



La Socio-économie de l'Énergie

Dans le cadre d'un projet exploratoire (PRICAPE) du programme interdisciplinaire *énergie* du CNRS, le CIRED et le LEPII ont fait le bilan de l'état de l'art en matière de modélisation et de prospective socio-économique pour évaluer les capacités à éclairer les conditions d'une transition énergétique à engager à court-moyen terme pour respecter les contraintes carbone du long terme. Cette évaluation des capacités en matière de prospective tient aussi compte des autres dimensions du développement durable que sont la sécurité énergétique, la réduction de la pauvreté et la formation d'un mode de développement urbain et rural compatible avec les contraintes environnementales à l'échelle globale et locale.

L'enjeu central est (i) d'éclairer les conditions de développement, de diffusion et de viabilité des nouvelles technologies énergétiques, (ii) de se donner les moyens de mieux cerner et anticiper les ruptures et transitions socio-économiques qui structureront les étapes institutionnelles vers un système énergétique propre et durable (iii) de cibler l'orientation des efforts de recherche et de recherche et développement, et (iv) de détecter les travaux de recherche à mener en matière socio-économique sur les conditions institutionnelles qui doivent accompagner la sélection et le déploiement des alternatives technologiques.

Sur la base des résultats intermédiaires de ce travail qui doit s'achever en avril 2010, les deux équipes ont dégagé un diagnostic dont ils pensent pouvoir tirer un ensemble de **recommandations stratégiques pour le CNRS**. Cette note ne prétend pas couvrir la totalité de ces recommandations (qui portent sur des éléments plus structurants comme les questions de politique d'embauche et de politique de recherche), elle se centre sur la proposition centrale d'un changement de paradigme énergétique imposé par la montée des contraintes de ressources et d'environnement global.

1. Une mutation technologique à réussir sous contraintes multiples

L'énergie est au cœur des enjeux du développement durable : diminution des ressources pétrolières, impératif de croissance des pays émergents, sécurité d'approvisionnement dans un monde instable politiquement, prix dépendants des aléas géopolitiques et des mouvements spéculatifs, fourniture des besoins de base de populations marginalisées et fragiles, risques du changement climatique et conséquences d'une contrainte globale d'émission sur l'économie.

De là émerge un **agenda de recherche** qui doit conduire à explorer les moyens de faire face aux tensions immédiates, tout en organisant la bifurcation de nos systèmes énergétique vers :

- ▀ des modes de consommation fondés sur une utilisation plus sobre, plus efficace et plus intelligente des énergies, y-compris à travers de nouveaux systèmes et réseaux énergétiques (les réseaux intelligents ou smartgrids) ;
- ▀ des infrastructures et réseaux d'offre d'énergie fondés sur une utilisation plus systématique des énergies-flux renouvelables (supergrids) et une exploitation plus limitée et moins agressive pour l'environnement des énergies-stocks.

