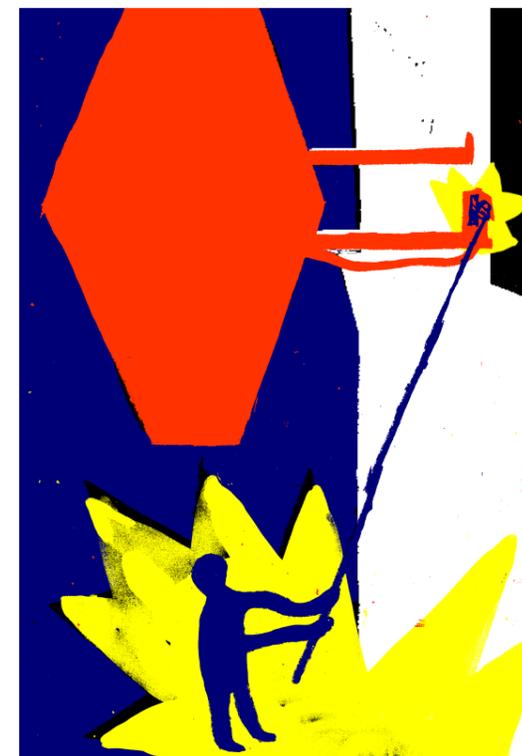
« Visitez Plogoff », affiche du Parti socialiste contre l'installation d'une centrale nucléaire sur la pointe du Raz, Alain Le Querrec, graphiste, 1979. © Collections du Musée de Bretagne



« Une centrale nucléaire ou un cimetière des dunes ? », affiche du Comité régional d'information sur le nucléaire (CRIN), années 1970. © Collections du Musée de Bretagne



« Plogoff, poubelle atomique ? », affiche de l'Union démocratique bretonne – UDB, fédération Cornouailles, 1975. © Collections du Musée de Bretagne



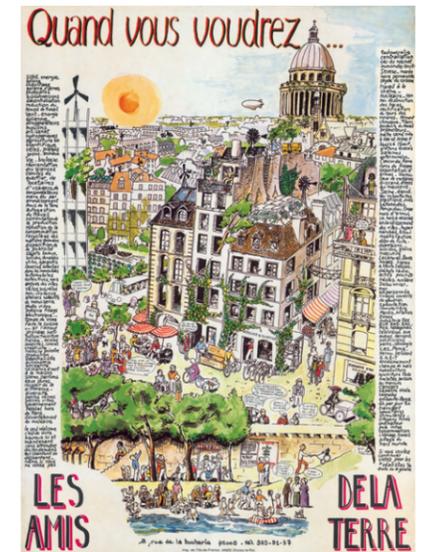
« Amoko 2 », affiche de Fañch Le Henaff, graphiste, 1995. © Collections du Musée de Bretagne



« Marée noire Shell Boycott », affiche, vers 1978. © Collections du Musée de Bretagne



« Marée noire : assez ! », affiche de l'Union démocratique bretonne – UDB, 1978. © Collections du Musée de Bretagne



« Quand vous voudrez... », affiche électorale Paris écologie pour René Dumont et Brice Lalonde, Les Amis de la Terre, 1976. © Les Amis de la Terre



Affiche pour les rencontres des luttes paysannes et rurales de Bure, organisées par le comité de lutte Bure Bure, 2023.



« La chute de la grue cendrée : Non aux éoliennes géantes dans la Double », affiche de l'Asso3D (Défense Dronne Double), Véronique Rosset, illustratrice, années 2020. © Asso3D



« Le solaire : alibi ou alternative ? », affiche pour une « Fête du soleil » organisée par Les Amis de la Terre, le 23 juin 1979, à l'Observatoire de Meudon. © Les Amis de la Terre

Depuis 2007, le Clan du néon lutte dans plusieurs villes de France contre le gaspillage d'énergie et la pollution lumineuse. Un interrupteur étant souvent accessible au-dessus des vitrines des magasins, ces militants sillonnent les rues pour éteindre eux-mêmes les enseignes commerciales. « 088 Néons – Nous éteignons les lumières », affiche, exposition « Énergies Désespoirs. Un monde à réparer », Encore Heureux, architectes, Benoit Bonnemaison-Fitte (Bonnefrite), artiste, et École Urbaine de Lyon, 2021. © Bonnefrite/Encore Heureux/École Urbaine de Lyon



« Installation de pipeline en cours », affiche du mouvement Extinction Rebellion, 1er mai 2023. © Edouard Monfrais-Albertini/Hans Lucas, via AFP



Pancarte mentionnant EACOP durant la marche Look Up pour le climat et la justice sociale, 12 mars 2022. © Maeva Destombes/Hans Lucas, via AFP

# atlas des architectures de l'énergie

# 2

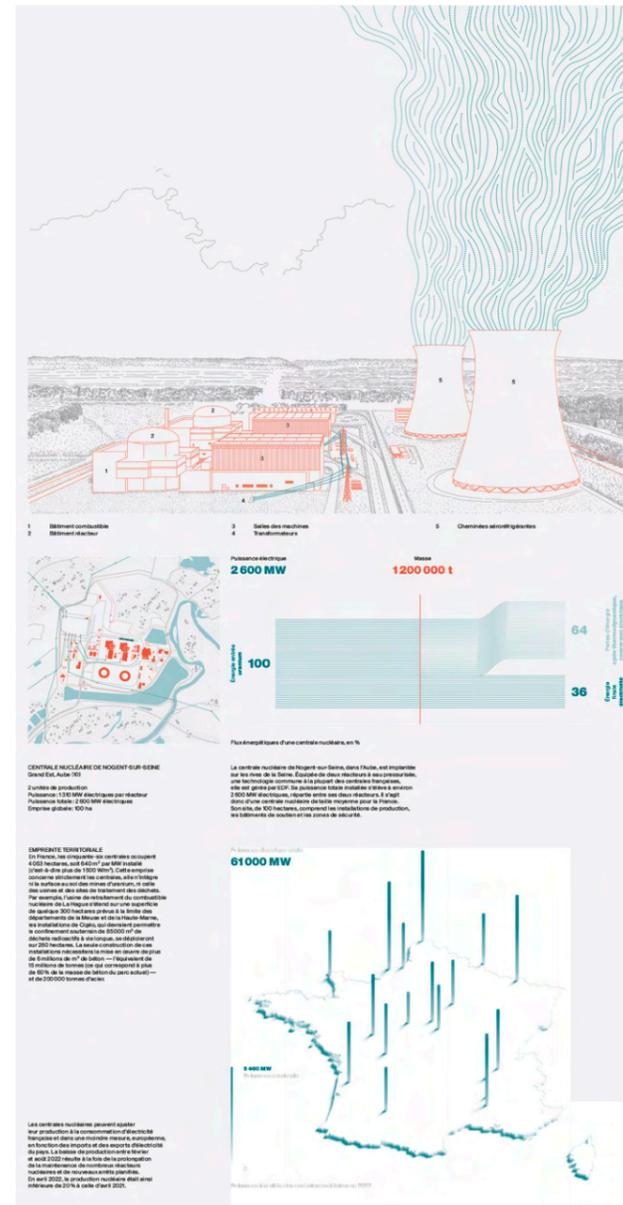
À l'heure d'un changement de régime énergétique, de l'aspiration à un futur post-carbone, une meilleure compréhension des enjeux actuels entre énergies et matières est essentielle pour prendre part au débat sur les nécessaires transformations de notre société. L'atlas propose ainsi une analyse de douze formes contemporaines et emblématiques des paysages français, chacune impliquée dans la consommation, la production, le stockage et le transport de l'énergie.

Douze situations, objets architecturaux (ou sujets vivants) en lien avec l'énergie sont étudiés : centrale nucléaire, centrale à charbon, centrale hydroélectrique, éolienne terrestre, éolienne en mer, centrale solaire, photovoltaïque en toiture, cheval de trait, pompe à chaleur, chaudière à gaz, fenêtre, isolant. Ces architectures contemporaines sont « pesées » sur les plans de l'énergie et de la matière et étudiées du point de vue de leur impact spatial et environnemental.

Deux couleurs différencient le couple énergie-matière (bleu-rouge) dans ces représentations. Classés par échelle spatiale décroissante, ces ouvrages sont chacun décrits et examinés selon des critères communs : leur fonctionnement, leur place dans l'économie mondiale, leurs typologies, leur durabilité, enfin les promesses qu'ils engagent et les controverses dont ils font l'objet. À vocation didactique, cet atlas réunit des formes qui semblaient a priori peu comparables. Il est un premier pas vers la constitution d'un catalogue pratique des formes de l'énergie.

# centrale nucléaire

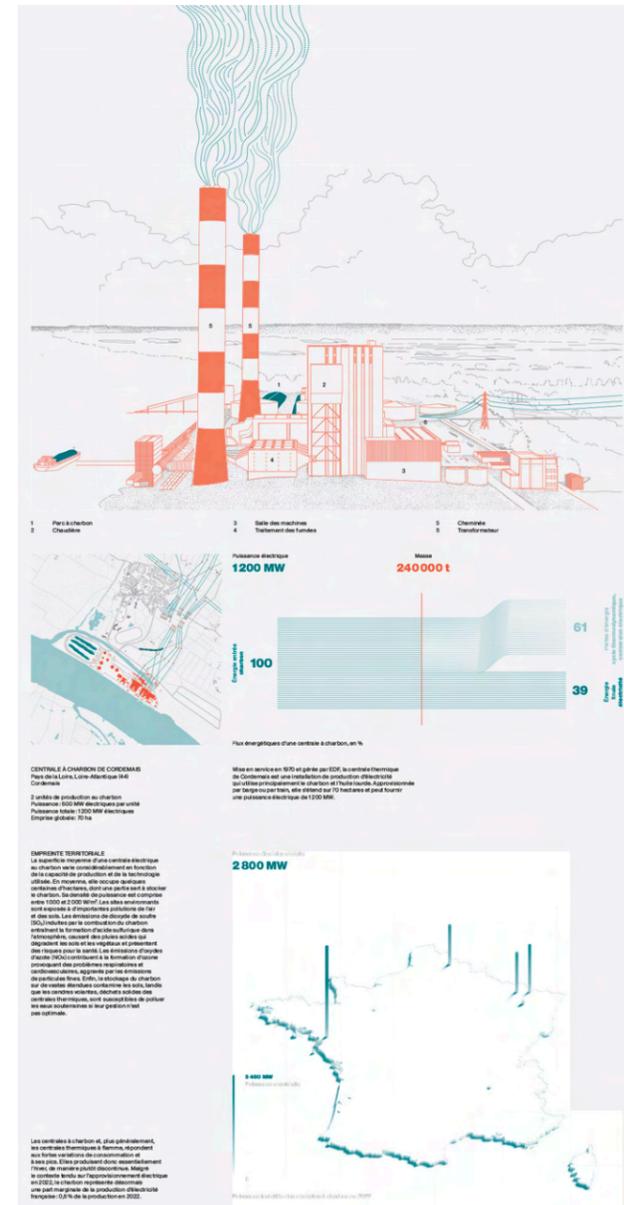
Une centrale nucléaire utilise la chaleur générée par la fission nucléaire pour produire de la vapeur, qui fait ensuite tourner une turbine connectée à un générateur électrique. L'énergie nucléaire relie les éléments d'un noyau atomique qui, bombardé de neutrons, se divise en deux noyaux plus légers, libérant une grande quantité d'énergie.



Centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine, Grand Est, Aube (10)

# centrale à charbon

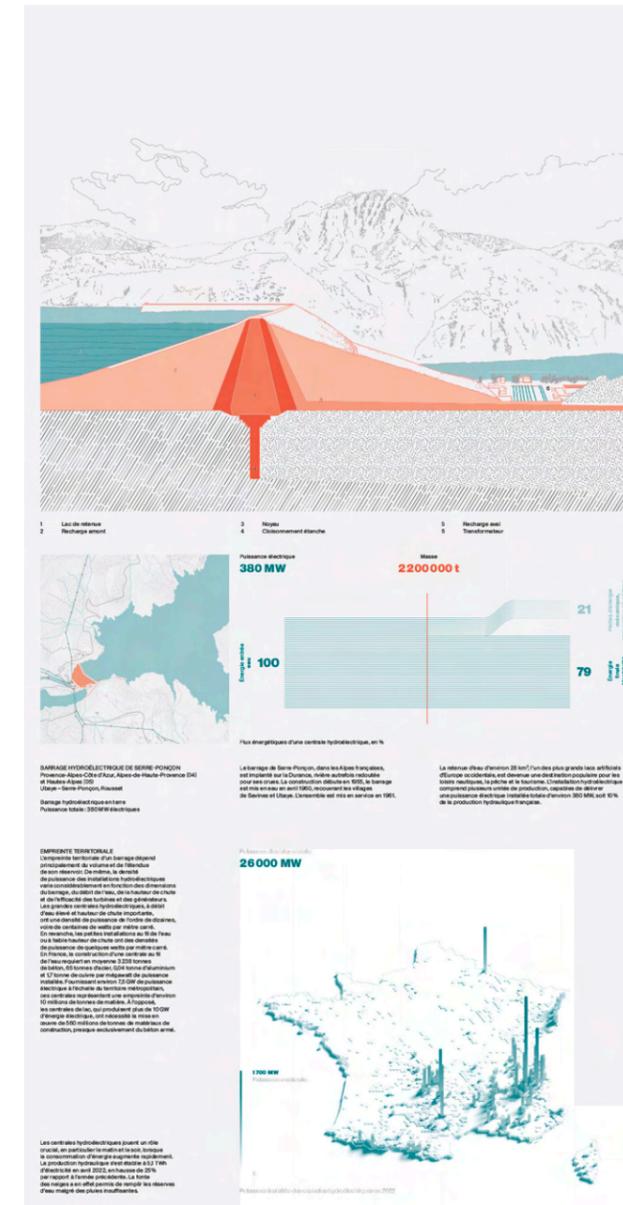
Une centrale à charbon brûle ce combustible pour générer de la chaleur. Le charbon est stocké dans de vastes dépôts approvisionnés par barge ou par train. Broyé en une fine poudre, il est mélangé à de l'air chaud. Sa combustion libère une quantité d'énergie importante, utilisée pour chauffer de l'eau et générer de la vapeur à haute pression dans d'énormes chaudières. La vapeur est ensuite dirigée vers une turbine, dont la rotation des aubes à grande vitesse permet de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique puis en électricité. Produite sous forme de courant continu, l'électricité est alors convertie en courant alternatif, compatible avec le réseau électrique. L'électricité est acheminée vers les consommateurs via des lignes à haute tension.



Centrale à charbon de Cordemais, Pays de la Loire, Loire-Atlantique (44)

# centrale hydroélectrique

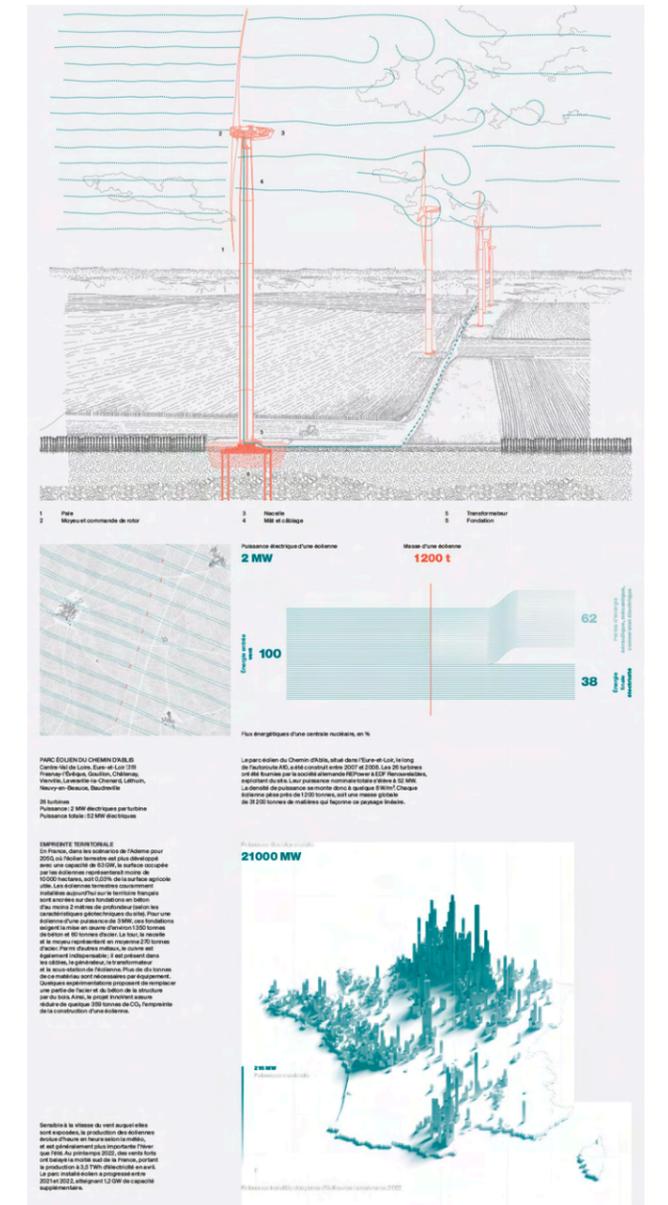
Une centrale hydroélectrique exploite l'énergie d'un fleuve ou d'une rivière pour produire de l'électricité. Il existe quatre grandes familles de centrales hydroélectriques. Les installations dites « au fil de l'eau », conçues sans réservoir, tirent parti de la puissance du courant. Leur production dépend du débit et des fluctuations du cours d'eau. Elles représentent 26 % de la puissance totale des installations hydroélectriques françaises. Les installations liées aux écluses disposent d'une petite capacité de stockage et sont utilisées le plus souvent lors des pics de consommation.



Barrage hydroélectrique de Serre-Ponçon, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Alpes-de-Haute-Provence (04) et Hautes-Alpes (05)

# éolienne terrestre

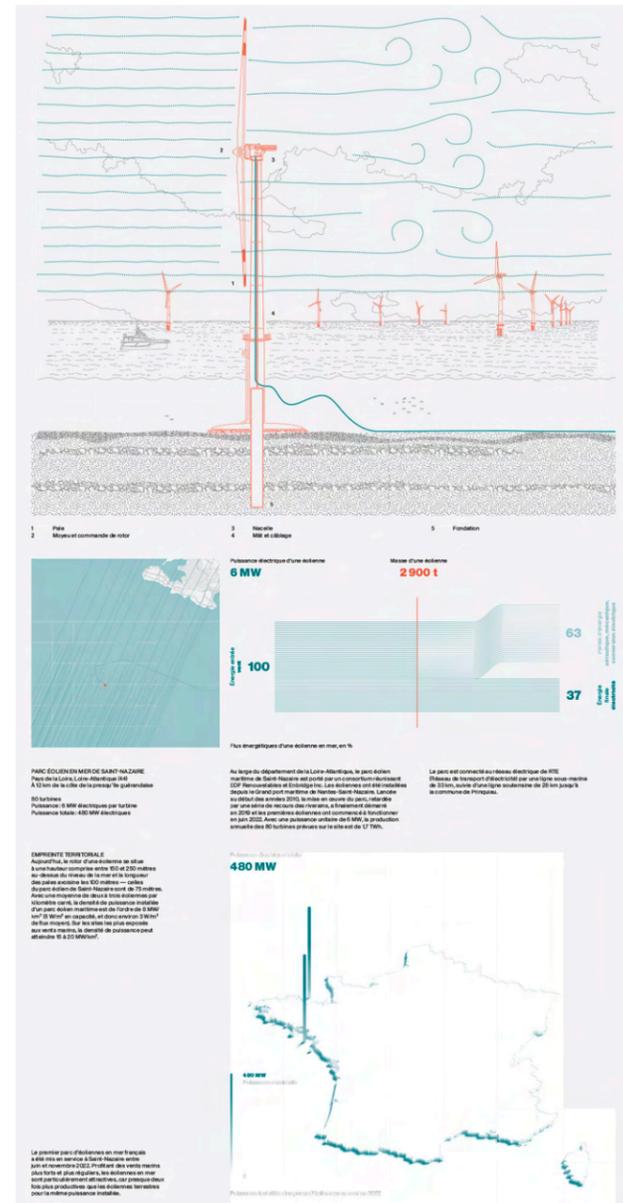
Une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis électrique. Sa puissance nominale représente la production délivrée dans des conditions de vent idéales (soit 12 mètres par seconde, un peu plus de 40 km/h). Les éoliennes terrestres ont habituellement une puissance de 2 à 5 mégawatts (MW), un rotor dont le diamètre est compris entre 75 et 150 mètres. Leur facteur de charge moyen est de 24 %, mais les nouvelles générations peuvent atteindre 30 % environ. Contrairement à quelques idées reçues, une éolienne tourne en moyenne 75 % à 95 % du temps.



