

Physique pour l'énergie et le climat

RÉSUMÉ

Face aux crises climatique et énergétique, la France s'est engagée dans une **transition énergétique** vers un mix énergétique décarboné en 2050, avec un cap crucial à franchir en 2030. Cette transition va nécessiter des sauts conceptuels ou technologiques et une prédiction du contexte climatique impactant la consommation énergétique. De nombreux physicien·nes seront ainsi impliqués dans des travaux liés à l'amélioration des dispositifs de conversion d'énergie, dans les scénarios de transition ou dans la physique du climat à l'horizon 2035.

En **fission nucléaire**, de nouveaux concepts de réacteurs (*Small Modular Reactors*, réacteurs de 4^e génération) nécessitent l'acquisition de nouvelles données de base (modélisation neutronique et thermo-hydraulique, couplages multi-physiques). Le déploiement de la **fusion nucléaire** nécessitera des avancées expérimentales, théoriques, numériques (instabilités, turbulence et transfert radiatif à des échelles multiples) et technologiques (champs magnétiques intenses, lasers haute cadence, matériaux). L'augmentation de l'efficacité des **convertisseurs photovoltaïques** suppose l'émergence de nouveaux matériaux et de nouvelles architectures s'appuyant sur la maîtrise des processus de relaxation et des phénomènes physiques aux interfaces, sur les caractérisations multi-physiques, multi-échelles et *operando*, et sur la prédiction du comportement à long terme des dispositifs. Des besoins similaires existent pour la **conversion d'énergie éolienne et hydraulique**. La physique des porteurs d'énergie (électrons, photons, phonons), de leur couplage et de leurs interactions à l'échelle microscopique est cruciale pour la conversion entre les différentes sources d'énergie, que ce soit pour le **moissonnage de l'énergie** à très petite échelle ou pour le développement de nouveaux concepts d'utilisation rationnelle de l'énergie. L'intermittence des énergies renouvelables nécessaires à la transition énergétique impose le recours massif à des moyens de stockage aux échelles globale et locale, où l'efficacité des cycles stockage/déstockage devra être optimisée. Des progrès théoriques dans le domaine des matériaux sont nécessaires pour le **stockage d'hydrogène** à grande échelle (fatigue, cyclage). Dans les **batteries**, une majorité des phénomènes importants (corrosion, formation d'interphases ou de dendrites) ont lieu au niveau des interfaces, nécessitant de développer des méthodes *operando* pour sonder des échelles de temps et d'espace de plus en plus étendues, afin d'améliorer les performances et les durées de vie. La physique peut permettre de limiter l'impact du changement climatique en

contribuant à améliorer l'**efficacité énergétique** des procédés et des matériaux, ainsi que la prise en compte des contraintes de seconde vie et de recyclage dès l'élaboration des matériaux (pour la construction ou l'énergie) et des systèmes. L'optimisation de la **valorisation du CO₂** grâce aux plasmas froids est une autre piste à explorer. Pour réussir la transition énergétique, un enjeu important est de comprendre globalement, à l'aide d'outils physiques, l'**interaction complexe** entre demande sociale, déploiement des réseaux électriques et urbains, et demande en minéraux disponibles pour les équipements utilisés.

Physique pour l'énergie et le climat

Le couplage climat/énergie a un impact majeur sur les scénarios de transition. La physique statistique et la physique des systèmes complexes offrent des outils et des approches spécifiques. Des dizaines de problèmes originaux en physique théorique et en physique expérimentale attendent d'être défrichés pour améliorer la modélisation du climat à l'échelle régionale. Ces études permettront de contribuer aux politiques d'atténuation du changement climatique et d'adaptation en rendant quantitative la compréhension des points de bascule et des événements extrêmes. Pour relever ces défis scientifiques, trois domaines de la physique sont appelés à jouer un rôle clé: (I) la modélisation combinant des approches théoriques, numériques et expérimentales basées sur les domaines de la turbulence, de la mécanique, de la mécanique des fluides et des systèmes dynamiques; (II) la physique statistique pour développer des méthodologies nouvelles pour l'étude des changements d'échelles et des dynamiques complexes liées au climat; (III) la spectroscopie pourvoyeuse de méthodes expérimentales novatrices pour améliorer les mesures et l'observation du système Terre. Plusieurs lignes de force intéressantes énergie et climat se dégagent: les phénomènes physiques doivent être considérés sur des échelles de temps et d'espace étendues, ce qui nécessite une hiérarchisation des modèles et une connexion entre les différentes échelles; les couplages non linéaires entre différents phénomènes, en général hors d'équilibre et souvent dans des régimes instables, doivent être pris en compte; il est nécessaire de disposer de mesures (directes ou indirectes) en conditions opératoires des systèmes énergétiques; ces caractérisations doivent être validées en modélisant les chaînes d'instrumentation, de manière à disposer de diagnostics synthétiques et de prévisions fiables; la physique doit être abordée avec une approche transdisciplinaire de ces enjeux.

En 2021, l'humanité a consommé plus de 176 000 TWh d'énergie primaire, soit 1/10 000^e (environ) de l'énergie solaire reçue par an à la surface de la Terre. De cette énergie, plus de 80% provient d'énergie solaire stockée (pétrole, charbon, gaz, biomasse naturelle), qui est ensuite transformée par combustion et qui provoque un relargage de CO₂ portant à 420 ppm sa concentration dans l'atmosphère en 2022. Deux considérations physiques annoncent les crises planétaires qui se profilent derrière ces observations:

(i) si l'humanité extrayait toute sa consommation d'énergie primaire du flux solaire en maintenant un rythme de

2% de croissance par an, l'ordre de grandeur du prélèvement dépasserait avant la fin du siècle l'amplitude de la variation naturelle d'irradiance du Soleil (0,04 % sur une période de 11 ans), qu'on a montré avoir un impact faible, mais mesurable sur le climat. Cette comparaison montre que l'énergie à notre disposition n'est pas illimitée, ce qui conduit à une crise énergétique.

(ii) à bien plus court terme, l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère accroît l'effet de serre qui contrôle la température d'équilibre de la Terre, perturbant ainsi les équilibres climatiques qui en dépendent. Les combustions passées, présentes et futures des stocks fossiles nous précipitent donc dans une crise climatique, dont nous commençons à ressentir les effets.

La prise de conscience de ces deux crises imbriquées l'une à l'autre a conduit la France à adopter un plan d'adaptation au changement climatique et une stratégie bas carbone. Trois éléments seront essentiels pour leur succès:

(i) la disponibilité de modèles de climat fiables;

(ii) l'amélioration de l'efficacité énergétique;

(iii) la mise en place d'un plan de sobriété. Les trajectoires de transition indiquent un cap crucial en 2030. Les processus physiques intervenant de façon centrale dans le climat ou les dispositifs de conversion d'énergie doivent pouvoir être étudiés en priorité.

La physique joue un rôle majeur pour traiter ces défis énergétique et climatique. Un premier aspect concerne les dispositifs de conversion des principales sources d'énergie décarbonée. Le second est l'identification des besoins (matériaux, appareils de mesures) et des concepts qui permettront de dépasser les verrous actuels (limites des architectures, criticité des composants et empreinte énergétique des systèmes). La nécessité de gérer l'adaptation de la demande et de l'offre nous amènera à passer en revue les technologies permettant le stockage de l'énergie et les enjeux scientifiques pour leur mise en œuvre. Nous aborderons les questions de la sobriété, de l'efficacité dans l'utilisation de l'énergie et le problème du recyclage ainsi que de ses limites (captage et valorisation du CO₂, maîtrise du cycle du combustible nucléaire). Dans le contexte des enjeux climatiques, il sera nécessaire d'estimer l'impact de l'utilisation de ces sources sur les grands bilans climatiques et de les inclure dans les scénarios de transition énergétique et dans les modèles climatiques, en identifiant les verrous qui relèvent du champ de la physique. Le cadre et les problèmes ayant été posés, nous passerons en revue les

besoins d'instrumentations et les méthodologies issues de la physique, sur lesquelles la communauté pourra s'appuyer pour aborder ces problèmes et s'impliquer dans la physique pour l'énergie et le climat.

