

# Chaire Modélisation prospective au service du développement durable

**Programme de recherches 2019-2023**

# 2019-2023 : un projet actualisé

La chaire MPDD est née d'un diagnostic partagé par le CIRED, le CMA et leurs partenaires industriels et institutionnels sur le fait que :

(i) relever les défis du développement durable exige de **travailler sur des 'états du monde' futurs** et de détecter les **points de bifurcations** qui permettent ou interdisent leurs réalisations. Ceci ne peut se faire par simple juxtaposition de dires d'experts venant de disciplines différentes, de conjectures intuitives et de jugements normatifs,

(ii) la modélisation prospective est un outil nécessaire pour produire des images diverses mais cohérentes du futur et pour **soutenir des débats scientifiquement informés** intégrant les apports des sciences de l'ingénieur, des sciences économiques et des autres sciences sociales,

(iii) des progrès sont nécessaires pour **représenter les interdépendances** entre le secteur énergétique et les autres secteurs clefs pour un développement durable (transport, construction, industrie des matériaux) de même que les liens entre les dossiers climat, sécurité énergétique, développement et migrations, mutation des systèmes techniques et des modes de consommation, enjeux de croissance et d'emploi en économie ouverte.

Depuis dix ans la Chaire a su mobiliser les compétences complémentaires de ses deux laboratoires pour devenir une marque reconnue internationalement, comme en témoignent les succès des colloques ou séminaires qu'elle a organisés, l'ensemble de ses publications, les interventions de ses directeurs dans des medias et des cercles d'expertise nationaux et internationaux. Elle fournit aujourd'hui quatre des cinq français retenus pour le sixième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat. Nous proposons donc de la reconduire en reformulant ainsi ses objectifs :

- Développer **quatre axes d'opérations de recherche 'problem oriented'** : (A) **dynamique de la demande** (B) **tensions sur les ressources** (C) **enclenchement et gestion des transitions** (D) **influences internationales**.

- Consolider une **plate-forme d'outils de modélisation prospective pérenne** : comprenant les modèles des deux équipes enrichis au fur et à mesure de leurs développements, les procédures de dialogue entre ces modèles et un tableau synoptique standardisé d'exposé et de contrôle des résultats afin de permettre un dialogue plus efficace avec les utilisateurs des scénarios produits.

- Renforcer le rôle de la **Chaire comme pôle d'animation** à travers des journées de restitution annuelle des travaux en cours (deux par an, dont une en partenariat avec les partenaires mécènes) et les **séminaires de la Chaire** sur les enjeux et politiques du développement durable. Les séminaires dits de la plateforme de modélisation sont dédiés à des discussions techniques pointues et sont restreints aux partenaires de la chaire et leurs invités (sous réserve d'approbation préalable en Comité de Suivi). Les autres sont largement ouverts aux scientifiques, responsables d'administrations publiques, partenaires sociaux et représentants des ONG. Ils comporteront **des points d'étape GIEC** pour permettre aux acteurs français de se saisir à temps de la réalité des débats internationaux. Des sessions spéciales de ces séminaires constitueront un lieu d'échanges **'prospective France' accompagnant les débats sur loi de transition énergétique**. Elles permettront une discussion des scénarios mobilisés par l'administration avec les contre-points fournis par les scénarios des équipes de la Chaire et ceux d'autres équipes productrices de scénarios de transition.

- Consolider le rôle de la Chaire dans la **formation de haut niveau** à la prospective par le biais du Mastère OSE<sup>1</sup> et du Master EEET<sup>2</sup> au travers du financement et de l'organisation de cours.

## II. DES OPERATIONS DE RECHERCHES EN QUATRE AXES

Les opérations de recherche que nous proposons se répartissent dans la continuation des axes investigués précédemment. Leur contenu a été actualisé pour reformuler des questions anciennes et intégrer de nouvelles questions en fonction du changement de contexte économique et des acquis des travaux précédents. Toutes concourent à fournir les **bases scientifiques de la délibération publique** autour des mutations impliquées par les enjeux de développement durable, et de **'business models'** soutenant une bifurcation vers une société bas carbone dans une économie ouverte.