Parc éolien du Chemin d'Ablis, Centre-Val de Loire, Eure-et-Loir (28)

# éolienne en mer

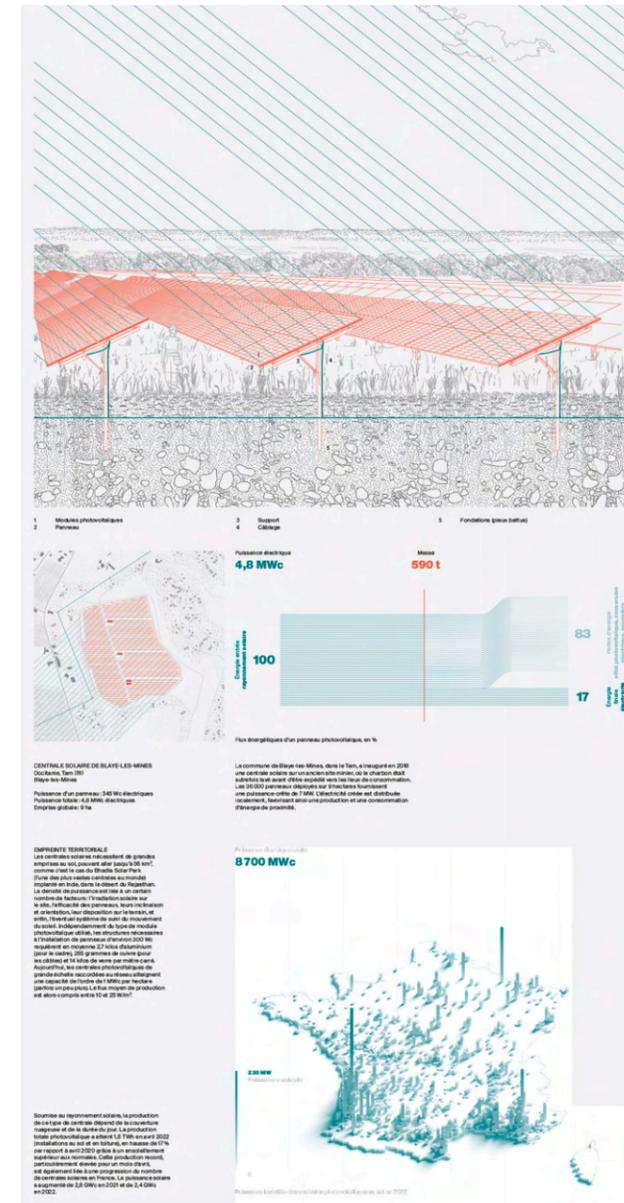
Les éoliennes installées en mer (ou offshore) moissonnent les vents marins, intenses et réguliers. En mer, le principe de fonctionnement des éoliennes reste le même que sur terre à la différence qu'un câble parcourt les fonds marins avant de rejoindre le réseau électrique. Les éoliennes en mer possèdent une puissance nominale comprise entre 5 et 15 mégawatts (MW), avec des diamètres de rotor de 130 à 180 mètres.



Parc éolien en mer de Saint-Nazaire, Pays de la Loire, Loire-Atlantique (44)

# centrale solaire

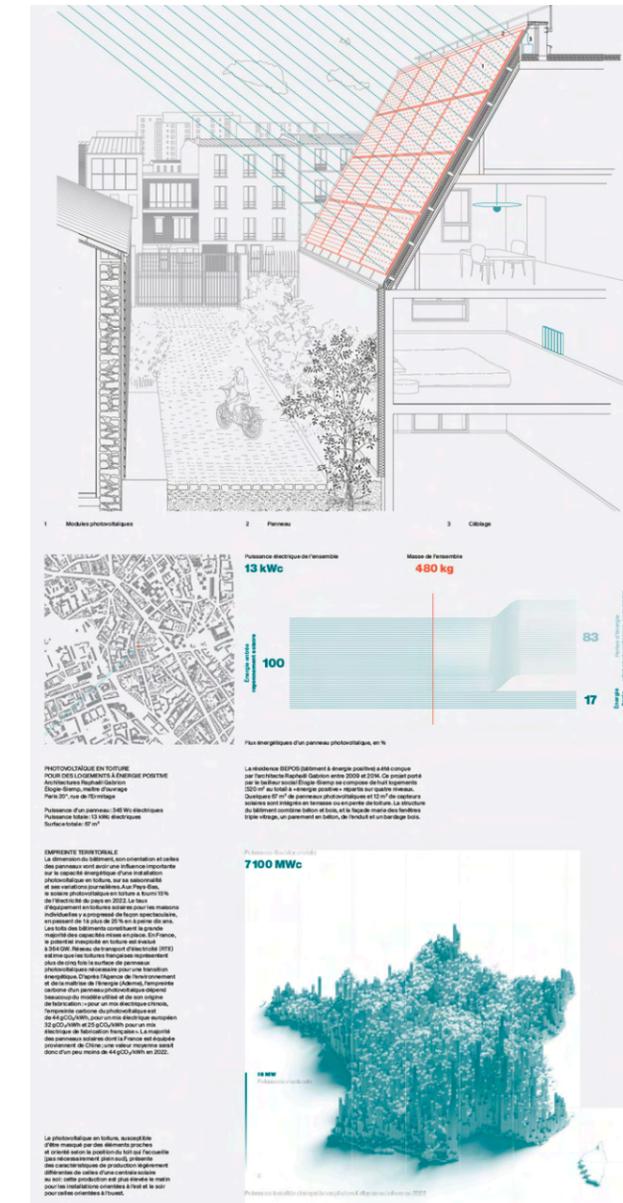
Le solaire photovoltaïque convertit directement le flux solaire en électricité grâce aux cellules photovoltaïques. Celles-ci produisent un courant continu, transformé ensuite en courant alternatif. Les cellules photovoltaïques utilisent l'effet photoélectrique, phénomène physique par lequel les électrons sont éjectés d'un matériau exposé à un rayonnement électromagnétique comme la lumière.



Centrale solaire de Blaye-les-Mines, Occitanie, Tarn (81)

# photovoltaïque en toiture

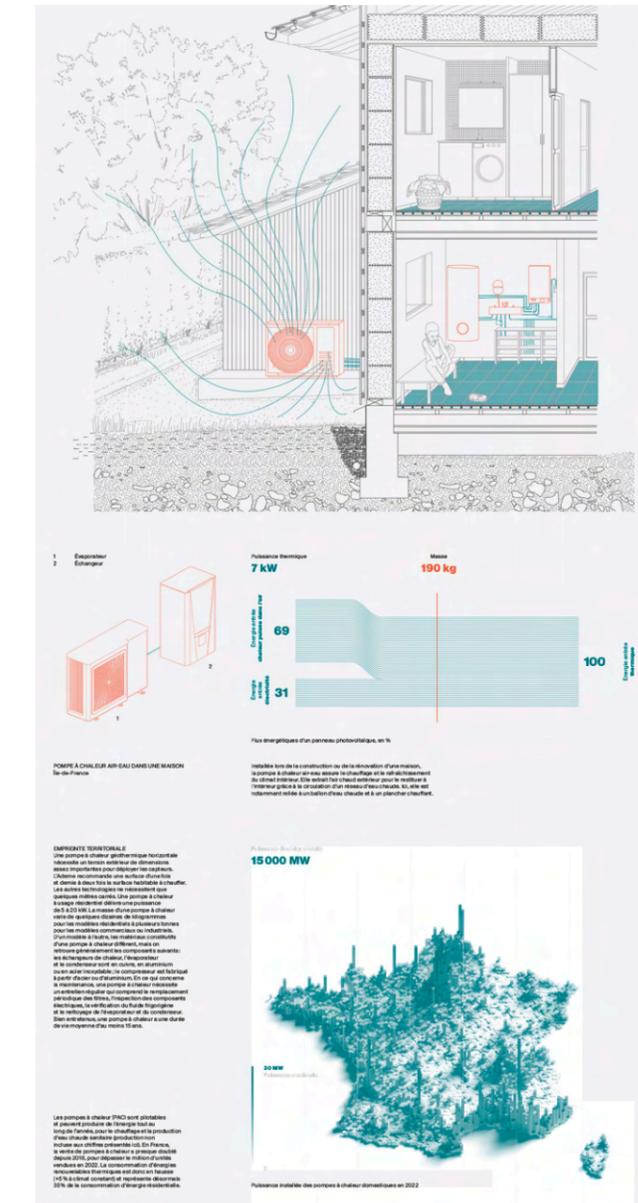
Le photovoltaïque en toiture tire avantage de surfaces, souvent sans usages, exposées au soleil. À l'échelle de la France, et à l'heure du débat sur l'artificialisation des sols, les toits des bâtiments couvrent au moins 0,7% du territoire et représentent donc un gisement potentiel d'importance. Les panneaux photovoltaïques (ou tuiles solaires) sont le plus souvent montés au-dessus des matériaux d'isolation et d'étanchéité de la toiture. Ils sont connectés entre eux puis au système électrique. Les panneaux peuvent se substituer aux couvertures traditionnelles (tuiles, bardeaux, ardoises, tôle ondulée, etc.). Ainsi intégrés dans la toiture, ils ne modifient pas la morphologie du bâti.