CONVERSION DE L'ÉNERGIE

À PARTIR DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

En fission nucléaire, la compréhension fondamentale reste un enjeu, et l'arrivée de nouveaux concepts de réacteurs (*Small Modular Reactors*, ou réacteurs de quatrième génération à sels fondus, permettant une grande flexibilité compositionnelle et la transmutation de certains actinides mineurs) nécessite l'acquisition de nouvelles données de base. Des besoins importants en instrumentation existent donc pour développer de nouveaux capteurs et détecteurs adaptés aux conditions d'opération. La recherche fondamentale (expériences et simulations) sur les réacteurs concerne la modélisation neutronique et thermo-hydraulique, les couplages multi-physiques, la modélisation du cycle du combustible et le transport des radionucléides dans les argiles. Ces travaux sont menés de front avec des études environnementales (effet sur les organismes vivants et ressources géologiques disponibles).

Concernant la **fusion thermonucléaire**, les défis sont multiples à l'heure de l'entrée en opération des grandes installations expérimentales où seront atteintes les conditions extrêmes qui devraient permettre l'auto-entretien des réactions de fusion par confinement magnétique (voir le chapitre *Physique des régimes extrêmes*). Elles ajoutent la dynamique des particules chargées rapides à la complexité du plasma chaud hors équilibre où s'entremêlent instabilités, transport turbulent et transfert radiatif. Les régimes du plasma dans les filières magnétique et inertielle diffèrent dans leur densité et leurs temps caractéristiques (fonctionnement quasi-continu en filière magnétique, impulsif en filière inertielle). Des progrès fondamentaux dans la cadence des lasers, leur rendement, ainsi que la fabrication en masse des cibles seront nécessaires pour atteindre une répétitivité suffisante en filière inertielle. Le schéma de fusion devra également être démontré à des gains supérieurs aux valeurs actuelles. En filière magnétique, les technologies d'aimants supraconducteurs à haute température critique pourraient ouvrir la voie à des centrales plus compactes (doubler le champ magnétique permettrait de diviser par 16 le volume du réacteur pour une même puissance). L'extraction de puissance et la maîtrise du confinement (régimes turbulents, bifurcations) restent un point crucial pour les installations de démonstration. La simulation de ces plasmas hors équilibre, qui est nécessaire pour l'opération et l'optimisation des réacteurs, met en jeu une physique non linéaire, complexe et riche, impliquant de nombreuses échelles spatio-temporelles et des effets cinétiques propres aux dynamiques des électrons, des ions ou des particules neutres. Elle se décline en une hiérarchie de modèles et fait appel aux dernières avancées des sciences numériques (intelligence

artificielle, exascale). La validation des modèles repose crucialement sur l'instrumentation et la modélisation de la mesure, qui permet une comparaison intégrée. Enfin, le cycle du tritium reste un enjeu de recherche crucial pour déployer l'électricité issue de ces processus de fusion.

Le développement de **nouveaux matériaux** est un point commun à toutes les filières. Les composants des réacteurs et du cycle du combustible contiennent des matériaux soumis à différentes conditions d'irradiation qui dépendent des filières, de la position des composants dans le système et du type de déchets conditionnés. Les pertes d'énergie des rayonnements et des particules créent des déplacements atomiques et des excitations électroniques, qui se trouvent couplés à des sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques à différentes échelles. Elles induisent aussi une évolution de la composition par transmutation. Pour pouvoir contrôler la dégradation des propriétés, il est ainsi nécessaire d'étudier : la formation des défauts, leur évolution et les phénomènes de synergie électronique/nucléaire ; les effets des contraintes locales ou de champ élastique sur la diffusion ou le piégeage des hétérogénéités ; la formation des bulles de gaz, leur capacité de piégeage ou de création de défauts. Les nouveaux défis résident dans l'étude : (i) des échelles intermédiaires (hétérogénéités, joints de grain, interfaces) et de leur effet sur les propriétés macroscopiques, sur des structures spécifiques obtenues par fabrication additive, ou sur les matériaux à haute entropie ; (ii) des effets de couplage des sollicitations (déformation sous flux, corrosion sous irradiation). Ces défis nécessitent de maintenir à niveau les systèmes d'irradiation et d'approfondir les techniques accessibles au rayonnement synchrotron *in situ* et *operando*, d'assurer la continuité entre les différentes échelles de simulation (atomistique, gros-grains, quasi-continuum) et d'approfondir la modélisation des signaux issus des techniques de caractérisation pour mieux identifier les défauts.

À PARTIR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'**efficacité des convertisseurs photovoltaïques** approche des limites fondamentales pour les architectures mono-jonctions commercialisées actuellement. Au-delà des structures tandem, les architectures basées sur des multi-jonctions paraissent difficilement transférables à l'échelle industrielle. D'autres alternatives existent, basées sur des processus physiques moins maîtrisés, tels que la conversion de photons basse ou haute énergie. Pour augmenter les efficacités de conversion, le contrôle des processus de relaxation est crucial : règles de sélection des transitions, génération d'excitons multiples, porteurs chauds, cohérences, processus coopératifs. Des matériaux optimaux et des développements en physique des systèmes fortement hors équilibre et des approches photoniques sont nécessaires : il faudra comprendre simultanément les parties optiques, électroniques et le couplage des processus avec la dynamique du réseau. La physique des interfaces (étude des

transferts de charge et d'énergie aux petites échelles, leur structure et leur sélectivité) est un autre point clé, car les interfaces contrôlent l'essentiel des conditions pour l'efficacité et la stabilité. Un deuxième défi porte sur **l'émergence de nouveaux matériaux** (voir le chapitre *Électronique et Photonique Avancées*). À l'échelle du térawatt de production globale, les matériaux permettant une production efficace, bon marché et fiable sont encore à découvrir. Des stratégies en rupture seraient susceptibles de changer les paradigmes, comme on l'a vu avec l'émergence des pérovskites halogénées. Un dernier défi concerne **la prédiction du comportement des dispositifs dans le temps long**. Aujourd'hui, rien ne se substitue aux essais en conditions réelles sur un temps long, ce qui constitue un goulot d'étranglement pour l'utilisation des technologies mises au point en laboratoire. Ce domaine négligé est riche de questions scientifiques auxquelles la physique devrait contribuer.

À PARTIR DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Les **systèmes de récupération de l'énergie éolienne** sont appelés à prendre une part importante dans la production électrique, en particulier pour l'éolien offshore qui présente un potentiel important. Un enjeu de la recherche est d'imaginer des solutions durables pour des éoliennes adaptées à la bathymétrie, à la nature des fonds et à des conditions de vent et de mer contraignantes pour les structures et les matériaux. Un autre enjeu est d'assurer le raccordement au réseau électrique et/ou un stockage approprié, avec des impacts toujours plus réduits et pour un coût de production qui soit compétitif. Les défis à résoudre concernent : la modélisation du vent à des échelles spatio-temporelles très variées (de l'échelle de la pale à celle des pays) ; la modélisation de la bathymétrie sous-marine ou des effets de la mer sur la ressource en vent pour les parcs d'éoliennes offshore ; l'instrumentation associée (mesure *in situ* et *operando*, sur bancs dédiés) pour développer les modèles, le contrôle et le pilotage des installations ; la recherche d'alternatives renouvelables ou recyclables à certains matériaux utilisés dans les composants des éoliennes actuelles (terres rares, aimants permanents, matériaux composites...) ; le développement de systèmes de stockage adaptés à la production des éoliennes sur terre ou en mer (production intermittente en mer).