Chacune des opérations proposées fait partie du 'portefeuille de compétences' des équipes de la Chaire et leur poids relatif pourra varier en fonction des percées effectuées, des difficultés rencontrées, des débats scientifiques internationaux et des demandes des partenaires. On signalera une attention renforcée à trois dimensions, transversales :

- La dimension spatiale pour éclairer les problèmes 'multi-échelle' que ce soit : (i) les contraintes à la transformation des systèmes énergétiques vers des modes de plus en plus diffus et renouvelables ; ou (ii) les interactions et les liens entre infrastructures de transport de l'énergie, les formes urbaines, l'aménagement des territoires et le déploiement de mobilités bas carbone porteuses de services énergétiques de plus en plus confinés ;

- L'influence des controverses, incertitudes et diverses formes de risque dans les attitudes et décisions des acteurs privés et publics, comme éléments de blocage de l'enclenchement des transitions et l'intégration des diverses formes de risque et d'incertitude dans le dessein des politiques publiques ;

- Les diverses formes d'inégalités (revenus, accès aux services énergétiques, à l'information et aux infrastructures de base, accès aux financements) que ce soit au sein d'un pays ou entre pays, comme élément déterminant de dynamiques en cours et des conditions d'une croissance inclusive.

### A. Dynamique de la demande

Les comportements, modes de vie et questions de précarité (A1 et A2) seront analysés à l'échelle des pays avec un zoom sur la France et sur l'Europe et une déclinaison régionale à l'échelle mondiale des pays développés aux pays en développement et à croissance rapide. Ces travaux considèreront différentes échelles géographiques en particulier pour intégrer l'importance du déploiement des infrastructures urbaines et de transport, en se concentrant sur des espaces d'analyse pertinents à l'échelle des d'agglomérations.

#### A.1. Comportements

Les travaux d'analyse des déterminants structurels de la demande en services énergétiques intégrant les comportements, modes de vie et attentes vis à vis de la croissance, en particulier les politiques d'accès à l'énergie dans les pays en développement, seront poursuivis. Ils seront combinés

---

<sup>1</sup> MINES Paristech

<sup>2</sup> AgroParisTech, Ecole Polytechnique, Centrale-Supelec, INSTN, ENSTA ParisTech, l'Université Paris Nanterre, l'IFP-School, l'Ecole des Ponts ParisTech, EHES, Mines ParisTech

avec l'étude de l'influence, dans les scénarios mondiaux, de mécanismes de mimétisme ou de différenciation des modes de consommation (électricité, résidentiel, mobilité, régimes alimentaires) dans les pays en développement (par exemple au Brésil et en Inde). L'impact des inégalités de revenu sera abordé.

## **A.2. Précarité et enjeux redistributifs**

L'objet ici est de cerner les déterminants des aspects redistributifs de la transition énergétique (en France et dans les grands pays émergents) en liaison avec la tendance en cours d'accroissement des inégalités. Dans ce cadre, une des priorités d'étude sera l'identification des ménages en situation de précarité énergétique et des déterminants de cette précarité (autre que le niveau de revenu) telles que la localisation géographique, la qualité des équipements, qui pourra être conduite dans divers contextes de développement. Déclinée à différents horizons temporels, l'analyse prospective associée permettra d'envisager les conséquences de combinaisons de politiques publiques sur la précarité, ceci en lien avec les travaux du point C2.

## **A.3. Politiques d'infrastructures**

Il s'agit ici de mieux documenter l'impact des choix d'infrastructures sur la demande de services (mobilité, résidentiels, usages énergétiques...) à travers leurs interactions avec les marchés de l'immobilier, la segmentation spatiale de l'habitat (gentrification, déplacements contraints, urbanisme) et la structuration géographique des filières de production à différentes échelles (grandes régions et aires urbaines). L'enjeu consiste à mieux représenter la formation des coûts de commutation, c'est-à-dire l'arbitrage entre coûts de déplacements et prix de l'immobilier et, plus largement, d'évaluer l'impact des formes d'occupation de l'espace sur la demande globale et en particulier sur l'efficacité relative des modes alternatifs de transport. Seront envisagés les compétitions possibles entre vecteurs énergétiques, les impacts potentiels de l'efficacité énergétique, et les options de flexibilité. Un chantier pourra être ouvert sur l'impact des politiques d'adaptation des formes urbaines face au changement climatique et à l'objectif de protection de la biodiversité.

## **A.4. Déterminants des demandes des secteurs industriels**

L'intégration de la dynamique de la demande du secteur industriel (en quantité et en structure), tenant compte des évolutions technologiques des secteurs intensifs en énergie sera prolongée grâce à une meilleure description des filières et des chaînes de valeur dans ces secteurs. Il s'agit d'aboutir à une représentation plus pertinente des dynamiques et inerties de redéploiement industriel à l'échelle internationale (type de spécialisation, pénalisation du transport, etc.), à l'horizon 2050. On poursuivra ici l'effort consacré dans un premier temps pour la France à la prise en compte des émissions incorporées dans les importations tout au long de la chaîne industrielle. Pour élaborer une vision exhaustive, on envisagera la compétition entre coût de l'énergie et émissions et on prendra en compte les externalités liées au transport international (marine bunker, transport aérien...) au moment où il devient un élément de la négociation climatique.