Photovoltaïque en toiture pour des logements à énergie positive. Architectures Raphaël Gabrion, Élogie-Siemp, maître d'ouvrage, Paris 20, rue de l'Ermitage

# pompe à chaleur

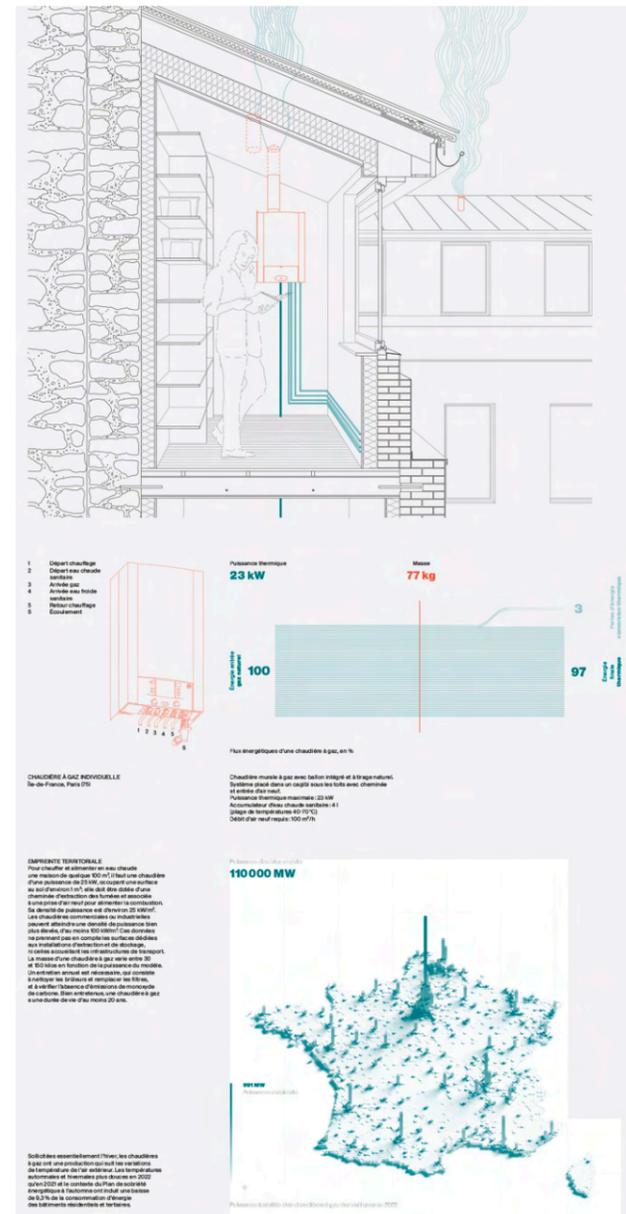
Appareil de chauffage et/ou de rafraîchissement, une pompe à chaleur puise l'énergie thermique présente dans l'air, l'eau ou le sol et les restitue dans un espace pour le réchauffer (ou le rafraîchir s'il s'agit d'un système réversible). Le transfert thermique entre extérieur et intérieur s'effectue grâce à la circulation d'un fluide dit « caloporteur », c'est-à-dire chargé de transporter la chaleur entre deux milieux de température différente.



Pompe à chaleur air-eau dans une maison, Île-de-France

# chaudière à gaz

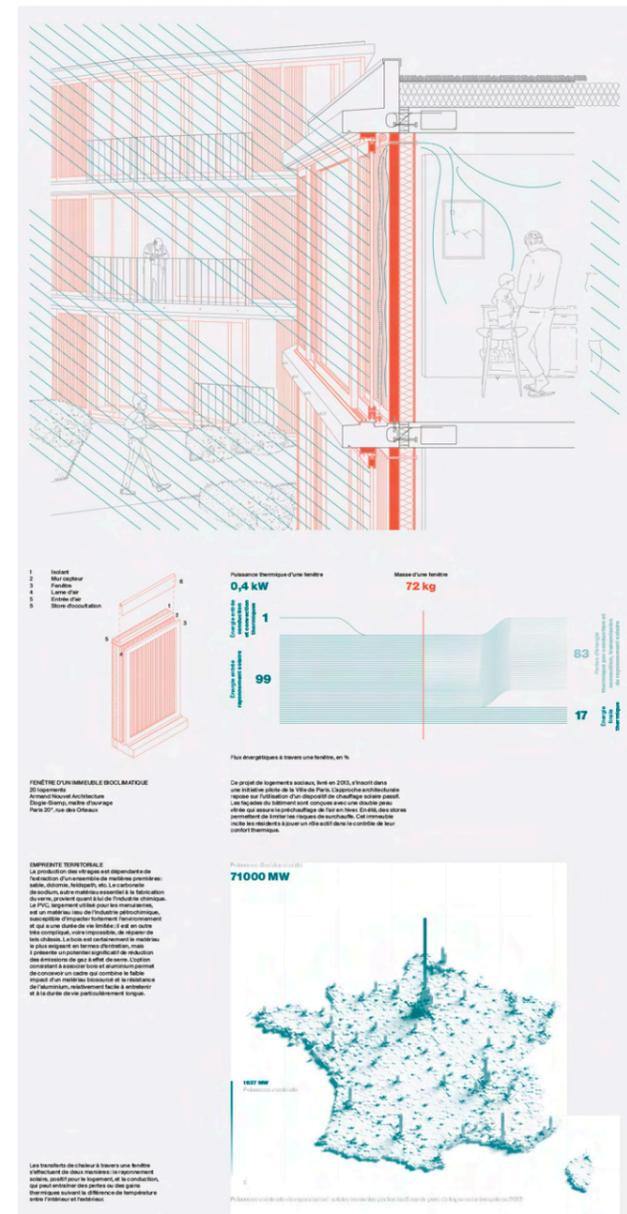
Utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude, la chaudière à gaz exploite l'énergie calorifique résultant de la combustion de gaz naturel (gaz fossile); plus rarement, elle recourt au biogaz issu de la fermentation organique et majoritairement composé de méthane.



Chaudière à gaz individuelle, Île-de-France, Paris (75)

# fenêtre

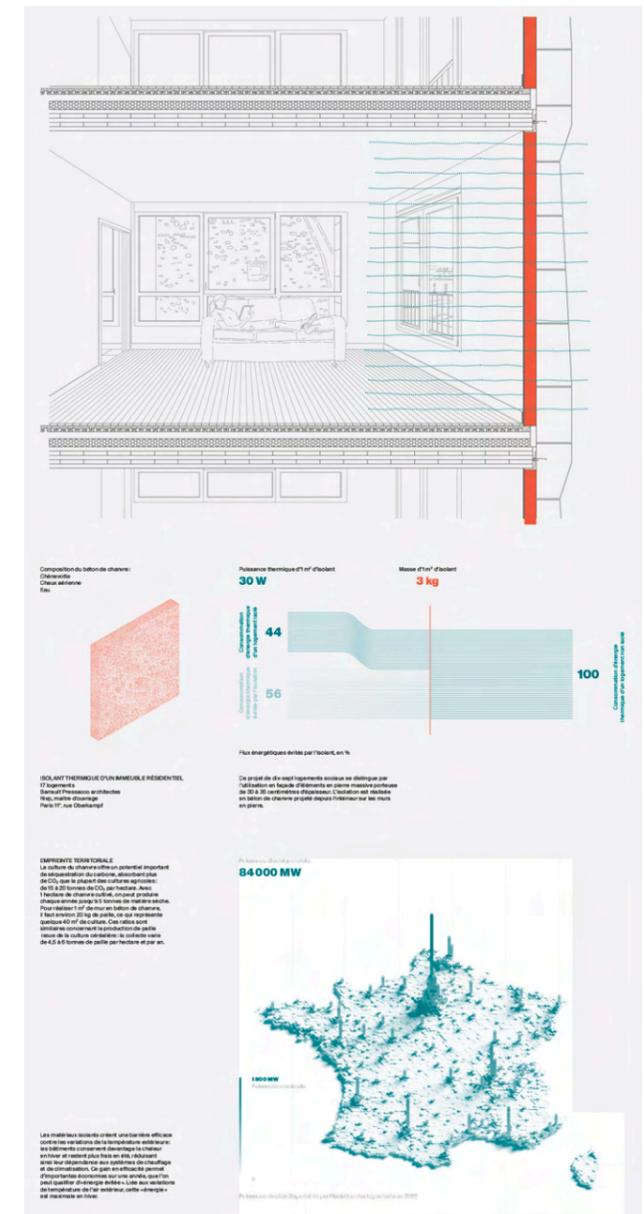
Une fenêtre et son vitrage apportent vues et lumière naturelle et une précieuse énergie solaire, mais entraînent des déperditions pendant les périodes de froid et, réciproquement, des apports solaires à limiter en période de chaleur. À la fois capteur solaire et isolant, une fenêtre comporte a minima un châssis et un vitrage.



Fenêtre d'un immeuble bioclimatique. 20 logements, Armand Nouvet Architecture, Élogie-Siempp, maître d'ouvrage, Paris 20, rue des Orteaux

# isolant thermique

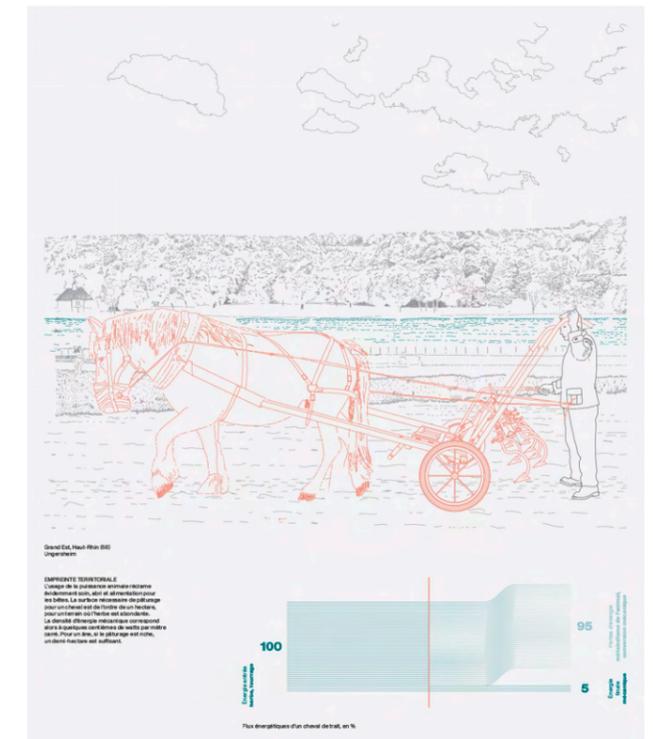
Un isolant thermique limite le transfert de chaleur entre deux environnements aux températures différentes. Dans le cas d'un bâtiment, il réduit la perte (ou le gain) de chaleur en freinant les flux thermiques entre intérieur et extérieur.