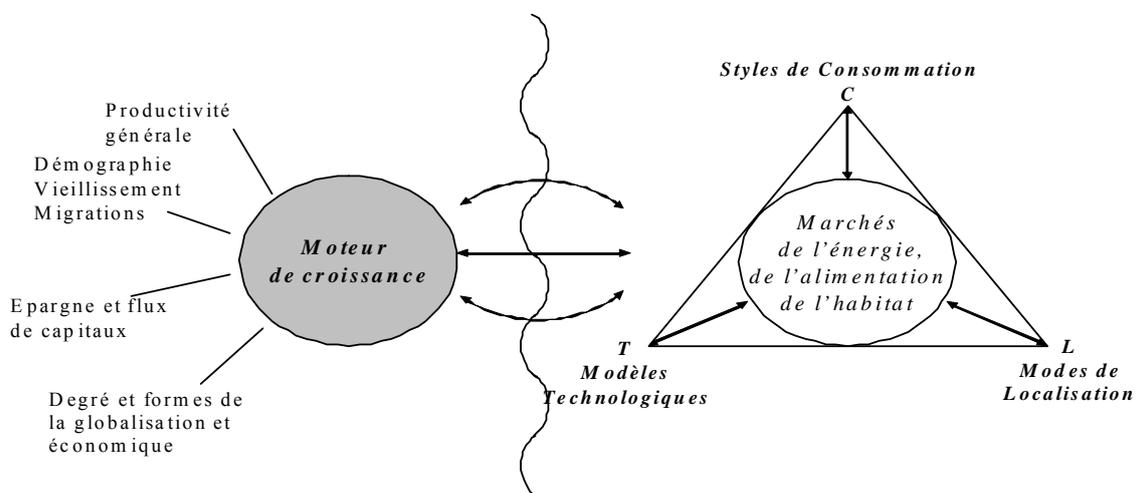
Cet agenda doit tenir compte du fait que cette bifurcation doit s'opérer dans un contexte spécifique : opposition dans certains cas à des filières technologiques majeures (nucléaire, bioénergie, capture et stockage du carbone), réflexes Nimby (lignes hautes tensions, éoliennes), hausse du risque d'investissement en raison de l'incertitude sur les nouvelles formes de régulation des systèmes énergétiques, controverses sur les objectifs ultimes de limitation des concentrations de GES. Or ce contexte pèse sur la recherche elle-même qui, alors qu'elle vise le temps long, est confrontée aux attentes de la société et à des oscillations entre phases de dénégation des problèmes et phases d'émergence d'un sentiment d'urgence qui pousse à décider 'en méconnaissance de causes' sur fonds de pression médiatique.

2. Un besoin de prospective intégrée : systèmes naturels – technique – économie – institutions

Dans ce domaine, comme d'ailleurs sur toutes les autres frontières de l'innovation, on ne peut plus s'en tenir aujourd'hui au schéma classique qui va de la recherche fondamentale et de l'invention aux procédés industriels, en passant par la R&D. La viabilité des grandes filières techniques candidates à répondre aux enjeux du XXI^{ème} siècle dépendra en effet:

- ▀ de la nature des systèmes énergétiques dans lesquelles elles s'inscriront dans l'emboîtement **des échelles locales, nationales et globales**, des degrés d'autonomie et d'interdépendance entre ces échelles, et des marges de manœuvre laissées par l'inertie des systèmes actuels,
- ▀ des **systèmes techniques** dans lesquels les technologies énergétiques sont appelées à s'insérer : cadre bâti (type d'habitat, type d'architecture) ; usages des sols et infrastructures de transports ; agriculture (pour l'offre de bioénergie) ; systèmes industriels (innovations de produits, de procédés et de « système » pour la dématérialisation de l'économie),
- ▀ de **paramètres économiques** centraux comme les capitaux disponibles pour financer les investissements, le niveau de demande finale des ménages et les systèmes de prix relatifs des biens, des ressources et des facteurs de production
- ▀ des **comportements individuels et collectifs** en matière de perception et acceptation des risques technologiques mais aussi en matière de styles de consommation et de nouveaux usages ou de formes urbaines et d'aménagement du territoire.

Figure 2 : Fondamentaux de la croissance et structures des systèmes économiques



3. Un nouveau chantier scientifique : les modèles « hybrides » au service du dialogue interdisciplinaire

Le paradigme de modélisation prospective déclenché par le rapport du Club de Rome et le premier choc pétrolier est aujourd'hui parvenu à un point de basculement. Il restait marqué par une coexistence entre des prospectives technologiques de filières, des modélisations sectorielles, comportant une modélisation explicite des systèmes techniques mais raisonnant à système économique constant, et des modèles macroéconomiques intégrant les interdépendances économiques, mais au prix d'une représentation trop frustrée des systèmes techniques.