# **B. Tensions sur les ressources**

## **B.1. Compétition entre énergies fossiles**

L'impact économique de nouvelles technologies, de nouvelles ressources en énergie fossile et de contraintes sur les émissions sur les prix de l'énergie, les rentes pétrolières et gazières, l'orientation des

investissements et la géopolitique constitue un point central de la prospective d'une transition bas carbone. Au-delà de l'évaluation des conséquences directes sur les pays dont l'économie est basée sur la rente fossile qui feront l'objet d'études spécifiques, il s'agira d'évaluer les répercussions régionales, sur les marchés, au niveau humain notamment migratoire et globalement en termes de nouveaux équilibres géopolitiques.

Les leçons du dossier des pétroles et gaz de schiste pourront servir de canevas et rappellent que l'horizon et la dynamique de ce type d'occurrence sont en général bien plus courts que le temps classique de la prospective. Une attention sera portée sur les pétroles et gaz de schiste tout en distinguant les impacts de court, moyen et long terme. Un autre enjeu sera de traiter l'impact sur cette compétition des hypothèses faites sur les modalités de captation et capture du carbone (CCS).

## **B.2. Bio-énergies, biodiversité, séquestration de carbone et usages des sols**

Les perspectives de développement des bioénergies et de la séquestration biologique seront étudiées dans le cadre de trajectoires visant la neutralité carbone au-delà de 2050. Un enjeu est celui de la cohérence entre les scénarios énergétiques et les contraintes d'usage des sols à l'échelle mondiale et de grandes régions en intégrant les effets en retour des contraintes sur le prix des terres et de l'alimentation. Un autre est celui de l'articulation entre enjeux climatiques, sécurité alimentaire, stress hydrique et protection de la biodiversité. Enfin, un accent sera mis sur le lien entre développement des bioénergies et captage des GES à la source ainsi que sur l'évaluation des émissions incompressibles dans le secteur agricole et forestier.

## **B.3. Matériaux**

La hausse de la demande adressée aux industries de transformation de matériaux dans les premières décennies d'une stratégie bas carbone dans le contexte actuel de mutation de la géographie industrielle mondiale est largement sous-estimée dans la littérature. Elle peut modifier la vision que l'on a du profil temporel de la transition bas carbone et des stratégies industrielles soutenant cette transition. Une étude des mécanismes en jeu aura des impacts sur l'évaluation des potentiels réels de l'économie circulaire (à l'échelle France et Brésil), sur celle des émissions incorporées via les importations. Il sera pertinent d'explorer la compétition entre énergie supplémentaire dédiée au recyclage ou à l'extraction des ressources en tension. On prolongera les travaux sur le dossier des métaux rares dans une vision ACV.

## **C. Enclenchement et gestion des transitions**

On se propose d'explorer à la fois les solutions technologiques et les leviers financiers qui permettront de lancer et conduire le processus de décarbonation. L'enjeu théorique est une meilleure compréhension des mécanismes de transition qu'il faut articuler à plusieurs échelles de temps pour déclencher puis mener à bien une telle transition.

### **C.1. Conditions de déploiement des solutions bas carbone**

On poursuivra ici l'analyse des conditions de la pénétration des alternatives bas carbone.

Les trajectoires du système énergétique dans son ensemble seront explorées. Ces éléments d'analyse prospective seront adossés à une réflexion s'articulant sur une analogie avec la physique des transitions de phase afin d'évaluer l'état effectif de la transition des systèmes énergétiques et les conditions de leur bifurcation vers un système décarboné.

Ils seront prolongés par une analyse des conditions micro-économiques de ce déploiement technologique (principes tarifaires, design de marchés de capacité, mécanismes d'effacement, soutien à la R&D). On mettra l'accent sur les risques d'effets contradictoires en cas de maniement conjoint de ces instruments ainsi que des conditions à créer pour maximiser leur synergie. Un des enjeux est une modélisation multi-vecteurs intégrant les rétroactions des prix de l'offre sur le niveau de la demande par vecteur et la prise en compte des contraintes de financement qui pèsent sur chacun des acteurs impliqués (état, région, ville). Ceci alimentera une discussion critique sur les chronogrammes de transformation des systèmes (inertie technologique, gains d'apprentissage endogène et coûts des politiques de soutien). Un accent spécifique sera mis sur la caractérisation quantitative de l'incertitude existante sur l'évolution du coût des options bas carbone (éolien, photovoltaïque, technologies de flexibilité) et une meilleure compréhension des déterminants de l'évolution des coûts réels en Europe et dans les pays en développement.