UN NOUVEAU CONCEPT : L'ÉNERGIE OSMOTIQUE

L'énergie osmotique (ou énergie bleue) est une source d'énergie d'origine entropique qui pourrait être extraite du mélange entre les eaux douces des fleuves et l'eau salée des mers. De nouvelles perspectives ont été ouvertes pour sa récupération, peu efficace avec des membranes, à l'aide de phénomènes physiques différents (diffusion-osmose, mélange capacitif...). Les défis portent sur la compréhension et l'optimisation des processus couplés dans des systèmes nanofluidiques et/ou nanoporeux. Pour y parvenir, des approches interdis-

ciplinaires sont nécessaires à la croisée de la physique et de la chimie des interfaces, ou de la science des matériaux. Associer expériences et modélisations est crucial pour comprendre les phénomènes complexes impliquant conjointement la réponse électronique des solides, l'hydrodynamique et la physicochimie des liquides. La préservation des écosystèmes est également à prendre en compte lors de la conception et de la construction des systèmes d'exploitation.

MOISSONNAGE DE L'ÉNERGIE AUX TRÈS PETITES ÉCHELLES

Il est possible de récupérer de l'énergie à l'échelle nanométrique par conversion entre les énergies thermique, lumineuse, magnétique, mécanique ou chimique. L'étape ultime vise à réaliser des conversions multiples dans le même composant. L'ordre de grandeur des énergies récupérables est pertinent pour l'alimentation d'objets nécessitant de petites puissances (du nanowatt au milliwatt), et pour la compréhension du fonctionnement d'autres convertisseurs. La **physique mise en jeu est celle du transport des porteurs d'énergie** (électrons, photons, phonons), leur couplage et leurs interactions, et la physique fortement hors équilibre, le tout à l'échelle nanométrique. Les enjeux sont de :

- (1) dépasser le modèle de Fourier et atteindre le contrôle du transport quantique de la chaleur ;
- (2) développer des modèles de transport de chaleur dans les polymères ou matériaux amorphes, à travers des nano-contacts ou des nano-constrictions ;
- (3) identifier la résistance thermique limite à cette échelle ;
- (4) explorer la physique du phonon : effet thermique cohérent, localisation, effet tunnel ;
- (5) jouer sur le libre parcours moyen de ces phonons ;
- (6) utiliser les fluctuations de charges, de polarisation aux interfaces/surfaces ;
- (7) étudier les transferts de chaleur aux temps ultra-courts ;
- (8) étudier l'activité thermique des cellules.

Ces effets physiques pourront être étudiés dans des matériaux tels que les métamatériaux thermiques, les matériaux à changement de phase, les isolants topologiques, les systèmes non réciproques, les systèmes ioniques ou encore les systèmes à base de biomatériaux (origami d'ADN, cellules artificielles, mitochondries, protéines).

STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Mener la transition énergétique accentue les contraintes pour la conduite des réseaux alimentés par une part importante d'énergies renouvelables variables. Il est en particulier nécessaire de disposer de moyens de stockage à grande échelle. De plus, des moyens de stockage à une échelle locale sont cruciaux pour assurer les besoins en mobilité ou le stockage de l'énergie de sites isolés. Un enjeu important est l'efficacité d'un cycle allant du stockage à la récupération de l'énergie sous forme électrique (Table 1).

Origine	DES (Wh/kg)	RS (élect. A/R)
Essence	10 000	
Hydrogène	30 000	35%
Air comprimé (CAES)		50%
Batteries (Pb)	40	70%
Batteries (Li)	220	90%
Hydroélectricité (STEP)	0,27 (chute de 100 m)	80%
Volants d'inertie	10-20	90%

Table 1: Densité d'énergie (DES) et rendements (RS) de stockage

STOCKAGE À GRANDE ÉCHELLE : LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE

Le stockage d'énergie sous forme de gaz dans des gisements d'hydrocarbures épuisés permet de stocker à grande échelle et à grande profondeur (1000 m à 2000 m). Des cavités salines créées par dissolution de volumes importants permettent aussi de stocker de nombreuses variétés d'hydrocarbures (à environ 1000 m de profondeur, jusqu'à des pressions de 200 bars). Enfin, des cavités minées (profondes de 100 m à 150 m) sont aussi utilisées, où l'étanchéité du stockage repose le plus souvent sur un principe dit de « confinement hydrodynamique » faisant intervenir la nappe phréatique. Ces techniques sont adaptables au stockage d'énergie non carbonée.

Pour *le stockage d'hydrogène*, plusieurs enjeux nécessitent l'acquisition de connaissances théoriques pour une meilleure gestion des risques et pour optimiser les coûts : l'altération des élastomères et la fragilisation des aciers par l'hydrogène, et pour les cavités minées revêtues de membranes métalliques, le comportement des aciers à la fatigue oligo-cyclique, notamment au-delà de la limite élastique. Pour les **stockages d'air comprimé**, la recherche porte essentiellement sur la gestion thermique du stockage en surface pour porter le rendement de 50 % à 70 %, notamment au niveau des matériaux dans le domaine de pression envisagé (200 bars en fin de compression). Enfin, les **batteries à flux en cavité saline** motivent la recherche de couples rédox performants à grande échelle.

STOCKAGE GRAVITAIRE

Une autre possibilité de stockage de l'énergie à relative grande échelle est le **stockage gravitaire** associant deux retenues et des turbines opérant en production d'électricité lorsque l'eau est conduite de la retenue amont à la retenue aval, ou en stockage d'énergie en pompant l'eau de la retenue aval vers l'amont. On réalise ainsi une station de transfert d'énergie par pompage (STEP). Les machines hydrauliques — turbines ou pompes — fournissent de l'énergie très rapidement, mais sont aussi capables d'absorber les excès de pro-

duction. Avec les énergies renouvelables variables, les machines hydrauliques sont de plus en plus sollicitées dans des régimes éloignés du point nominal de fonctionnement.

Ces nouveaux comportements nécessitent de trouver de nouveaux alliages pouvant résister à la fois aux concentrations de contraintes plus récurrentes, à l'abrasion par les sédiments et à l'érosion causée par la cavitation intermittente. La fatigue subie par les aubes ou les parties mécaniques sensibles est encore mal connue et réclame des indicateurs issus de capteurs embarqués pour le diagnostic vibratoire. Ces machines forcées à produire rapidement de l'énergie en travaillant dans des zones d'écoulement instable amènent à changer de paradigme et à ne plus considérer les écoulements internes par une approche globale (rendement moyen, puissance cumulée), mais au travers d'une vision plus dynamique semblable à celle de la physique des transitions (fluctuations de pression, hystérésis hydraulique). Malgré l'augmentation de la puissance de calcul numérique, ces simulations restent très coûteuses en temps et en énergie. L'objectif recherché est de pouvoir utiliser les données des capteurs embarqués pour disposer de simulations intégrant la partie stockage dans un système global.

STOCKAGE LOCAL VIE DES BATTERIES

Le stockage électrochimique de l'énergie constitue actuellement la voie la plus efficace pour assurer le stockage à l'échelle locale. Le développement des batteries ces 20 dernières années a été soutenu par l'essor des appareils électroniques nomades, puis par le besoin grandissant en moyens de transport électriques (vélos, voitures, autobus). Elles sont maintenant produites en masse dans des usines géantes (*gigafactories*).