Ce dispositif intellectuel arrive à ses limites dès lors que les mutations à envisager sont telles qu'on ne peut plus supposer a priori que les basculements techniques n'auront pas d'impact sur la 'machine économique' et que les régulations économiques n'auront aucune conséquence sur les trajectoires technologiques. C'est ce diagnostic qui pousse aujourd'hui des équipes-leader à l'échelle internationale à s'engager dans la voie de modèles « hybrides » (Energy Journal, Special Issue, Oct. 2006) dont la vocation est de garantir un dialogue interdisciplinaire rigoureux entre :

- ▀ **économistes et ingénieurs**, pour s'assurer que la prospective technologique travaille sur des systèmes techniques sous-tendus par des économies cohérentes et plausibles et que la prospective économique puisse expliciter le substrat matériel des flux économiques et leur inscription géographique ;
- ▀ **modélisation prospective et sciences humaines et sociales**, pour intégrer une description des comportements individuels et collectifs qui soit moins stylisée et plus réaliste que l'optimisation en anticipation parfaite et qui tienne compte du jeu des institutions ;
- ▀ **les communautés scientifiques mobilisées sur les secteurs de l'énergie, de l'habitat, des transports, de l'agriculture et des grands secteurs industriels**, qui ont jusqu'ici travaillé de façon parallèle et avec peu d'interaction

Des avancées récentes, comme les couplages entre les modèles IMACLIM (CIRED) et POLES (LEPII) (ou les modèles SGM, EPPA aux USA, ou encore le modèle REMIND au PIK) montrent que les principes de tels modèles hybrides sont suffisamment maîtrisés pour que l'on sache où se situent les percées à opérer, en particulier en matière de contraintes calculatoires: représentation des déséquilibres dus aux frictions entre systèmes de temps caractéristiques différents, maîtrise de la propagation des incertitudes, intégration d'échelles.

De même, l'expérience conduite pendant trois ans entre le LEPII, le CIRED et ENERDATA dans le cadre du projet « scénarios sous contraintes carbone » mené dans le cadre de la FONDDR1 avec l'appui du consortium *Entreprises pour l'environnement* montre l'intérêt de telles structures pour un dialogue entre scientifiques et experts du monde industriel.

Enfin, des développements en cours (projet ANR Villes durables du LEPII, projet Européen Globis au CIRED) conduisent à explorer – dans des systèmes de représentations homogènes à ceux des modèles globaux et en s'appuyant sur des approches économiques robustes – les échelles plus locales des politiques urbaines et des plans climat territoriaux.

