

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

LES TECHNOLOGIES ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

DES SOLUTIONS POUR L'ATTÉNUATION ET L'ADAPTATION

ADDENDUM AU RAPPORT

Liste des thèmes :

1-Attacher un prix à la tonne de CO_2-équivalent
2-Les nouvelles technologies et pratiques en agriculture
3-La ville numérique
4-La logistique verte
5-L'automobile du futur
6-L'intégration des énergies intermittentes dans le système électrique français
7-La filière bois-énergie : le biogaz
8-L'accompagnement technologique des PED

1-ATTACHER UN PRIX À LA TONNE DE CO_2-ÉQUIVALENT

L'Académie des technologies dans son avis [1] et son rapport [2] consacrés aux « technologies et changement climatique » a recommandé que soit déterminé un prix à la tonne de CO_2-équivalent (dit « prix du carbone »), et suggéré que ce prix soit utilisé pour optimiser les investissements des acteurs publics ou privés sur des bases économiques compréhensibles par tous, fixer le niveau d'une éventuelle taxe carbone, ou déterminer rationnellement le niveau des aides publiques à la transition énergétique au niveau national. Le prix du carbone, indicateur simple et unique, peut être un moyen de communication et d'échange avec les parties prenantes de la politique énergétique, dont le grand public.

Plusieurs définitions d'un prix de référence du carbone (défini comme le prix à la tonne de CO_2-équivalent) sont possibles :

i. **Le prix socio-économique** du carbone représente le coût des conséquences dommageables d'une émission additionnelle d'une tonne de CO_2 ; c'est le prix de l'externalité carbone.
ii. **Le prix d'abattement** suppose la définition préalable d'une trajectoire de réduction d'émissions ; c'est la somme à dépenser pour éviter l'émission de la tonne marginale qui conduirait à dépasser la trajectoire. Ce serait le prix du carbone sur un marché d'échanges de permis d'émission créé selon le principe « *Cap and Trade* » (système de plafonnement et de quotas – *cf.* Rapport [2]) et fonctionnant parfaitement.
iii. **Le prix effectif** du carbone est celui déduit de l'observation des décisions publiques ; elles sont supposées rationnelles, et s'en déduit la valeur implicite que ces décisions ont attribuée à une réduction des émissions.

L'établissement du prix socio-économique et du prix d'abattement impliquent de comparer des coûts ou recettes à différentes périodes dans le temps, qui peuvent être fort éloignées. Il y a donc une nécessité d'actualisation. La théorie économique montre qu'un taux d'actualisation assez bas (2 à 3%, voire moins) doit être retenu si l'on veut s'approcher de l'égalité intergénérationnelle (traiter également les générations actuelles et futures) et tenir compte des incertitudes sur les perspectives de croissance. La dernière révision du taux d'actualisation à considérer pour les investissements publics a été faite en 2013 par le Commissariat général à la stratégie et à la prospective (taux sans risque de 2% et prime de risque moyenne de 2.5%). Elle mériterait d'être revisitée pour tenir compte des faibles perspectives de croissance économique. Il reste que le choix du taux d'actualisation restera une décision politique, sous tendue par des considérations éthiques ; il devrait faire l'objet d'un débat public.

Les évaluations du prix socio-économique nécessitent des hypothèses sur des données en réalité très incertaines telles que l'impact du réchauffement climatique sur la croissance, les migrations, les catastrophes climatiques (typhons, etc.) et les destructions associées. De très nombreuses études académiques ont été faites dans ce domaine, qui aboutissent à une large fourchette de prix socio-économiques allant de moins d'une dizaine, à une trentaine d'euros par tonne de CO_2-équivalent (tCO_2-éq). Quelques gouvernements étrangers, notamment ceux des Etats-Unis et du Royaume-Uni, se sont cependant donnés des prix socio-économiques du carbone, utilisés pour les optimisations d'investissements publics. La France devrait se doter d'un tel indicateur ; les décisions publiques d'investissement devraient systématiquement prendre en compte ce prix socio-économique. A la suite

d'une initiative de la Banque mondiale et du Gouvernement français, MM. Stern et Stiglitz sont chargés d'établir des trajectoires, ou des corridors de prix. Le résultat de leurs travaux est attendu dans la 2ème quinzaine d'avril 2017 et devra être pris en considération.

La France s'est donné une trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est donc logique qu'à l'instar de la plupart des grands pays développés, elle détermine le coût moyen d'abattement correspondant à cette trajectoire.

La détermination du prix moyen et du prix marginal d'abattement nécessite d'établir les coûts d'abattement des différentes options technologiques envisageables, et de les classer par ordre de mérite comme l'a fait la Suède en suivant la méthodologie introduite par McKinsey. Le Commissariat général à la stratégie et à la prospective dont les études sur le prix d'abattement ne tiennent qu'indirectement compte des technologies disponibles [3], et les économistes universitaires de l'énergie doivent y consacrer plus de moyens. La tâche est urgente d'autant que les coûts, fondés sur le CO_2 évité, des différentes politiques publiques sont extrêmement disparates.