Sur le plan scientifique, le développement des batteries est majoritairement dû à la découverte de nouveaux matériaux pour les électrodes et les électrolytes, mais les mécanismes de charge/décharge sont longtemps restés mystérieux. Parmi les technologies en cours d'étude, les batteries Li-ion à électrolyte liquide dominent actuellement le marché, mais les batteries dites tout-solide per-

mettraient en principe des performances accrues. Dans les deux cas, une majorité des phénomènes importants (corrosion, formation d'interphases, de dendrites) ont lieu au niveau des interfaces. C'est pour mieux comprendre ces interfaces, et développer des matériaux de plus grandes capacités ou de plus haut potentiel, que des investissements importants ont été réalisés au sein des grands instruments (synchrotrons, sources de neutrons). La difficulté est d'obtenir une très bonne résolution spatiale tout en permettant les mesures sur des dispositifs en cours de fonctionnement (méthodes qualifiées d'opérando). Les échelles de temps et d'espace impliquées sont très étendues, de quelques nanosecondes pour les phénomènes les plus rapides (diffusion du lithium) à quelques années pour comprendre les phénomènes de vieillissement, et pour des dimensions allant de l'échelle atomique à quelques millimètres pour les systèmes complets. L'amélioration de l'efficacité du cycle de conversion électrochimique pour l'utilisation du vecteur hydrogène, qui relève essentiellement de la chimie, devra faire appel à des outils similaires.

RÉSEAUX DE TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

La topologie, l'équipement et le fonctionnement des réseaux de transport et distribution de l'énergie (gazoducs et oléoducs, réseaux de d'électricité et de chaleur) sont fortement impactés par le développement des énergies renouvelables. Le système électrique devant assurer en permanence l'équilibre offre/demande, il doit être conçu pour faire face à ces fluctuations à toutes les échelles de temps, en utilisant la flexibilité de la demande, les échanges et connexions à grande échelle, les moyens de stockage et les moyens de production pilotables. Cette analyse d'un type nouveau est prépondérante dans la détermination des conditions de faisabilité technique et de coût économique. Notre communauté détient les outils spécifiques pour y contribuer et la mener à bien. La variabilité de la production et de la demande peut être assimilée à un processus stochastique, dont la caractérisation à toutes échelles de temps peut se déduire de simulations climatiques. Leur influence sur les réseaux peut être traitée avec les outils de la physique, notamment via des approches d'optimisation sous contraintes : minimisation de l'énergie et de la matière mise en œuvre, tout en optimisant la résilience aux pannes et aux phénomènes extrêmes (canicules, inondations) et en minimisant l'impact des ruptures en cascade dans les réseaux couplés qui incluent une part importante de stockage et une conversion entre vecteurs énergétiques (électricité, gaz et chaleur).

SOBRIÉTÉ, EFFICACITÉ ET RECYCLAGE

Limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C ou 2 °C d'ici 2100, sans recourir de façon massive à la capture et au stockage de carbone, nécessite une réduction de la consommation énergétique globale via la sobriété (réduction de consommation) ou l'efficacité (réduction

des coûts énergétiques à service rendu constant). Bien que souhaitable, la sobriété repose sur des changements de comportements ou des modes de production et de consommation qui relèvent peu de la physique. La physique en revanche peut contribuer de façon majeure à l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés et des matériaux, comme l'amélioration des rendements de conversion pour les différentes sources d'énergie. Les rendements des centrales thermiques approchent maintenant 65 % grâce à l'optimisation des turbines ou de la combustion. Les développements dans le nucléaire (réacteurs de 4e génération, décrits ci-dessus) intègrent, dès la conception, une production pour d'autres usages (hydrogène, dessalement, chaleur urbaine, chaleur industrielle) et une flexibilité de production électrique pour s'adapter à l'intermittence des énergies renouvelables.

EFFICACITÉ DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Le secteur du bâtiment et de la construction produit environ 40 % des émissions mondiales, réparties en CO₂ lié à l'usage du bâtiment (chauffage, climatisation) et en CO₂ lié à la fabrication des matériaux de construction et à leur mise en œuvre sur les chantiers. Le premier peut être diminué par :

- (i) l'isolation thermique, via de nouveaux matériaux bénéficiant des progrès de la théorie des transferts de chaleur à l'interface gaz/paroi et de l'auto-assemblage de matériaux de porosité nanométrique ;
- (ii) des vitrages plus performants (sélectifs, électrochromes) issus de nouveaux matériaux ou de l'amélioration des procédés de dépôt ;
- (iii) des matériaux traditionnels (terre crue) optimisés par la rhéologie ou renforcés par des fibres. Le CO₂ lié à la fabrication (notamment à haute température) peut être réduit en changeant le vecteur d'énergie — ce qui nécessitera des modélisations numériques multi-échelles pour adapter les fours — ou en récupérant la chaleur fatale via des matériaux thermoélectriques à base d'éléments abondants, ou encore via des systèmes optimisant l'échange de chaleur.

CIRCULARITÉ ET RECYCLAGE

Le recyclage de matériaux de construction est aujourd'hui quasiment inexistant. Il souffre d'un déficit de techniques efficaces de séparation des matériaux et de diagnostics de la capacité de ces matériaux à être réutilisés directement lors d'une rénovation. L'économie de matériaux peut également être obtenue en bifurquant vers des constructions plus légères, où le béton est remplacé par des matériaux recyclables (plâtre ou bois) et des assemblages de matériaux (métamatériaux) optimisant des propriétés contradictoires, comme par exemple l'acoustique et la légèreté. Dans les deux cas, il serait intéressant de combiner des approches chimiques et physiques dans le but de réaliser des composites aux interfaces modulables et optimisées. Dans le cas des batteries, la complexité réside dans la collecte d'élé-

ments hétérogènes dans leur composition et leur mise en forme, nécessitant une réglementation permettant la traçabilité (le « passeport batteries »). Les procédés de recyclage utilisent l'hydrométallurgie ou la pyrométallurgie, voire des sels fondus. Ils fonctionnent sans être complètement optimisés, du fait d'une connaissance limitée des mécanismes de dissolution, d'extraction et de réaction des différents éléments. Ils bénéficieraient du développement de cellules pour une analyse sur grands instruments, prenant en compte la difficulté de fonctionnement dans des conditions extrêmes (acidité élevée, hautes températures).

CAPTAGE ET VALORISATION DU CO₂

Le captage et la valorisation du CO₂ sous forme de carburants synthétiques est un type de recyclage potentiellement utile pour le stockage de l'énergie à condition d'augmenter les rendements de conversion. L'utilisation des plasmas froids pour la valorisation du CO₂ tire parti du caractère hors équilibre thermodynamique de ces milieux afin d'obtenir une excitation du CO₂ suffisante pour le rendre réactif vis-à-vis d'autres molécules. Une efficacité énergétique de conversion importante peut alors être obtenue en limitant les pertes d'énergie liées au chauffage du gaz. Des résultats très intéressants en termes de taux de conversion et d'efficacité énergétique ont déjà été obtenus pour les procédés de méthanation, et même récemment pour la méthanolisation. La limitation de ces procédés est le manque de sélectivité, que l'on compense habituellement en associant les sources plasmas froids à des matériaux catalytiques commerciaux. Plusieurs pistes d'amélioration sont à explorer :

- (i) en utilisant des matériaux conçus pour tirer parti des espèces énergétiques générées par le plasma ;
- (ii) en utilisant d'autres types de source plasma que l'actuelle décharge à barrière diélectrique (arc glissant, radiofréquence, micro-ondes, laser nanoseconde pulsé...) pour tirer parti de leurs différentes réactivités chimiques intrinsèques ;
- (iii) en décalant les équilibres chimiques dans la phase plasma par évacuation au fur et à mesure des produits indésirables formés par le plasma. Ainsi, l'association entre plasma-membrane ionique permettrait d'extraire l'oxygène des plasmas de CO₂, empêchant ainsi tous les mécanismes de réaction inverse qui reforment le CO₂ à partir de CO. Il est aussi possible de générer des plasmas de CO₂ au contact d'eau pour hydrogéner le CO₂ et transférer les molécules organiques formées directement en phase liquide.