Figure 3 : Pour des modèles économiques plus complets

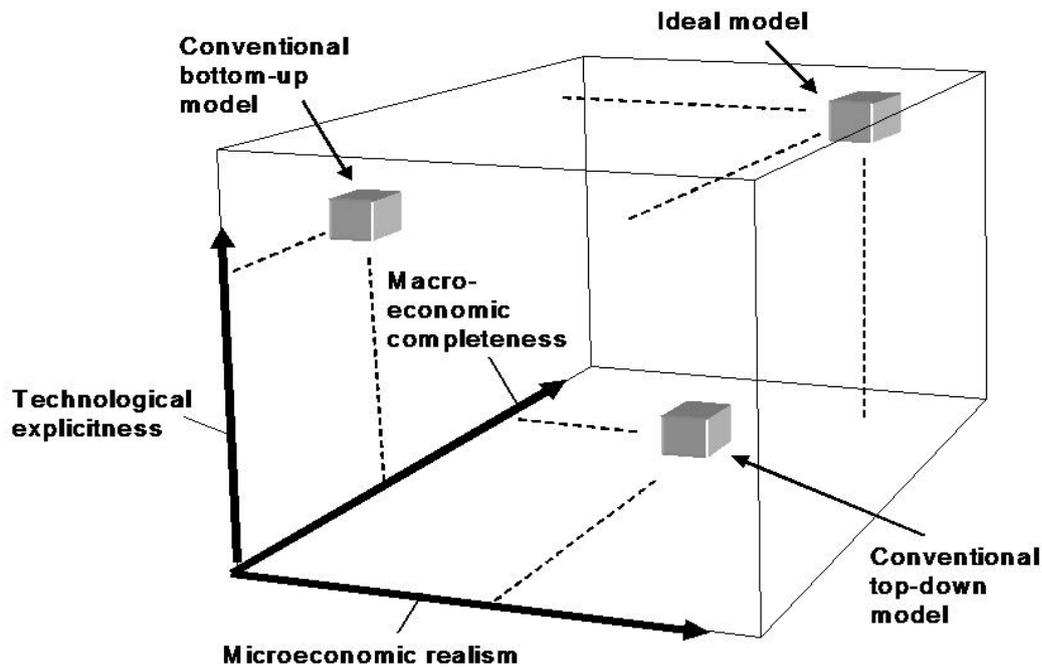
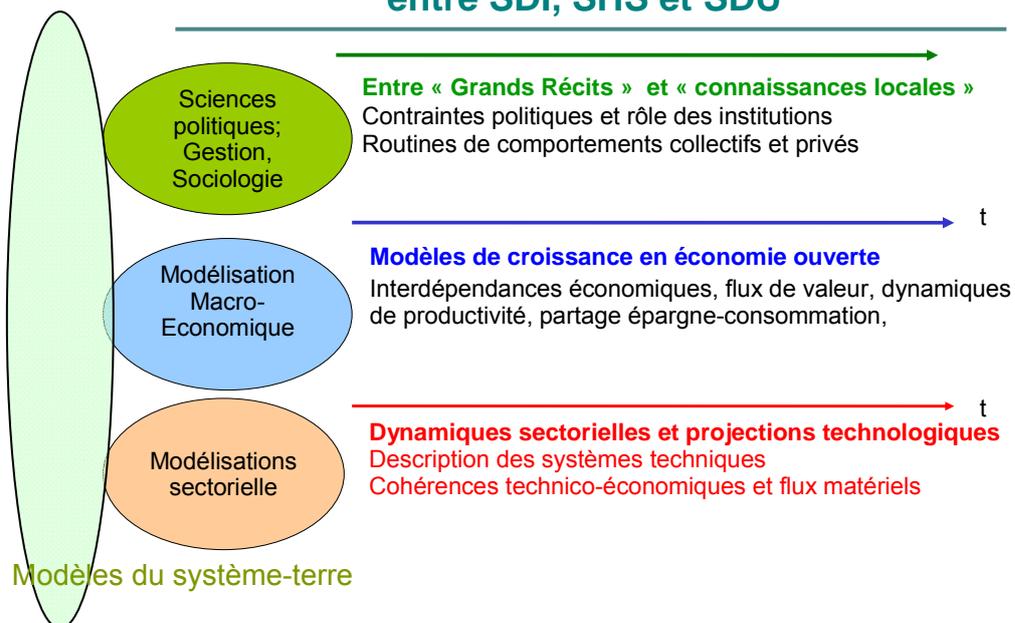


Figure 4 : les voies de la modélisation hybride

La modélisation hybride: un outil de dialogue entre SDI, SHS et SDU



4. Vers une plate-forme de prospective énergétique intégrée

Il est nécessaire que la France se dote d'une plate-forme de prospective intégrée « énergie, technologie, économie et environnement » fondé sur des outils complémentaires et en dialogue, de façon à :

- ▀ maîtriser les grands choix technologiques du futur ;
- ▀ ne pas rater l'émergence d'un courant de travaux majeurs sur les questions d'énergie et de développement durable ;
- ▀ assurer sa présence dans les grands lieux d'expertise (GIEC, BM, AIE, EU) par la formation de cadres internationaux formés par la recherche et en nombre suffisant.