Isolant thermique d'un immeuble résidentiel. 17 logements, Barrault Pressacco architectes Rsvp, maître d'ouvrage, Paris 11, rue Oberkampf

# traction animale

Depuis des millénaires, la traction animale est essentielle, notamment pour l'agriculture. L'activité musculaire des animaux domestiques (cheval, âne, bœuf, buffle, mulet, chameau...) contribue à réduire la pénibilité du travail humain, à améliorer les rendements agricoles et artisanaux et à faciliter le transport des marchandises et des personnes. La technique de l'attelage d'un ou plusieurs animaux de trait à une charrette, une calèche ou une charrue, est encore couramment employée pour de nombreuses activités dans le monde.



Grand Est, Haut-Rhin (68) Ungersheim

demain sans  
énergies  
fossiles

3

Aujourd'hui, les énergies fossiles représentent 77 % de la demande d'énergie, les renouvelables 13 %, la biomasse traditionnelle 6 % et le nucléaire 4 %. En cent cinquante ans, la demande individuelle a quadruplé, la population mondiale a quintuplé et la consommation globale a été multipliée par vingt.

La soutenabilité de nos sociétés suppose de réduire fortement les dépenses d'énergie. En France, comme dans la plupart des pays riches, l'empreinte énergétique est très élevée. Pour réussir le pari de la neutralité carbone, préserver l'habitabilité terrestre, le rythme de décroissance des émissions de gaz à effet de serre doit être au minimum de 5 % chaque année. Pour franchir la ligne d'arrivée, la sobriété est un levier indispensable, le plus immédiat, le plus accessible et le moins cher.

D'abord, limiter (voire renoncer quand c'est possible) aux usages les plus dépendants des énergies fossiles : voiture, avion, chauffage aux combustibles fossiles... Plusieurs scénarios (Ademe, négaWatt...) proposent des feuilles de route de « descente énergétique », une « France à moins de 1000 térawattheures » permettant de réduire les densités de consommation (0,2 watt par mètre

carré à l'échelle de l'Hexagone). Des solutions sont à portée de main, privilégiant la légèreté, la réversibilité, la sobriété, le respect du vivant et la beauté des paysages ; des « poupées gigognes de convergence » entre offre et demande, entre formes et usages.

### six paysages post-carbone

Partant de six lieux de l'ordinaire constituant un imaginaire commun - deux plaines agricoles, les toits parisiens, les bords de Seine, un quartier pavillonnaire, un intérieur -, cette dernière partie esquisse des lendemains post-carbone. Ces six scènes du quotidien, chacune située en Île-de-France, intègrent de discrètes modifications : une éolienne, du mobilier climatique, des activités industrielles soutenables, des formes de mobilité légère, etc. Autant d'architectures et de pratiques énergétiques qui peuvent être transposables ailleurs et qui, au fil du temps, sous l'effet de leur addition, renouvellent subtilement les paysages.

Chaque scène illustre un changement des usages et décrit des capacités productives jusque-là peu explorées, signe d'une convergence entre une demande énergétique de plus en plus tournée vers l'électricité et une production locale et décarbonée. En région Île-de-France, du fait de la densité de population (près de dix fois supérieure à la moyenne hexagonale), l'autonomie est plus difficilement atteignable. Mais la (re)connexion à des énergies locales, la mesure de la valeur de l'énergie par chaque citoyen, la dimension politique de cette transformation et les enjeux esthétiques qu'elle suscite sont autant d'occasions de faire émerger de nouveaux usages autour de nouvelles activités industrielles, artisanales et agricoles. Une reterritorialisation de l'énergie, de ses métiers et des savoirs.

# le quartier pavillonnaire



Un prochain printemps, un milieu de journée. Le ciel est nuageux ; il fait chaud (27 °C), sous une brise légère. Nous sommes dans l'Oise. Du solaire sur les friches ferroviaires, des véhicules, légers, branchés au bâti, des pavillons transformés par leurs habitants.

Une éolienne recharge le quadricycle qui permettra de se déplacer, pour rejoindre la gare par exemple. On observe des friches ferroviaires, des herbes folles entre les rails, un wagon avec son conteneur. Deux techniciens déploient les panneaux photovoltaïques qui seront agrafés sur les rails. Ces « guirlandes solaires », de quelques dizaines de kilowatts, activent le « délaissé » et tissent un réseau électrique secondaire, pour alimenter le quartier en appui de l'existant.

L'asphalte de la rue, légèrement blanchi, participe à réduire les effets d'îlot de chaleur, en même temps que les arbres et les plantations de ce quartier périurbain. Sur le trottoir, deux véhicules sont garés : l'un, léger, un quadricycle de moins de 400 kilos à propulsion hybride (électrique et musculaire) ; l'autre, une Panhard modèle CT24, au toit blanc, qui a troqué son moteur à essence de 1967 pour une motorisation électrique et sa batterie. Ainsi transformée, la Panhard qui consommait près de 1000 litres d'essence

et émettait environ 3 tonnes de CO<sub>2</sub> par an est devenue une mobilité à énergie positive — l'électricité provenant des installations d'énergies renouvelables locales au coût nul.

Les toits exposés des maisons sont éclaircis ; les velux sont protégés temporairement par une couverture de survie maintenue entre battant et châssis, permettant de réduire la température de quelque 4 °C sous les toits (de l'énergie solaire à 2000 watts qui ne chauffe pas l'intérieur). Dans un jardin, une éolienne autoconstruite de type Piggott tourne sous l'effet de la brise. Sur un faîtage, des panneaux solaires couvrent la toiture existante. Ils assurent une production de 2000 kWh d'électricité par an, qui sont autoconsommés et génèrent une économie annuelle de l'ordre de 500 euros. Un pavillon est pourvu d'une pompe à chaleur installée sur son pignon ; elle est venue remplacer l'ancienne chaudière au fioul.

Ces interventions légères participent à une moindre dépendance de ce quartier aux énergies fossiles, concernant particulièrement nos mobilités individuelles et notre dépendance à l'automobile en zones suburbaines. Elles contribuent également à une reconnexion énergétique entre le bâti et la mobilité et à une nouvelle proximité entre voisins.

## Composants

- 1 Solaire réversible sur voies (2,5 × 100 m, soit 250 m<sup>2</sup>) | 2 × 50 kWc | 2 × 3 t
- 2 Panhard de 1967 à moteur électrique « rétrofité » | 50 kW | 1200 kg
- 3 Quadricycle Plato | 6 kW | 400 kg
- 4 Toit blanchi | quelques kW thermiques réfléchis par la toiture en été | quelques hectogrammes de blanc de Meudon
- 5 Pompe à chaleur | 10 kW thermiques | env. 100 kg
- 6 Éolienne Piggott (diam. 2 m) | 1 kW | 100 kg
- 7 Couverture de survie sur velux | env. 1 kW de rayonnement en moins à l'intérieur en été | env. 60 g
- 8 Panneaux solaires sur faîtage (10 m<sup>2</sup>) | 2 kWc | env. 100 kg

# les toits



C'est le plein été à Paris. Une vue sur la ville depuis un balcon de la rue Piat dans le 20<sup>e</sup> arrondissement. La température s'élève à 37 °C, l'ambiance est caniculaire.

À l'heure du « retournement énergétique » (l'énergie vient ici du ciel et non du sol), de nouveaux dispositifs, tels que la solarisation des toits métropolitains, la ventilation naturelle ou l'adaptation colorimétrique, ponctuent la canopée de la ville.

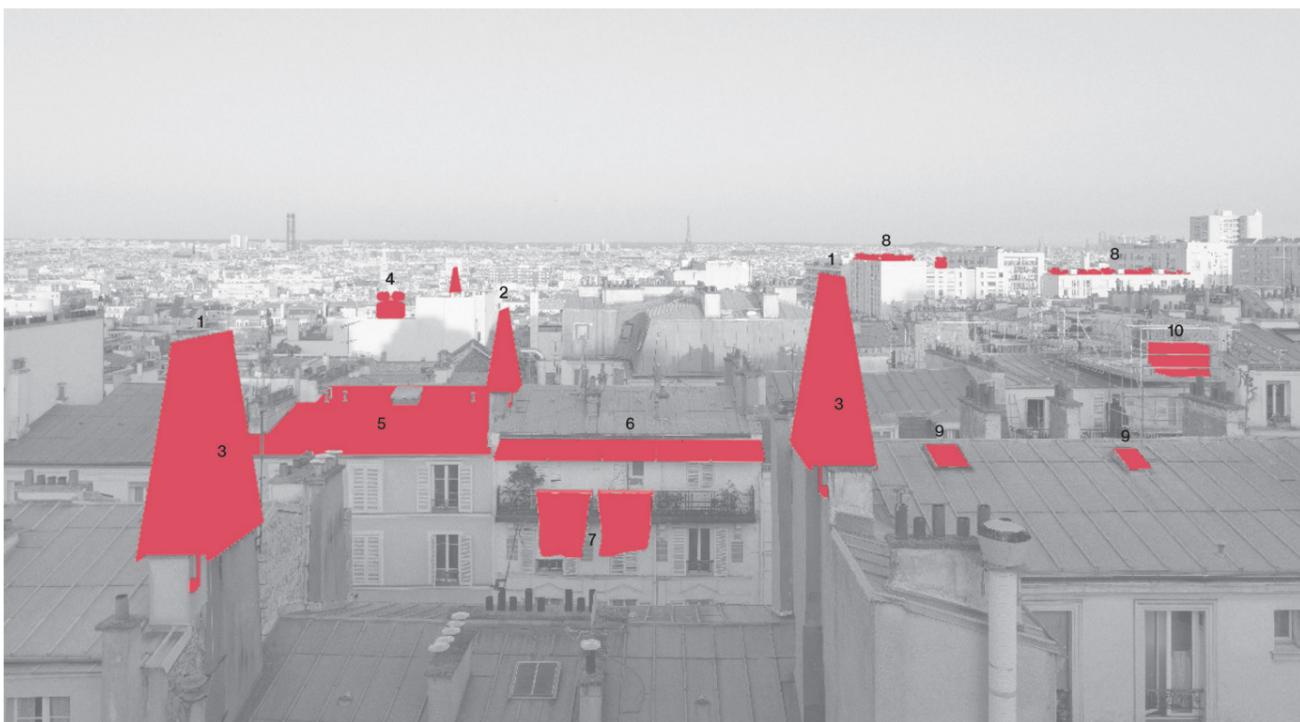
Les cheminées deviennent des récepteurs solaires. Leurs souches sont équipées d'extensions inédites, des panneaux photovoltaïques bifaces, dont les fils électriques empruntent les anciens conduits pour irriguer les appartements. Protégé par des membranes transparentes en ETFE, l'ensemble accroît la ventilation naturelle des logements. Ces « cheminées solaires », aisément installées par les copropriétés, permettent de « solariser » rapidement les existants et renforcent le bioclimatisme.