La question du système électrique et de ses convergences avec les autres vecteurs sera abordée de manière exhaustive pour évaluer sa légitimité comme sujet central des débats sur les options futures. Ainsi, les résultats acquis sur les conditions de déploiement des énergies renouvelables intermittentes seront prolongés pour évaluer les scénarios de développement des infrastructures (transport et distribution) associées au système électrique selon le mode de production décentralisé vs. centralisé. On portera une attention particulière sur les points suivants : les scénarios volontaristes d'électrification par les usages (Véhicule Electrique, Pompe à Chaleur...), les synergies entre vecteurs gaz et électricité, une explicitation des impacts de la digitalisation (potentiel de décarbonation tenant compte de l'énergie consommée par le système digital, son effet de levier, son analyse du cycle de vie incluant la matérialité énergétique, et la recherche de l'équilibre énergétique coût/bénéfice imposé par le second principe de la thermodynamique...), la valorisation des infrastructures existantes. Les enjeux d'acceptabilité sociale soulevés par ces solutions seront intégrés.

## C.2. Financement de la transition

L'introduction du risque d'investissement dans les scénarios prospectifs permettra d'abord de tester des mécanismes de *de-risking* des investissements bas-carbone, dans un contexte incertain déterminé par de multiples variables (économiques, industrielles sociales et politiques). Ces mécanismes doivent permettre d'un côté l'augmentation des options économiquement viables pour un prix du carbone donné, de l'autre la mobilisation des acteurs financiers gestionnaires de l'épargne privée, les marchés obligataires et le système bancaire.

On pourra alors élargir la palette d'outils de politiques publiques disponibles pour le déclenchement de la transition (fiscalité carbone, marchés de permis, fiscalité de l'immobilier, tarifs de l'énergie, politiques d'infrastructures, normes techniques) en y intégrant des garanties publiques, la fixation conventionnelle d'une valeur du carbone évité et la création d'actifs bas carbone de long terme permettant de réorienter une épargne qui hésite aujourd'hui à s'investir productivement. On évaluera alors les effets macroéconomiques sur l'emploi, la distribution des revenus, les comptes sociaux, la compétitivité industrielle et le désendettement, de dispositifs intégrant l'effet levier financier et, dans le cadre européen, une politique d'assouplissement monétaire gagé sur la valeur carbone. Comme l'impact ultime dépend de la capacité d'embrayage des métiers concernés, cette évaluation intégrera (sur la base d'études sur l'efficacité énergétique des bâtiments et sur les investissements d'infrastructure dans les pays en développement) le portage par des *business models* innovants de filières industrielles et de diffusion des savoir-faire. Un des enjeux est de coupler la réflexion sur des

systemes de financement innovants avec celle d'une offre plus importante de projets 'bas carbone' y compris par exemple par des mecanismes d'agrégation des prêts de même montant.

Cette ligne de recherche intégrera la nécessité d'adapter au mieux les choix technologiques aux conditions locales ainsi que les dispositifs d'incitation et d'accompagnement des politiques aux contraintes macro-économiques et budgétaires des pays.

## D. Influences internationales

La Chaire intégrera dans son programme les conséquences de l'Accord de Paris (2015) qui substitue à un 'paradigme Kyoto' de partage d'un budget d'émissions une approche '*bottom-up*' où les pays déterminent leurs contributions nationales à l'effort commun (NDCs). Elle déploiera ses efforts en vue du 6e rapport du GIEC (AR6) : la production de scénarios mondiaux pour tester diverses hypothèses de gouvernance climat et des analyses par régions ou pays, en collaboration avec des partenaires locaux pour accompagner la réflexion sur les NDCs et sur les gains à attendre de divers schémas d'aide et coopération régionale et internationale.