La plate-forme qui en serait le support constituerait un **investissement lourd et de long terme en capital humain** via la mobilisation de compétences de haut niveau, de bases de données cohérentes constituant un bien public pour toutes les disciplines et de « moyens de calcul » et mathématiques appliqués. Dans le contexte français, le CNRS doit être l'opérateur central de cette plate-forme :

- ▀ de part sa position de **neutralité du point de vue des filières en compétition** et de sa capacité de programmation scientifique indépendamment des « modes » et des « urgences » ;
- ▀ de part sa capacité à dégager sur la durée des communautés interdisciplinaires dotées d'une culture prospective appartenant aux départements EDD, STI, SDU et SHS et aux instituts INSHS, INEE, INSU et INSIS.

Il peut devenir cet opérateur en s'appuyant de manière non limitative, sur l'existence en son sein de deux équipes, le CIRED (Paris) et le LEPII (Grenoble), qui sont :

- ▀ présentes, de façon complémentaire, dans les grands lieux d'expertise internationale depuis les années quatre-vingt (AIE, Banque Mondiale, GIEC, Communautés Européennes, administrations françaises et européennes) ;
- ▀ engagées depuis longtemps dans un effort commun de modélisation hybride et dans un dialogue avec les sciences de l'univers et les sciences de l'ingénieur (en amont par les efforts de modélisation intégrée (CIRED), en aval par ceux portant sur les bases de données technologiques (LEPII), en interface par l'accent mis sur la modélisation précise et cohérente du progrès technologique induit par les contraintes environnementales;
- ▀ les chevilles ouvrières d'opérations de long terme comme la Chaire Paristech⁵⁸ (Mines-Ponts de modélisation prospective pour le CIRED) appuyés par un consortium d'entreprises (EDF, TOTAL, AREVA, ADEME, SCHNEIDER), le programme de la FONDRI sur les enjeux industriels de la décarbonisation de l'économie ; ou encore le projet SEED – Sociologie et Economie pour une Energie Durable – du futur pôle de recherche et d'enseignement Energie de Grenoble, associé au pôle de compétitivité énergies renouvelables et distribuées TENERDIS, également basé à Grenoble ;
- ▀ insérées dans un réseau de collaboration avec des équipes partageant des préoccupations similaires et apportant des compétences complémentaires sur le secteur des transports (LVMT de l'ENPC et de l'INRETS, LET (CNRS-ENTPE), du bâtiment et de l'urbanisme (réseau EDUD, économie du développement urbain durable, avec le CSTB, le CERNA et l'IDDRI), ou, pour la prospective agricole mondiale, le programme Agrimonde avec le CIRAD.

⁵⁸ Chaire construite conjointement entre le CIRED et le CMA (dirigé par Nadia Maïzi) et cofinancée par Total, l'Ademe, Renault, EDF et Schneider Electric.

5. Sciences, technologies, industries, économie : questions interdisciplinaires stratégiques

Dans le contexte de la création de l'ANCRE, le programme Energie du CNRS 2009 peut porter un certain nombre de domaines stratégiques dans lesquels les coopérations entre sciences de l'univers, sciences de l'ingénieur et sciences de l'homme et de la société devraient se développer en priorité. Les travaux de prospective déjà effectués, les coopérations interdisciplinaires déjà opérantes permettent déjà d'en identifier un certain nombre :