Simple échangeurs de température, des pompes à chaleur verticales, en interaction avec l'air ambiant et des conduits caloriques, flexibles et de faible diamètre, descendent par d'anciens conduits de cheminées. Ce dispositif offre une solution au remplacement des chaudières individuelles

à gaz et éloigne la nuisance acoustique en parties hautes des constructions. Inversé, le même système délivre du froid en situation caniculaire (dans l'appartement d'une personne fragile par exemple); la chaleur « pompée » est alors rejetée sur la canopée, loin de la rue, permettant ainsi de limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Un chantier de rénovation utilise des isolants de fibres végétales, issues de la filière francilienne, une mise en œuvre concrète du Plan local d'urbanisme (PLU) bioclimatique parisien. Certaines verrières ont été badigeonnées de blanc de Meudon (à base de craie), d'autres équipées de couvertures de survie réfléchissantes, dans le but de réduire les apports solaires et ainsi modérer les températures dans les espaces situés sous les toits. Les couvertures de toiture en zinc ont été éclaircies (par un traitement particulier du métal), tandis que les toits plats sont tapissés de végétation.

Des plantes ornent quelques fenêtres et balcons. L'un d'entre eux est doté d'une marquise productive pour davantage d'ombre. Aussi, lors des épisodes de chaleur, un arrêté municipal autorise dorénavant le séchage du linge en extérieur, afin de restreindre l'usage des sèche-linge électriques, particulièrement énergivores.



## Composants

- 1 Cheminée solaire avec panneaux solaires bifaciaux | 1,5 kWc | 150 kg
- 2 Cheminée avec pompes à chaleur | 50 kW thermiques | 500 kg
- 3 Panneau solaire bifacial (1,8 × 1,1 m) | 1,5 kWc | 30 kg
- 4 Éolienne Savonius avec stockage thermique (diam. 4m) | env. 1 kW | env. 10 t, y compris stockage d'eau
- 5 Zinc éclairci | quelques kW thermiques réfléchis par la toiture en été
- 6 Marquise productive (10 panneaux photovoltaïques) | 2 kWc | 150 kg
- 7 Linge séchant au soleil | économie de 3 kW consommés par un sèche-linge
- 8 Toits végétalisés
- 9 Blanc de Meudon sur velux
- 10 Isolants biosourcés | env. 30 W thermiques par m<sup>2</sup> | env. 3 kg/m<sup>2</sup>

# la plaine agricole



Une exploitation agricole dans l'Yonne, une polyculture énergétique. Fin mai, le thermomètre affiche 18 °C. À 10 mètres au-dessus du sol, le vent souffle à 40 km/h ; le soleil est diffus et baigne le paysage d'un flux de 550 W/m<sup>2</sup>. Une « grille aérosolaire », de l'agrivoltaïque « augmenté », a été installée sur quelques hectares. Chaque éolienne à axe vertical produit une puissance d'environ 2 000 watts. Les panneaux photovoltaïques mobiles suivent la course du soleil. Chaque travée génère près de 2 600 watts d'électricité. Un verger débute sa croissance. Une serre, microclimat agricole, ainsi que des plantations maraîchères extérieures bordent le site. En fond de parcelle, ce dernier accueille du matériel agricole, des réservoirs d'eau servant à l'arrosage des cultures, des stocks d'énergie (déchets de biomasse valorisés en biométhane) ou encore des pâtures destinées aux moutons.

mètres, les poteaux permettent ainsi le passage des engins — et de prospect éolien. Son agencement peut évoluer selon les usages et les cultures et accueillir des dispositifs d'emmagasinage d'énergie (digesteur à biométhane, stockage d'hydrogène vert, etc.) ou encore être adapté à d'autres formes solaires ou éoliennes (à axe horizontal par exemple). La grille aérosolaire est un système léger, capable de produire un flux moyen équivalent à 25 à 30 W/m<sup>2</sup>, soit une densité de production de l'ordre de 2 000 à 3 000 MWh d'électricité par hectare et par an.

Cette infrastructure légère, qui peut s'étendre de quelques ares à plusieurs hectares, explore de nouvelles stratégies territoriales, comme l'ont fait auparavant le groupe d'architectes Superstudio (Le Monument continu, 1969) ou l'Italien Andrea Branzi (Agronica, 1995-1997) avec leurs modèles utopiques. Ce paysage post-carbone participe à la mutation des sites agricoles afin de renforcer leur résilience. Avec des techniques simples, accessibles et réparables, la grille aérosolaire est appropriable, adaptable et transformable par des paysans « énerpiculteurs ».

Cette structure modulaire en acier conjugue la brumisation des vergers (tuyaux et buses longent les poutres horizontales), le maraîchage sous serre, les productions électriques issues du solaire et de l'éolien. Sa géométrie respecte les contraintes d'exploitation agricole — distants de 12



## Composants

- 1 Éolienne à axe vertical type Darrieus | 2,5 kW | 100 kg
- 2 Panneaux solaires sur système orientable | 200 Wc/m<sup>2</sup> | 15 kg/m<sup>2</sup>
- 3 Serre en ETFE | jusqu'à 800 W thermiques par m<sup>2</sup> | env. 20 kg/m<sup>2</sup>

# l'horizon



C'est le printemps dans la Beauce, il fait 16 °C. À 10 mètres au-dessus du sol, le vent souffle à plus de 30 km/h; à 100 mètres, sa vitesse atteint 42 km/h, propulsant l'hélice de chacune des éoliennes, qui « moissonne » l'énergie du vent à travers un disque de plus de 6 000 m<sup>2</sup> et génère une puissance proche de 1 000 W/m<sup>2</sup>. Chaque éolienne fournit 3 MW de puissance électrique et possède un rendement de conversion de près de 50 %.

Adaptations de turbine courante, ces éoliennes activent trois leviers de légèreté : un ancrage au sol en plusieurs points, plutôt qu'un unique encastrement du mât par une lourde fondation de béton. La structure conique de la partie basse du mât et ses multiples liaisons au sol permettent de « poser » ces éoliennes avec finesse. Les socles surélevés forment une toiture d'environ 1 000 m<sup>2</sup>; ils accueillent une grande variété d'activités et libèrent l'horizon.

Sous ces nouvelles toitures, les ballots de foin sont préservés des intempéries, le

bétail trouve un lieu de protection ou de stabulation. Les machines agricoles y sont abritées et rechargées en électricité. D'autres usages peuvent aussi y prendre place, tel le stockage d'« hydrogène vert », produit par électrolyse en cas de surproduction éolienne, biométhane des sous-produits de la biomasse, etc. En lisière de la route, ces éoliennes deviennent des stations-service d'énergies et accueillent les véhicules le temps de leur recharge.

Ainsi, ces équipements ne sont plus seulement des objets techniques « plantés dans le décor ». Ces architectures créent des usages inédits et de nouvelles formes d'appropriation des sites : leur géométrie, leurs matériaux de couverture (ardoises, tuiles, chaumes, etc.) sont choisis en fonction du territoire d'implantation. Le mât, la nacelle et les pales se teintent avec subtilité pour se fondre avec les tonalités typiques des ciels et des paysages qui les environnent.



#### Composants

- 1 Éolienne de grande taille allégée et hybridée |
- 3 MW | env. 200 t en moins par rapport à une éolienne classique
- 2 Électrolyseurs et réservoirs à « hydrogène vert » 3 Méthaniseur à biomasse
- 4 Tracteurs électriques

# le fleuve



En bord de Seine, à proximité de sa confluence avec le Loing, il fait 18 °C en cette fin de journée de printemps à Saint-Mammès, en Seine-et-Marne. On aperçoit, à flanc de colline, un train de marchandises offrant un exemple de solution logistique décarbonée. Sur le rivage du fleuve, une scierie flottante a pris place sur trois barges. Quelques troncs issus de forêts environnantes sont entreposés sur la première. La deuxième abrite, sous une structure transparente et légère, la scierie et les outils de découpe. L'étuve est installée dans la troisième barge ; ses panneaux photovoltaïques à concentration suivent la course du soleil et produisent de la chaleur à plus de 150 °C. Une chaudière utilisant les

déchets de bois de la scierie complète les besoins énergétiques. Les hydroliennes, accrochées aux deux bras repliables de la barge centrale, continuent de créer de l'électricité. Celle-ci est stockée dans des batteries électriques qui assureront l'énergie mécanique nécessaire, le lendemain matin, à la reprise d'activité. On a ici l'illustration d'une industrie flottante, légère.

Sur la crête forestière, une petite brise fait tourner les éoliennes à axe vertical. Ces dernières, situées dans l'exostructure des pylônes électriques, génèrent jusqu'à 20 kW. Sur le port, certaines péniches sont équipées de panneaux photovoltaïques orientables.