SCÉNARIOS DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, RÉSEAUX DE TRANSPORTS ET RESSOURCES MINÉRALES

APPROCHE GLOBALE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Les fondements théoriques de la transition énergétique relèvent de la physique, mais les recherches à conduire

pour la transition énergétique sont interdisciplinaires, couplant la sociopolitique et les modélisations physico-économiques. La consommation d'énergie apparaît à tous les niveaux dans l'économie, pour transformer les matériaux, pour corriger leur dégradation naturelle ou pour réparer les objets endommagés dans le cours de leur utilisation. La construction de structures et d'infrastructures, leur maintien en fonctionnement et leur développement s'apparentent aux structures dissipatives auto-organisées, traversées par des flux d'énergie (conservée) qui se dégradent (l'entropie transportée augmente) entre l'entrée et la sortie du système. L'approche physique repose sur une « économie de moyens » en tentant de comprendre les lois régissant le système global tout en intégrant les caractéristiques pertinentes des acteurs de terrain, comme illustré dans le cas des réseaux de transport.

RÉSEAUX ET ORGANISATION URBAINE

En s'appuyant sur la sociologie quantitative et la psychologie, la physique peut travailler à comprendre l'interaction complexe entre les réseaux de transport et la demande sociale, elle-même en évolution, et à évaluer l'impact sur les infrastructures urbaines des contraintes qui en découlent. Les réseaux de transports urbains eux-mêmes sont bien connus, mais le trafic, notamment la relation entre le débit et la densité de véhicules sur un réseau de transport, reste un problème mathématique non résolu, sauf numériquement de façon partielle. Pour ce problème, des données cruciales peuvent être tirées de la téléphonie mobile. Concernant l'évolution des réseaux électriques, centrale pour la transition énergétique, les opérateurs semblent prêts aujourd'hui à un partage avancé de ces informations, ce qui ouvre le champ à une démarche de physique basée sur l'analyse et la modélisation de ces données.

MATÉRIAUX CRITIQUES ET CONSÉQUENCES SYSTÉMIQUES

L'évolution des réseaux électriques et l'ensemble des investissements nécessaires créent une nouvelle demande en minéraux dont la disponibilité peut être critique pour la réussite de la transition énergétique. L'estimation de cette disponibilité repose sur le couplage entre les spécificités physiques (thermodynamiques en particulier) de l'extraction, de la production et/ou du recyclage des minéraux, et les réseaux économiques de leur distribution. Ici la principale difficulté réside dans la modélisation des blocages d'origine humaine (oppositions locales, conflits géopolitiques) qui ont une incidence majeure sur les circuits d'approvisionnement, et par suite sur le déroulement de la transition énergétique. De même, le déploiement de nouvelles technologies, actuellement modélisé par des systèmes dynamiques (équation logistique, Lotka-Volterra), bénéficierait de la prise en compte de phénomènes sociaux contingents susceptibles de conduire à des ruptures (brexit, gilets jaunes). Cette prise en compte est envisageable via des

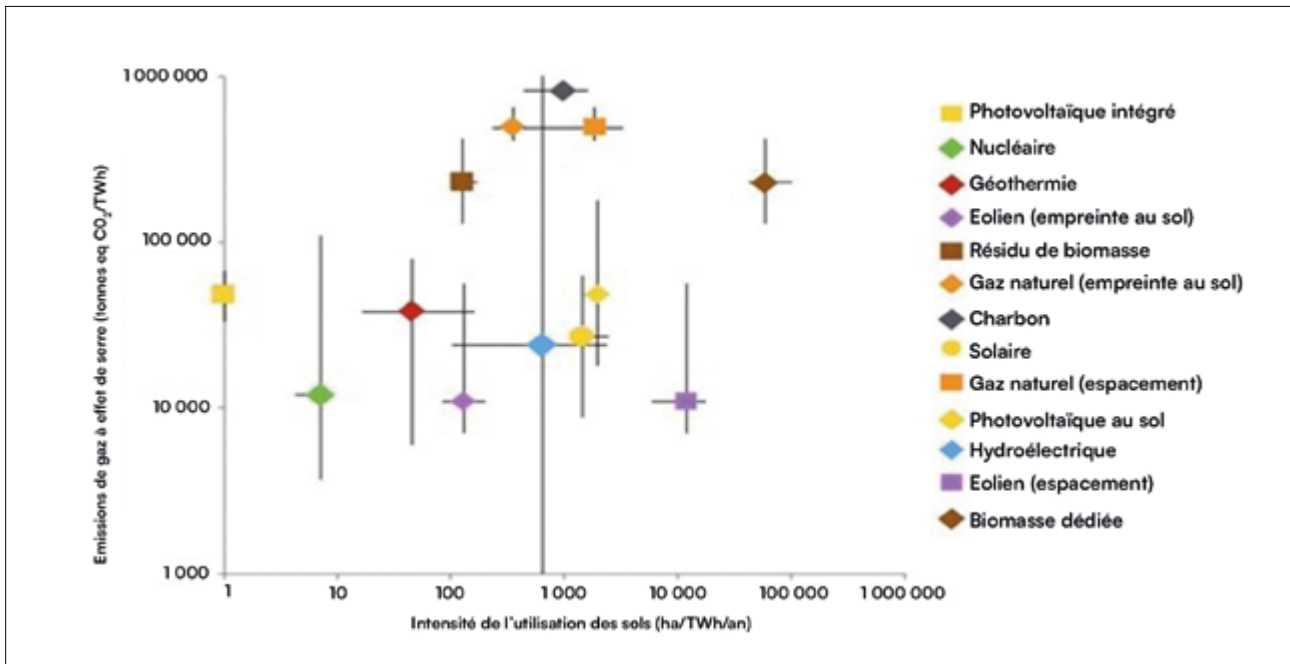


Figure 1 : Masse des gaz à effet de serre par unité d'énergie produite sur l'ensemble du cycle de vie en fonction de la surface immobilisée pour la production d'une puissance électrique donnée, pour différentes technologies de production. Les barres d'erreur représentent l'écart interquartile. (S. Schlömer *et al.* Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014, pp. 1329-1356.)

« jeux sérieux » (*serious games*) ou bien via la physique statistique.

COUPLAGE ÉNERGIE ET CLIMAT

Les problématiques de l'énergie et du climat sont intimement liées. La production d'énergie impacte le climat par les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre qu'elle implique, comme montré en Figure 1. Inversement, le système énergétique dépend des conditions météorologiques et climatiques. Cette dépendance a un impact majeur sur les scénarios de transition et elle régit notamment les fluctuations de la demande d'énergie en fonction de la température et celles de la production d'énergies renouvelables éoliennes ou solaires. L'adaptation du système énergétique au changement climatique, en particulier aux événements extrêmes de plus en plus fréquents et intenses, est également problématique, que ce soit via le manque potentiel d'eau pour le système énergétique (nucléaire, hydraulique) et les conflits d'usages, la destruction d'infrastructures par les événements extrêmes, ou encore la réponse des réseaux de distribution aux températures extrêmes. Les physicien·nes ont également pour ces problèmes des outils spécifiques en lien avec l'étude des extrêmes climatiques et les événements rares associés.

PHYSIQUE POUR LE CLIMAT

Les sciences du climat font intervenir virtuellement toutes les disciplines scientifiques. Cependant, les

sciences physiques sont au centre de la compréhension moderne de la dynamique du climat, qui repose essentiellement sur le couplage du bilan radiatif avec la dynamique des composantes du système climatique. De nombreux défis scientifiques sont à relever dans ce domaine. Les modèles climatiques sont exceptionnellement fiables pour la prédiction des tendances globales, mais peu fiables quantitativement à l'échelle régionale pour certaines observables. Les modèles ont également des difficultés à prédire la sensibilité climatique, qui quantifie l'augmentation de la température pour un doublement du CO₂ dans l'atmosphère. Le dernier rapport du GIEC en donne une estimation située entre +2,5 °C et +4 °C, avec une valeur la plus probable de +3 °C. Ces barres d'erreurs restent importantes, eu égard au rôle crucial de cette quantité dans les impacts du changement climatique. Les seuils des points de bascule (ou bifurcations) potentiels du système climatique restent également très mal quantifiés. De même, la caractérisation des événements extrêmes souffre du manque de données empiriques, alors qu'elle est par ailleurs très difficile à obtenir à partir des modèles climatiques. Pour relever ces défis scientifiques, trois domaines de la physique sont appelés à jouer un rôle clé :

- (i) la modélisation, combinant des approches théoriques, numériques et expérimentales, basées sur les domaines de la turbulence, de la mécanique, de la mécanique des fluides et des systèmes dynamiques ;
- (ii) la physique statistique, pour développer des méthodologies nouvelles pour l'étude des changements d'échelles et des dynamiques complexes liées au climat ;

(iii) la spectroscopie, pourvoyeuse de méthodes expérimentales novatrices pour améliorer les mesures et l'observation du système Terre.