1. Une **croissance économique sous contrainte environnementale** devra assurer un découplage croissant entre activité économique d'une part, et consommation d'énergie et de matières premières, d'autre part ; cela mobilise un ensemble de recherches qui vont des techniques et méthodes de l'éco-conception (Analyses du Cycle de Vie, Material Flow Analysis ...) à l'étude des conditions économiques et sociologiques d'une mutation de la gestion industrielle vers l'économie de la fonctionnalité et de l'évolution des comportements d'usage de l'énergie et des styles de consommation.
2. Les recherches dans le domaine des technologies énergétiques devront prendre en compte la nécessité d'**intégrer une part croissante d'énergies-flux, intermittentes et aléatoires**, et donc accorder une importance marquée aux questions de stockage, de transport longue distance et d'algorithmes de gestion des réseaux énergétiques ; l'intégration des smartgrids, des supergrids et de capacités de stockage de différents types est la condition d'une contribution significative des énergies renouvelables au bilan énergétique.
3. **Pour les transports**, l'articulation entre nouveaux équipements de transport individuel (Véhicules Zéro-Emission, petits véhicules urbains), nouvelles orientations des aménagements urbains et des usages des sols (gestion de l'étalement), promotion de nouveaux comportements (covoiturage, véhicules en temps partagé) et amélioration des transports collectifs est la condition d'une inflexion durable des consommations et des émissions associées ; ce domaine constitue un exemple-type de la nécessité d'interfaces pluridisciplinaires de type « technologies, sociologie des usages, urbanisme et aménagement, nouveaux modèles économiques ... »
4. **Le bâtiment** constitue l'un des domaines-clé pour la réduction massive et durable des émissions de GES ; il est d'autant plus stratégique que les constantes de temps sur les équipements et les temps de renouvellement des parcs y-sont élevés ; les problématiques de la diffusion du Bâtiment Basse Consommation et du Bâtiment à Energie Positive sont explicitement traitées dans le Grenelle de l'environnement ; le respect des objectifs dans ces domaines suppose la mise en œuvre de solutions multiples au niveau de la conception, de l'instrumentation, des comportements de l'utilisateur (domestique ou tertiaire) ; le succès dans cette intégration des solutions suppose une intégration satisfaisante des connaissances dans ces différents domaines.
5. **L'agriculture** est, après celui de l'énergie, le deuxième grand secteur émetteur de GES ; le succès des politiques Facteur 4 en 2050 (ou bientôt 5, pour 80% de réduction des émissions) suppose que des progrès considérables soient accomplis, à travers de nouvelles politiques de gestion des sols (et des stocks de carbone associés), de nouvelles pratiques agricoles qui seront probablement impactées par des signaux économiques sur le coût du carbone mais, mais aussi par la nécessité de changements dans les comportements des consommateurs (part des protéines animales, achat local ou global, biologique ou OGM ...)
6. La définition et l'évaluation des **systèmes de régulation économique et des politiques publiques** à même de porter ses évolutions en tenant compte à la fois des spécificités de chaque secteur (le secteur électrique n'est pas porté par les mêmes logiques micro-économiques que le secteur agricole) et des cohérences macro-économiques qui les encadrent : fiscalité, politiques tarifaires, financement dans un contexte de dette publique croissante, questions de compétitivité internationale.
7. C'est pourquoi la **dimension internationale de l'ensemble des bifurcations** évoquées ci-dessus ne peut être ignorée, tant du point de vue des questions évidentes de la coordination et de la gouvernance du régime international que de celui des enjeux industriels du développement international des technologies, avec les effets d'apprentissage associés ou les questions de droits de propriété intellectuelle et/ou de financement qui en découlent.
8. ...

* * *

Compte-tenu de l'urgence des bifurcations à conduire pour l'inscription des systèmes sociotechniques sur une trajectoire de type Facteur 4, la constitution d'une plate-forme de Prospective pour l'Energie doit être très rapidement engagée. Cela afin que la mobilisation des équipes concernées puisse être pérennisée et afin également que la démarche d'ouverture vers d'autres partenaires (recherche et EPICs dans l'ANCRE, partenaires industriels) puisse être entreprise sans attendre. Cette plate-forme pourra alors jouer un rôle stratégique dans la perspective tant de la mise en œuvre des politiques publiques en France et en Europe (loi du Grenelle de l'environnement, « trois fois vingt » européen) que de la conduite des négociations internationale (négociations post-Copenhague).