## Composants

- 1 Hydrolienne | env. 2 kW | env. 300 kg
- 2 Chaudière à biomasse (valorisation des déchets de scierie) | 50 kW thermiques | 2 t
- 3 Solaire thermique à concentration, miroirs paraboliques montés sur système orientable | 30 kW thermiques | 5 t
- 4 Éolienne Darrieus, pylône Wind-it | 15 kW | 10 t
- 5 Solaire photovoltaïque suiveur | 1 kW | 100 kg

# un intérieur en ville



Avenue de Choisy, dans le 13<sup>e</sup> arrondissement de Paris, une fin de journée d'automne. Le soleil se couche sous le ciel gris. La température extérieure est de 6 °C. Une scène d'intérieur dans un habitat parisien des années 1960-1980 dont l'espace a été reconfiguré avec des dispositifs légers. Une étudiante est à sa table de travail. Il fait à peine 16 °C dans sa chambre; le chauffage collectif a été réduit: à la charge des occupants de compléter (ou non) ce « socle thermique » commun.

Avec du « mobilier climatique » et de petits aménagements, l'étudiante améliore son confort. Rideaux, meubles et tapis ont trouvé leur place, ils enveloppent la pièce, forment des « couches gigognes » qui isolent et préservent la chaleur corporelle. Au sol, un tapis chauffant apporte quelques watts supplémentaires dans la pièce. Une « table climatique », dont l'inertie thermique a été augmentée dans l'épaisseur de son plateau (grâce aux MCP), contribue à une atmosphère agréable; tout comme les étagères, restituant un peu de la chaleur accumulée dans la journée. À la nuit tombée, les doubles-rideaux isolants réduisent les effets de paroi froide, complètent le calfeutrement de la baie et

limitent les déperditions d'énergie. Quelques mesures de sobriété et d'usage (vêtements chauds, plaids) procurent à l'étudiante une sensation de confort.

À l'extérieur, on distingue d'autres logements collectifs, des résidences construites dans les mêmes décennies. Sur certains toits — ceux des résidences à toiture en terrasse — sont installés des réservoirs d'eau métallisés, auxquels sont adjointes de petites éoliennes à axe vertical (des rotors lents de type Savonius). Ces citernes stockent et restituent la chaleur générée par la rotation de l'éolienne sous le vent. Ces cuves complètent la production thermique des copropriétés en se greffant sur le réseau existant; un système simple pour augmenter l'autosuffisance en chaleur du résidentiel collectif. Sur d'autres immeubles, des panneaux solaires fixés aux balcons par les habitants produisent de l'électricité qui est directement autoconsommée dans les logements. Les résidents s'approprient de nouvelles formes d'énergie, à l'intérieur comme à l'extérieur, et participent à l'émergence d'un aménagement énergétique novateur à l'échelle des foyers et des copropriétés.



## Composants

- 1 Rideau climatique | quelques dizaines de watts thermiques | env. 5 kg
- 2 Table climatique | de l'ordre de 1 kWh de stockage thermique | 20 kg
- 3 Plaid | quelques watts thermiques | env. 500 g
- 4 Étagère climatique | de l'ordre de 1 kWh de stockage thermique | 30 kg
- 5 Éolienne Savonius avec stockage thermique (diam. 4 m) | env. 1 kW | env. 10 t, y compris stockage d'eau
- 6 Panneau solaire sur balcon | 400 Wc | 20 kg
- 7 Éolienne Savonius avec pompe à chaleur directe et stockage thermique (diam. 4 m) | env. 3 kW thermiques | env. 12 t, y compris stockage d'eau

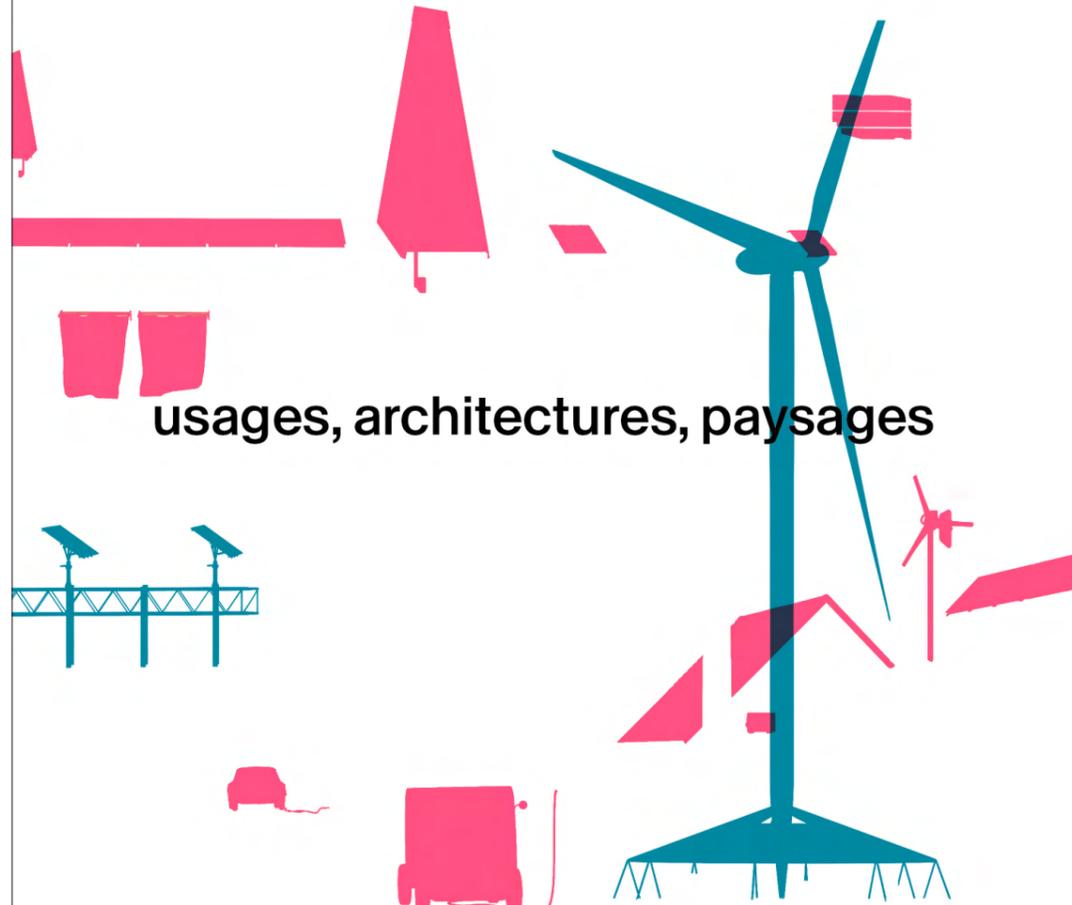
# édition

Éditions du Pavillon de l'Arsenal, novembre 2023  
sous la direction de Raphaël Ménard, architecte, ingénieur, docteur en architecture

# énergies légères

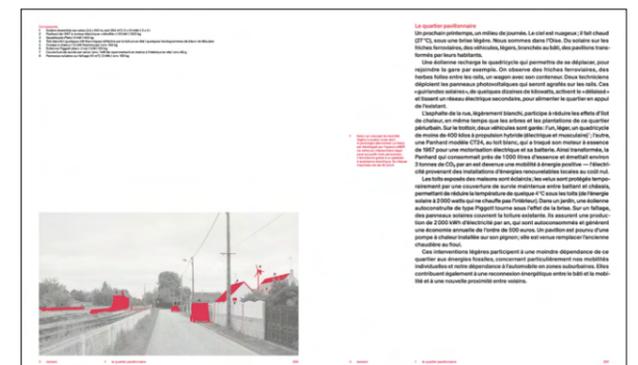
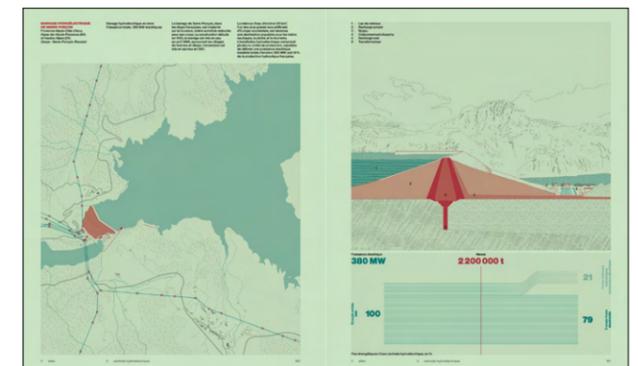
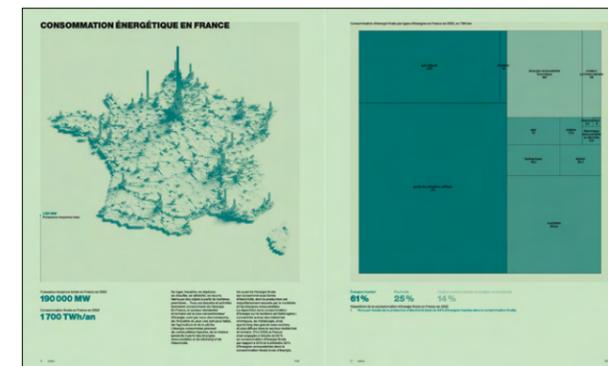
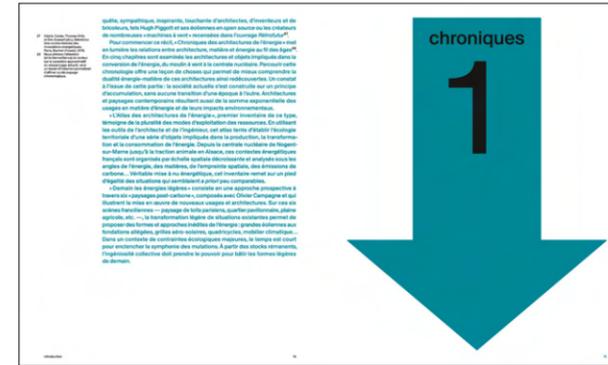
Raphaël Ménard

usages, architectures, paysages



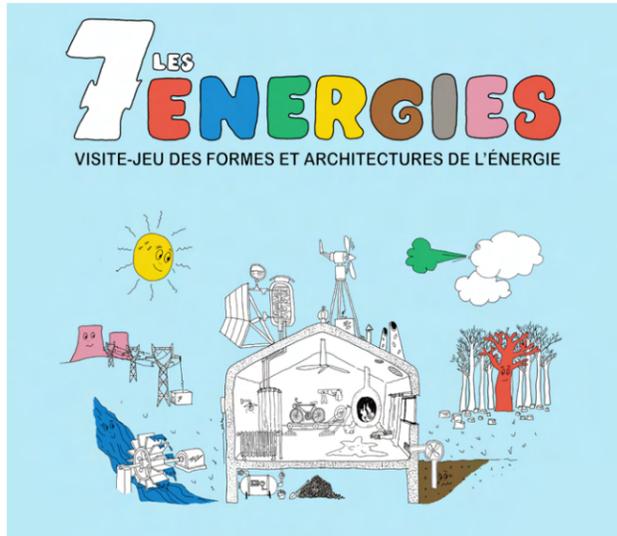
Design graphique : Building Paris  
Format : 25 x 30 cm  
248 pages - 150 illustrations

Langue : Français/ Prix : 34€  
ISBN : 978-2-35487-074-4



# autour de l'exposition

# générique & remerciements



## Visites et ateliers - Jeune public

Le Pavillon de l'Arsenal propose aux enfants, aux groupes scolaires et centres de loisirs, des visites-ateliers ludiques de l'exposition « Énergies Légères » pour partir à la découverte des 7 énergies et de leurs architectures.