L'ENJEU DU BILAN CARBONE

Les chercheurs s'intéressant au climat accordent beaucoup d'importance à l'impact environnemental et au bilan carbone de leur recherche, qu'il s'agisse des missions ou des achats de matériel neuf. Ils sont engagés dans des efforts de sobriété et d'efficacité. Plus largement, la réflexion sur l'impact environnemental de nos travaux, et sur la meilleure façon de les mener tout en préservant leurs ambitions, fait partie intégrante des objectifs de recherche, dès aujourd'hui et encore plus dans les années à venir (voir chapitre *Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en physique*).

PHYSIQUE POUR LA MODÉLISATION DU CLIMAT

L'amélioration des prédictions régionales de la sensibilité climatique, l'étude des impacts des changements climatiques, ou encore l'étude quantitative des points de bascule du système climatique nécessitent une diminution des incertitudes liées aux modèles numériques de climat. Il faut pour cela disposer de données plus précises et améliorer les modèles climatiques, en particulier au niveau de la représentation effective (paramétrisation) des degrés de liberté non résolus. Les contributions potentielles des physicien·nes à ces enjeux varient suivant les composantes du système Terre considérées.

Les océans couvrent 70 % de la surface de la Terre. Ils absorbent 90 % de la chaleur associée au réchauffement climatique et 30 % du CO₂ émis par les activités humaines. Leur capacité à stocker ces éléments sur des échelles de temps très longues en font un des régulateurs principaux du climat futur. Une description précise des écoulements océaniques est rendue difficile par la large gamme d'échelles et de processus mis en jeu. En particulier, des paramétrisations relativement *ad hoc* sont utilisées pour décrire tous les processus de transfert turbulent à petite échelle, en vue de comprendre la dynamique du système à grande échelle. En réalité, trois processus gouvernent la stratification des océans et la circulation méridionale océanique : le vent dans l'océan austral, la convection au voisinage des pôles et la diffusion turbulente au sein des bassins océaniques. Certains de ces processus ne sont que partiellement compris dans le contexte océanique alors que différents systèmes idéalisés permettent de les étudier de façon indépendante et d'obtenir des lois d'échelle simples (citons par exemple la turbulence barocline). À une échelle plus globale, certaines descriptions modernes de la circulation méridionale océanique ne datent que des années 2010, ce qui montre que des progrès majeurs ont encore été effectués récemment. Enfin, la diffusion turbulente dans les bassins océaniques est due aux ondes internes qui rayonnent au niveau des structures topographiques au fond de l'océan, au régime non-linéaire

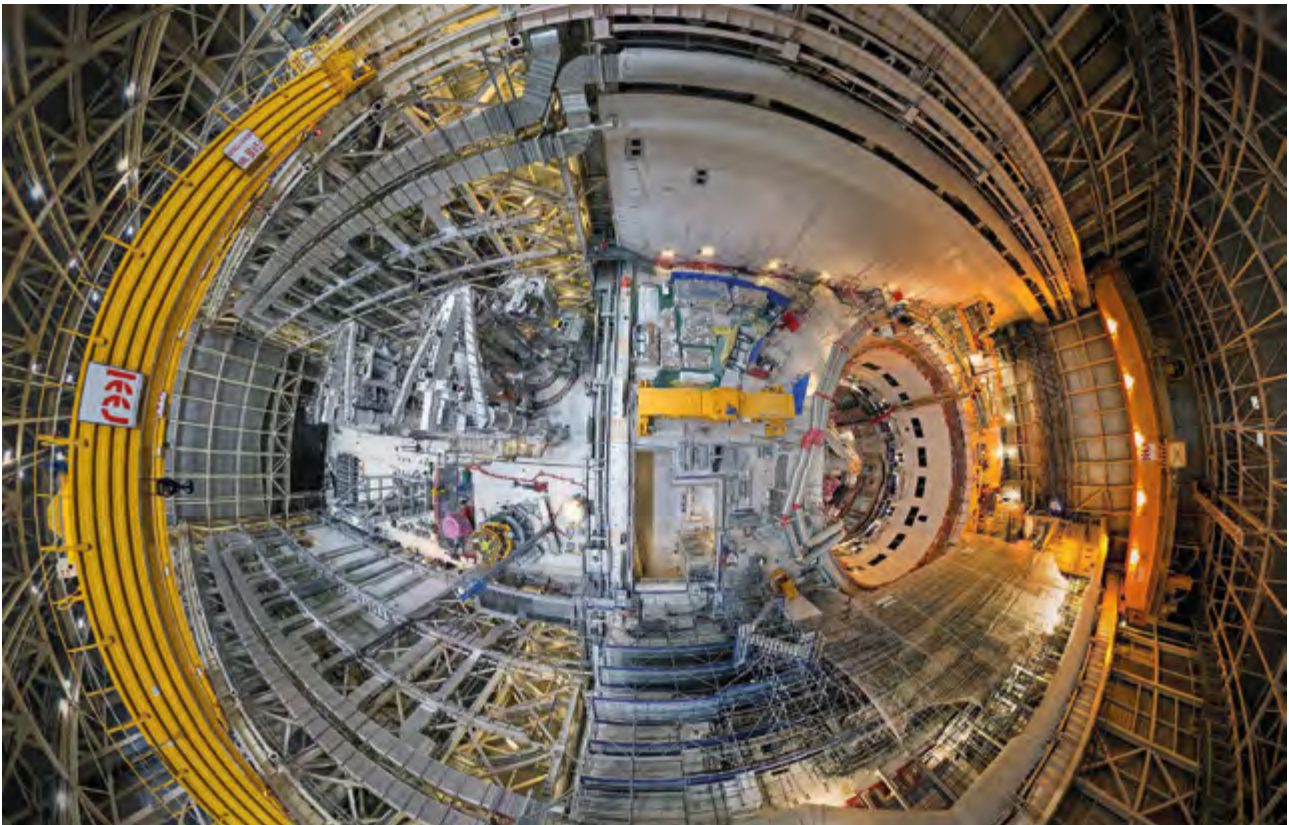
de ces ondes, voire à un régime de turbulence d'ondes.

La cryosphère terrestre fait référence à l'ensemble des milieux gelés, permanents ou saisonniers, à la surface de la Terre. Elle est le siège de processus thermodynamiques, non-linéaires et multiphasiques. La mutation de la cryosphère est lancée, du fait du changement climatique. La banquise de l'océan Arctique décline rapidement et pourrait disparaître d'ici à la fin du siècle. Les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique se déversent de plus en plus vite dans les eaux polaires depuis plusieurs décennies, augmentant le niveau des mers. Les glaciers montagneux disparaissent, modifiant le débit de nombreuses rivières. Le pergélisol se dégèle, relâchant des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Parmi les verrous scientifiques relevant du champ de la physique, on peut citer :

- (1) l'absence de modèles fiables des couches limites turbulentes, modèles qui permettraient de prédire les flux de chaleur de l'océan vers la glace, dans les régimes sous-glaciaires observés sur le terrain ;
- (2) la difficulté de modéliser les fractures au sein des plateformes glaciaires, dont certaines peuvent mener au vélage d'icebergs ;
- (3) l'impossibilité actuelle de caractériser la probabilité de passage d'un point de bascule au sein de la cryosphère (passage d'une cavité océanique froide à chaude ; instabilité des calottes marines (MISI, *marine ice sheet instability*) et instabilité des falaises marines (MICI, *marine ice cliff instability*) ;
- (4) l'absence de modèles d'évolution fiables de la glace de mer, dont la dynamique à l'échelle d'un floe (fragment de banquise) unique, et à l'échelle d'un agrégat de floes multiples est aujourd'hui mal comprise ;
- (5) l'absence de modèles fiables des interactions ou du frottement glace/rocher avec ou sans lubrification, modèles qui permettraient de reproduire l'ensemble des dynamiques glaciaires observées sur le terrain (mouvement lent, mouvement rapide, ou encore ancrage).