Le rôle des scénarios mondiaux de respect d'objectifs de stabilisation des températures (+2°C, 1,5°C) et/ou de neutralité carbone est d'abord de mettre en évidence les implications de divers calendriers de baisses d'émission pour le mix énergétique mondial en intégrant différents niveaux de 'transgression transitoire' (*overshoot*) et/ou de recours aux diverses formes de CCS. Cela permettra l'évaluation des contributions des NDCs aux objectifs globaux et les trajectoires de prix fictifs du carbone associées avec leurs implications re-distributives entre pays et régions. Sur cette base on pourra tester l'impact de divers instruments économiques et financiers de la coopération internationale : transferts compensatoires entre pays, combinaisons de politiques nationales (taxes carbone, politiques d'infrastructure) et de politiques internationales (marchés du carbone, accords sectoriels, finance carbone) ; hypothèse de 'Clubs' pour des garanties publiques permettant la création d'actifs carbone ; rôle de paramètres macroéconomiques (politiques monétaires, taux de change) et des prix du pétrole ; évaluation de la conformité des dispositifs avec le principe de responsabilités communes mais différenciées ; contribution des différentes trajectoires de baisse des émissions aux Objectifs de Développement Durables adoptés par la communauté internationale (réduction de la pauvreté, accès aux services de base, conséquences migratoires...).

Les scénarios régionaux et internationaux concernent : l'échelle monde, l'Amérique Latine, l'Afrique, le Moyen-Orient, l'Europe, l'Afrique du Sud, l'Arabie Saoudite, l'Argentine, le Brésil, la Chine, l'Inde; la France et plus localement l'île de la Réunion, et les régions PACA et Normandie.

## III. PLATE-FORME D'OUTILS DE MODELISATION PROSPECTIVE

Le cœur de la Chaire MPDD reste la construction d'outils numériques au sein des deux équipes (IMACLIM, MARKAL-Times, NEDUM etc.) capables de produire des images cohérentes du futur et des sentiers de transition vers ces images. Cela passe par l'articulation de modèles d'optimisation des systèmes techniques et de modèles d'équilibre général pour représenter dans un même cadre des modèles d'activités humaines généralement développés séparément (énergie, transport, occupation des sols) et des travaux portant sur des échelles géographiques différentes. Ce pari n'est pas celui de la recherche d'un modèle complet qui, comme une 'carte à l'échelle 1' serait illusoire mais celui d'une recherche de cohérence aux niveaux d'analyse pertinents pour les sujets traités à la condition qu'un traitement multi-échelle rigoureux soit opéré.

Sur la base de l'expérience acquise, on prévoit a) la mise en place de protocoles systématisés de dialogue entre les modèles des deux équipes permettant des exercices harmonisés b) la poursuite de

la construction de matrices ‘hybrides’ assurant la compatibilité entre matrices de comptabilité sociale, bilans énergétiques, indicateurs d’activité c) le développement d’interfaces captant les interactions entre l’énergie et trois autres domaines de l’activité humaine critiques pour les enjeux de développement durable, l’eau (risque pour les systèmes de production), les usages des sols et les dynamiques urbaines.

Les innovations méthodologiques attendues porteront sur l’intégration a) de la dimension financière dans la représentation des comportements de décision en situation de risque sous contraintes de valeur actionnariale et d’équilibre des comptes publics b) les aspects spatiaux associés aux réseaux d’infrastructures sur lesquels se jouent des éléments d’arbitrage cruciaux pour la détermination des potentiels réels d’options bas-carbone et sur c) la construction d’un tableau synoptique d’exposé et de contrôle des résultats pour augmenter le niveau de transparence des travaux et la qualité de leur interprétation.

#### **IV. LIEUX D’ECHANGES SUR LES ENJEUX DE DEVELOPPEMENT DURABLE**

La Chaire a pour objectif de faciliter les échanges autour d’éclairages que la modélisation prospective peut apporter. Elle poursuivra cet objectif en organisant deux Journées de restitution annuelle des travaux en cours dont une en partenariat avec les partenaires mécènes, et des Séminaires ouverts à la communauté scientifique, aux acteurs industriels, administrations publiques, parlementaires, responsables syndicaux et associatifs sur les enjeux de développement durable (déplacement des contraintes techniques, interactions sectorielles, politiques macroéconomiques). Certains de ces séminaires constitueront des points d’étapes GIEC grâce à la présence de quatre membres de la Chaire dans le groupe III du sixième rapport. Ces séminaires abriteront des forums de ‘prospective France’ accompagnant les débats sur l’application de la loi de transition énergétique et permettant une discussion des scénarios mobilisés par l’administration avec des contre-points fournis par les scénarios des équipes de la Chaire ou d’autres équipes. Certains de ces forums seront des ateliers d’échanges entre les équipes engagées dans la modélisation prospective dans différents secteurs (énergie, transport, agriculture) pour clarifier les conditions d’un bon usage des modèles dans leur état actuel de développement et discuter les obstacles méthodologiques à lever.