## Cinéma Majestic Bastille

Dans le cadre du partenariat avec le Pavillon de l'Arsenal, le Cinéma Majestic Bastille lance un cycle de ciné-conférences. Le premier événement aura pour thème l'énergie renouvelable et son lien à l'architecture dans le cadre de l'exposition « Énergies Légères ».



## Visite guidée avec Raphaël Ménard

Rencontre exceptionnelle avec Raphaël Ménard, architecte, ingénieur, docteur en architecture et commissaire de l'exposition.



## Visite de site - EDF

Le saviez-vous ? EDF est l'entreprise la plus visitée de France ! À l'occasion du partenariat autour de l'exposition, le Pavillon de l'Arsenal organise avec EDF une visite de site pour faire vivre l'aventure de l'électricité comme on ne l'a jamais imaginée !

Exposition créée par le Pavillon de l'Arsenal  
Association Loi de 1901

Patrick Bloche  
Président

Commissariat général

Marion Waller  
Directrice générale  
Marianne Carrega, architecte, Adjointe à la Directrice générale, Directrice des éditions

Expositions  
Jean-Sébastien Lebreton, architecte, Directeur des expositions  
Sophie Civita, designer, chargée de production  
Mathilde Charles, architecte, chargée de production  
Pablo Fillit, architecte, chargé de production avec Manon Marchand

Documentation  
Léa Baudat, responsable de la documentation  
Valentine Schmitt, chargée de documentation

Communication et publics  
Estelle Sabatier, urbaniste, Directrice des publics, de la communication, des événements et du numérique  
Éline Latchoumy, designer, chargée de communication digitale  
Marie Gagnaire, chargée de communication  
Camille Surribas, chargée de communication et des événements

Librairie-boutique  
Carles Hillairet, responsable de la librairie  
Luc Teyssiere van Hoegaerden, assistant libraire

Comptabilité  
Frédérique Thémia

Réalisation et montage  
Montage et accrochage : Coregie expo  
Sérigraphie : Sacré Bonus  
Impressions : BSMD Avant-Garde  
Transferts : Couleur & Communication  
Audiovisuel : Big Bang  
Transports : Chenue, Esprit Volume, TDRH  
Éclairage : Ville de Paris / SET,  
Sébastien Marseille et Rodrigue Rosemont

Commissariat scientifique

Raphaël Ménard, architecte, ingénieur, docteur en architecture  
Il a théorisé sa pratique dans de nombreuses publications, dont sa thèse Énergie, Matière, Architecture. En tant que praticien (Elioth puis AREP), Raphaël Ménard a développé plusieurs innovations dans le champ des énergies renouvelables et du design. Depuis 2013, il enseigne au sein du DPEA Architecture Post-Carbone, une formation de troisième cycle qu'il codirige à l'École d'architecture de Paris-Est. Il contribue régulièrement à de nombreux articles et ouvrages (Local Energy Autonomy, Matière grise, La beauté d'une ville, etc.)

avec  
Jean Souviron, architecte, ingénieur, docteur en art de bâtir et urbanisme  
Il est maître de conférences associé à l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-Belleville. Il est docteur en art de bâtir et urbanisme de l'Université Libre de Bruxelles, architecte diplômé d'État et ingénieur des Ponts et Chaussées. Ses recherches portent sur les techniques constructives dans leurs relations aux climats intérieurs et à l'environnement. Il a contribué à de nombreux ouvrages (Les réparations dans l'histoire, History of Construction Cultures) et publie régulièrement dans des revues scientifiques internationales (Energy & buildings, Building & Environment, Resources, Conservation & Recycling...). Jean Souviron est également membre associé de la Mission régionale d'autorité environnementale d'Île-de-France.

Atlas des architectures de l'énergie  
AREP  
Grégoire Robida, architecte urbaniste  
Kéllisa Cartier, architecte urbaniste  
Félix Pouchain, ingénieur  
Lucas Bohnenkamp, ingénieur  
Estelle Oswald, architecte ingénieure

Vidéos « Six paysages post-carbone »  
Olivier Campagne architecte, images et vidéos avec Tokiko Maekawa et Théo Simon  
Figuration : Lou Campagne

Design graphique de l'exposition  
Jad Hussein avec Cécile Legnaghi

Design graphique de l'ouvrage Énergies légères  
Building Paris

Réalisation et montage du film « Énergirama »  
Antoine Plouzen Morvan, vidéaste

Secrétariat de rédaction  
Isabelle Havard et Julie Houis

Le Pavillon de l'Arsenal et le commissaire scientifique remercient chaleureusement les auteur.e.s et prêteurs des maquettes et objets :

ACE, Akuo Energy, Atelier Julien Boidot, Atelier JLS, Jacques Averna et Cécile Canel, Baukunst, Cité de l'architecture et du patrimoine - Centre d'archives d'architecture contemporaine, Kris de Decker et Marie Verdeuil, Nicolas Delon, Low-tech Magazine, Musée Electropolis, Musée français du Pétrole, Renzo Piano Building Workshop, Hugh Pigott, Jelle Seegers, Tripalium.

Merci également aux sociétés et institutions qui ont apporté leur contribution à cette manifestation :

AFP, Amis de la Terre, Archives du département du Rhône et de la métropole de Lyon, Archives de l'écologie politique, Bibliothèque et Archives Canada, Bibliothèque et archives nationales du Québec, Bibliothèque nationale de France, Canadian Center for Architecture, Canadian Museum of History, CERN, Château de Versailles, Cité de l'architecture et du patrimoine – Centre d'archives d'architecture contemporaine, École nationale des ponts et chaussées, Fondation Le Corbusier, Frac Centre-Val-de-Loire, Galerie Jeanne Bucher Jaeger, Gamma Rapho, Getty Images, Jimmy Carter Library, Library of Congress, Luma Arles, Magnum Photos, MIT Museum, Musée de la batellerie et des voies navigables – Conflans-Sainte-Honorine, Musée de Bretagne, Musée national d'art moderne – Centre Pompidou, Musée d'Orsay, NASA, Nationalmuseum – Stockholm, Oklahoma Historical Society, Paris Musées/Musée Carnavalet – Histoire de Paris, Port of Aalborg, Royal Institute of British Architects, Réunion des musées nationaux, Royal Collection Trust, Scala Archives, Smithsonian Institution, University of Toronto – Roberts Library, The U.S. National Archives, Wisconsin Historical Society

et plus particulièrement :

Michael Amery, Quitterie Amiel, Chloé Ballyn, Olivier Barbet, Thomas Bellanger, Chiara Bennati, Nolwen Bogaert, Clarisse Bourgeois, DeCarlos Boyd, Valérie Bruandet, Charlotte Brussieux, Vanille Busin, Stefania Canta, Brian Dalby Rasmussen, Elise Debacker, Peter Deeney, Arnaud Dercelles, Hervé Frisof, Antoni Garcés, Anaïs Gerard, Adrià Goula, Erik Grove-Nielsen, Karen Lawson, Ferdinand Ludwig, Roberto Maffei, Marianne Majerus, Lisa Marine, Mhairi Martino, Courtney Matthews, Claire Michaud, Marc Montagne, Eva Moudar, Jean-Christophe Nault, Claus Nybroe, Daniel Partridge, Jennifer Pearce, Céline Pereira, Florencia Pierri, Hugh Piggott, Alessandra Pinzani, Bernard Plattner, Vincent Prévost, Alexandre Ragois, Isabelle Sadys, Sophie de Saint-Phalle, Philippe Samyn, Guillaume Saquet, Jelle Seegers, Bennet Smith, Elena Spadavecchia, Maja Thordahl Schou, Jérôme Viardot, Anthony Wilkinson, Agnès de Zolt.

Raphaël Ménard remercie chaleureusement Alexandre Labasse, à l'initiative de ce projet.

Énergies légères est pour partie issue d'Énergie, Matière, Architecture, doctorat soutenu par Raphaël Ménard en 2018, et à ce titre, ce dernier salue Robert Le Roy et Mindjid Maizia pour leurs accompagnements et leurs conseils. En amont aussi, des énergies amicales et précieuses : Jean-François Blassel, Maurizio Brocato (†2023), Julien Choppin, Nicola Delon, Panos Mantziaras, Sara Formery, Jean Sébastien Lagrange, Philippe Bihoux, Laurent Grimaud et les anciens collègues d'Elioth. Remerciements tout particuliers aux énergies indispensables : Anne-Sophie Harnisch, Camille et Paul.

Le Pavillon de l'Arsenal et Raphaël Ménard adressent leurs remerciements tout particuliers au Groupe EDF pour son soutien.



Contact : Estelle Sabatier, urbaniste  
Directrice des publics, de la communication,  
des événements et du numérique  
estellesabatier@pavillon-arsenal.com  
0681306456





Pavillon de l'Arsenal  
Centre d'urbanisme et d'architecture de Paris  
21, boulevard Morland 75004 Paris  
[www.pavillon-arsenal.com](http://www.pavillon-arsenal.com)