Un enjeu clé pour améliorer la modélisation de la dynamique de l'**atmosphère** et de son bilan énergétique est la modélisation de la dynamique des nuages, non résolue dans la grande majorité des modèles. Une augmentation rapide des données disponibles, venant à la fois d'observations, de modèles avec des résolutions kilométriques, et de simulations à des échelles intermédiaires devraient permettre des progrès importants dans les années qui viennent. Des modélisations issues de la physique statistique pourraient être utilisées pour décrire la distribution spatiale des nuages. De nouvelles expériences spécifiques de mécanique des fluides, étudiant la convection avec transition de phase, pourraient être des compléments très intéressants pour la compréhension de ces phénomènes.

Une grande partie des incertitudes concernant les mécanismes de déclenchement, de bascule ou de rétroaction est liée à la complexité de la **physique aux interfaces** des grandes sphères de la Terre. Les verrous scienti-



Tokamak. © Institut Max Planck de physique des plasmas (Allemagne)

physiques se situant à chaque interface sont :

- (1) interface air-terre : transferts radiatifs, turbulence de couches limites, ondes, convection ;
- (2) interface air-eau : vents, interaction vent/ondes de surface, flux air/mer ;
- (3) interface eau-terre : dunes, granulaires ;
- (4) interface glace-air : milieu granulaire, problème de bilan radiatif ;
- (5) interface glace-terre : fracture, frottement ;
- (6) interface glace-eau : couplage entre thermodynamique et dynamique à grande échelle, convection.

PHYSIQUE STATISTIQUE POUR LE CLIMAT

La physique statistique est à l'origine de plusieurs résultats importants concernant le climat : l'explication de l'auto-organisation des écoulements atmosphériques et océaniques ; la caractérisation des transitions abruptes dans des dynamiques turbulentes et leurs applications aux circulations terrestres et planétaires ; les changements d'échelles dans des dynamiques du système climatique ; la caractérisation des événements rares ou extrêmes grâce à la théorie des grandes déviations et à l'adaptation aux modèles climatiques d'algorithmes de multiplications d'événements rares ; le développement de méthodes d'apprentissage couplées avec une modélisation physique. Plus généralement, les dynamiques turbulentes de l'atmosphère et des océans peuvent se décliner en des dizaines de problèmes fondamentaux relevant de la physique statistique et pouvant mobiliser des dizaines de personnes.

SPECTROSCOPIE POUR UNE MEILLEURE OBSERVATION DE L'ATMOSPHÈRE ET DU CLIMAT

La spectroscopie optique relative au système Terre et au climat inclut la spectroscopie atomique, moléculaire ainsi que la spectroscopie de la matière condensée (agrégats, aérosols, nuages, plancton). La connaissance des constantes spectroscopiques et polarimétriques des composants du système Terre est fondamentale dans l'évaluation du bilan radiatif et thermiques de la Terre tout autant que dans l'élaboration des instruments optiques d'observation. Les contributions de la physique sont majeures aussi bien dans la démarche expérimentale que dans les approches théoriques. Les futurs travaux de spectroscopie relatifs au climat couvrent trois domaines de recherche reliés à la physique :

- (i) la mesure avec une précision extrême des constantes spectroscopiques des gaz à effet de serre, de la vapeur d'eau et de son dimère, et de l'ensemble des bandes d'absorption très faibles ou encore à découvrir ;
- (ii) la spectroscopie et la polarimétrie de la matière condensée contenue dans l'atmosphère (aérosols, noyaux de condensation) et les océans (planctons) et la comparaison des théories existantes avec celles issues de la physique statistique ;
- (iii) l'élaboration des futures plateformes d'observation du climat en exploitant des propriétés spectrales et polarimétriques de la matière, ainsi que l'utilisation de nouvelles sources de lumière, afin d'optimiser les quatre piliers de la mesure : précision, sensibilité, fiabilité et consommation énergétique.

MÉTHODOLOGIES ISSUES DE LA PHYSIQUE

Pour la compréhension des relations systémiques entre les variables physiques, technico-économiques, économiques et sociales du système énergétique et climatique, et de leurs évolutions possibles dans le futur, un outil fondamental est la modélisation, ainsi que la traduction des différentes hypothèses et relations sous formes de scénarios. Une myriade de modèles va pouvoir être utilisée, suivant la simplicité, la complexité et le réalisme des représentations des phénomènes en jeu. Un enjeu scientifique fondamental est d'obtenir des représentations et des quantifications des phénomènes qui soient cohérentes et interrogeables à travers cette hiérarchie de modèles. Un tel objectif, souhaitable, est loin d'être atteint avec les modélisations actuelles, et il constitue un défi majeur pour le futur. Au sein même de la physique, les besoins de modélisation de dispositifs complexes, isolés ou en interaction avec un environnement lui-même porteur de complexité, font appel à ces mêmes outils. C'est particulièrement le cas pour la gestion de l'énergie, la prévision climatique, et leurs interactions.

PHYSIQUE DES SYSTÈMES MULTI-COMPOSANTES ET MULTI-ÉCHELLES

La physique a développé dans le passé une gamme d'outils spécifiques et incomparables pour tous les systèmes multi-composantes et multi-échelles, en particulier ceux que nous venons d'évoquer dans ce chapitre. En physique, un phénomène est abordé en simplifiant la géométrie, en utilisant des approximations, en exploitant les symétries et en décomposant le système en petites briques élémentaires. Cette approche permet de développer une hiérarchie de modèles, basés sur la physique des composants du système, et allant du simple (interprétable, analysable) vers le complexe (réaliste, opérationnel). Des allers-retours incessants dans cette hiérarchie permettent de profiter des simplifications pour aboutir à une compréhension conceptuelle profonde, et ils donnent l'assurance d'avoir tenu compte de tous les processus physiques pertinents. La modélisation simplifiée des physicien·nes est également très bien adaptée à la démarche de validation expérimentale des travaux théoriques, dont l'absence peut sinon fragiliser les scénarios ou les résultats numériques. Cette démarche peut parfois passer par une approche combinée expérience/numérique pour concilier les mises à l'échelle, avec le développement d'outils numériques à différents niveaux de fidélité, et celui de bancs d'essais expérimentaux. C'est par exemple une perspective importante pour la modélisation réaliste du fonctionnement d'éoliennes offshore, lorsque les mesures sur site ne permettent pas d'isoler les phénomènes ou d'avoir une reproductibilité des conditions de fonctionnement.

PHYSIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES

Un enjeu majeur est de savoir si l'approche systémique ci-dessus, prenant en compte de multiples composants

et de multiples échelles, converge pour le climat ou les systèmes énergétiques; c'est-à-dire savoir si on s'approche davantage de la réalité à mesure que les modélisations deviennent plus précises (ajout graduel de nouveaux processus par exemple). Une telle question relève de la physique des systèmes complexes, dont le comportement global ne peut se ramener à une superposition de leurs composantes individuelles (voir le chapitre *Systèmes complexes*). Cette physique des systèmes complexes est encore largement à bâtir, en s'appuyant sur des outils déjà existants comme la physique statistique hors-équilibre, la physique non-linéaire ou les mathématiques, complétés de nouveaux concepts qui restent à créer et développer, et qu'on peut rassembler sous le terme « physique des interactions complexes et de l'émergence ».

LA BOÎTE À OUTILS DE LA PHYSIQUE

Quelques méthodes clés servent de support aux démarches ci-dessus : la théorie des systèmes dynamiques (chaos, bifurcations, instabilités), la théorie des réseaux, la physique statistique hors équilibre, les analyses multi-échelles pour relier les descriptions à différentes échelles de temps et d'espace, la théorie des grandes déviations et les outils associés pour l'étude des événements rares, la science des données pour les systèmes en grande dimension, l'assimilation de données dans les systèmes dynamiques, la modélisation et la description des écoulements turbulents, et plus récemment l'intelligence artificielle guidée afin de prendre en compte des relations physiques fondamentales.

PHYSIQUE DE L'APPRENTISSAGE

L'intelligence artificielle est un outil novateur, qui peut potentiellement aider à résoudre les problèmes de prédiction climatique, d'apprentissage de dynamiques effectives, de transport turbulent et de paramétrisation car elle permet de s'affranchir de modèles physiques dans les cas où ceux-ci restent trop complexes. L'IA peut aussi permettre de réduire la quantité de données nécessaires à la mise en place de simulations rapides, parfois même en temps réel pendant les expériences correspondantes. Ce sujet est discuté dans le chapitre *Nouveaux enjeux pour les méthodes numériques*. Il apparaît de plus en plus clairement que les physicien·nes ont un rôle important à jouer dans ce domaine. D'une part, les méthodes d'apprentissage statistique nécessitent d'être guidées afin de respecter les grands principes physiques (conservation de la masse et de l'énergie, par exemple). Ensuite, ces méthodes d'apprentissage nécessitent de grands jeux de données, qui ne sont pas toujours disponibles expérimentalement (manque de données dans l'océan profond, par exemple), et pourront parfois être remplacés par des données synthétiques issues de simulations. Enfin, contrairement aux méthodes de physique, les méthodes d'apprentissage ne sont pas à même d'identifier les grands principes relativement simples qui gouvernent parfois les systèmes complexes.

INSTRUMENTATIONS ET MODÉLISATION

INSTRUMENTATION POUR LA CONVERSION DE L'ÉNERGIE

Le secteur du nucléaire présente un besoin essentiel de développer des capteurs permettant le suivi du fonctionnement et des performances des réacteurs ou la validation des modèles, dans un environnement extrême qui ne permet pas des mesures directes. Pour les plasmas de fusion, cet effort s'appuie sur une physique riche (optique, spectroscopie, sondage ondes et particules, mesures magnétiques...) qui nécessite le développement de diagnostics synthétiques couplés aux codes de simulation pour une comparaison fidèle et réaliste. D'autre part, il est important d'améliorer et d'optimiser la caractérisation *in situ* et *operando* des matériaux nucléaires pour visualiser et quantifier les défauts à l'échelle locale (joint de grain, croissance de cavités/bulles, cascade unique...) ou accéder au déroulement temporel des processus. De même, dans le domaine du photovoltaïque, les études impliquant les interfaces nécessitent de nouveaux outils qui permettent le suivi de l'évolution des matériaux et de ces interfaces dans leur environnement opérationnel, ou l'utilisation combinée de plusieurs techniques pour le suivi des cellules. Pour les éoliennes, des mesures *in situ* sont aussi indispensables pour guider les développements (capteurs sur les éléments de la turbine : pales, nacelles, mât, génératrice, flotteurs). En conditions opératoires, de telles mesures doivent permettre d'améliorer les technologies de surveillance et de contrôle distant (particulièrement critiques pour les éoliennes offshore), ainsi que le pilotage individuel des divers organes des éoliennes pour développer des stratégies intelligentes de pilotage à différentes échelles (rotors/parcs/interaction entre parcs, flotteur). L'objectif ici est d'optimiser l'extraction d'énergie à l'échelle des parcs, de diminuer la fatigue des différents composants et d'augmenter la durée de vie des rotors. Finalement, le moissonnage de l'énergie à petite échelle requiert de développer de nouvelles méthodes de fabrication à des échelles inférieures à 10 nm, ainsi qu'une métrologie des systèmes nanométriques pour quantifier et comparer les efficacités.

INSTRUMENTATION POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Pour l'étude des processus physico-chimiques dans les batteries, de nombreuses techniques *operando* ont été mises en place, mais il est actuellement très difficile de relier les informations entre elles. Une tendance importante, qui va certainement s'accroître encore dans les prochaines années, consiste à mettre en place des caractérisations multimodales (ou corrélatives), au cours desquelles plusieurs techniques sont utilisées en même temps sur la même cellule. Par exemple, combiner de la tomographie avec de la diffraction ou de la microscopie permet de relier la microstructure aux phénomènes de dégradation. En particulier, des mesures mécaniques,

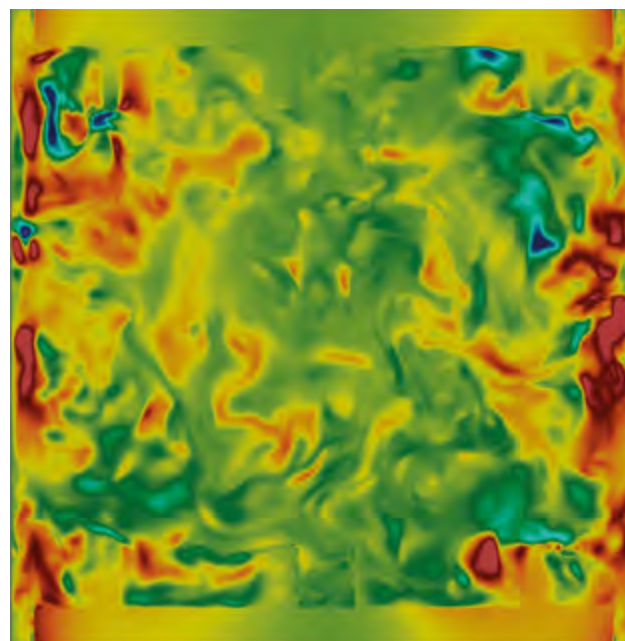
jusqu'ici souvent mises de côté, devront être couplées aux études visant à connaître la chimie des matériaux. Des besoins similaires à ceux des éoliennes existent pour les systèmes de stockage gravitaire de l'énergie (STEP) : le défi est de concevoir des capteurs intégrables lors de la fabrication des machines. Ils permettraient également d'alimenter en données des jumeaux numériques, avec un gain important en maintenance prédictive, et une opération plus fine et plus flexible.

INSTRUMENTATION POUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Un effort de métrologie est nécessaire pour relier le procédé d'élaboration, des descripteurs d'une microstructure multi-échelle, et les propriétés macroscopiques des matériaux classiques d'isolation (laines minérales, laine de bois...). Il faudrait aussi développer des méthodes physiques de diagnostic énergétique, assez pratiques pour estimer facilement les gains possibles et les gains réalisés (contrôle qualité), et fournir ainsi plus d'incitations à la qualité de la pose de l'isolation.

INSTRUMENTATION POUR LE CLIMAT

Étant donné le rôle prépondérant des gaz à effet de serre dans le réchauffement climatique, il est primordial de disposer de modèles et mesures précises de l'évolution spatio-temporelle de leur émission et de leur dynamique. D'un point de vue instrumental, cela suppose d'améliorer la sensibilité, la spécificité et la rapidité de la mesure, pour atteindre des résolutions de l'ordre de la milliseconde.



Zones de haute irrégularités dans l'expérience «Giant von Karman». Les zones régulières sont en vert, et les zones les plus irrégulières sont en rouge ou en bleu, selon leur signe. © Bérangère DUBRULLE