La référence à un prix d'abattement de référence devrait permettre de mieux optimiser les mécanismes d'aides et de subventions français, en donnant une meilleure place à certaines bioénergies, peu soutenues mais dont le coût marginal d'abattement est plus faible que celui du photovoltaïque et de l'éolien. Et pourtant le fort soutien à ces dernières énergies n'a pas permis de développer en France des filières industrielles dans ces secteurs.

On doit s'attendre à ce que le prix moyen d'abattement ou prix de référence de la tonne de CO_2-équivalent **se situe autour, voire au-delà de 50 €/tCO_2-éq.** Ce prix devrait être périodiquement révisé à la hausse, le coût d'abattement étant d'autant plus élevé qu'un effort important a déjà été fait. Ce prix est supérieur aux prix d'abattement considérés par les pays étrangers pour deux raisons :

1. La France vise à réduire ses émissions du même pourcentage que ses voisins, alors que son niveau de départ est sensiblement plus faible ; or le coût d'abattement est d'autant plus élevé que le niveau d'émission de départ est faible.
2. De nombreux pays, à l'instigation du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), font l'hypothèse que la séquestration du CO_2 (*Carbon Capture and Storage* - CCS) sera aisément disponible et très largement mise en œuvre ; le prix d'abattement considéré par ces pays est en conséquence réduit. Cependant, les incertitudes technologiques sont encore nombreuses pour garantir des stockages de très longue durée ; en outre, la géologie de certaines parties du monde ne permettra pas d'y séquestrer le carbone. C'est, par exemple, le cas de la Chine et l'Inde.

Le prix de 50 €/tCO_2-éq est également supérieur aux prix effectifs que l'on peut déduire des taxes mises en œuvre à l'étranger, ou de l'observation du fonctionnement de marchés de permis d'émission existants. L'impact sur la compétitivité de l'économie française sera donc supérieur à l'impact accepté par les principaux pays développés. **Le prix de référence du CO_2 en France (au moins 50 €/tCO_2-éq) ainsi que le taux d'actualisation (un peu plus de 2%), devraient être soumis à un large débat public comme cela a été le cas au Royaume-Uni.** Le maintien de l'ambition française en matière de réduction d'émissions de CO_2 est en effet un choix politique majeur, qui nécessite une grande continuité dans sa mise en œuvre et donc un consensus national.

Si une taxe, (ou un prix plancher du carbone) était définie au niveau de 50 €/tCO_2-éq, elle représenterait près de vingt milliards d'euros, soit à peu près le produit de la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE). Une telle somme ne saurait être prélevée sans se substituer à des taxes existantes.

Les choix publics structurants (choix du mix énergétique ; politiques orientant les modes de chauffage ; développement des infrastructures de transport -route, rail, voie d'eau-, etc.) devraient donner lieu à une étude de sensibilité avec un prix plus faible (30 €/tCO_2-éq) ; l'étude de sensibilité permettrait de s'assurer de la robustesse des choix.

Un prix de référence de la tonne de CO_2 ne suffira pas à rendre « rationnelles » les décisions des agents économiques. Certaines consommations ont en effet une élasticité très faible au regard du prix de l'énergie et à sa taxation ; c'est en particulier le cas du transport routier. D'autres décisions économiquement pertinentes ne sont pas prises faute de capacité à investir : les propriétaires privés ne peuvent aisément financer des travaux substantiels d'isolations de logement. **La seule détermination d'un prix de référence, ou même d'une taxe ne suffira donc pas à assurer le respect de la trajectoire de réduction d'émissions visée. Il conviendra d'accompagner la fixation d'un prix de référence par d'autres incitations sous forme de réglementations ou de subventions (tarifs garantis, etc.). L'établissement des prix d'abattement par technologie devrait permettre de mieux optimiser ces incitations.**

Ce sera donc toujours une combinaison de mécanismes qui permettront d'assurer la transition énergétique au rythme souhaité, en veillant à définir des politiques globales et proches de l'optimum. Le prix de référence du carbone permettra de vérifier la cohérence de ces politiques.

Dans tous les cas, il reste nécessaire de faire fonctionner le mécanisme du marché des permis d'émissions (*Emissions Trading Scheme* - ETS) qui permet, mieux qu'un prix de référence unique et déterminé par l'analyse économique, d'optimiser les politiques de réduction d'émissions.

2-LES NOUVELLES TECHNOLOGIES et PRATIQUES EN AGRICULTURE

L'agriculture émettrice de gaz à effet de serre

L'agriculture représente une part importante, de l'ordre de 25%, de la production des activités humaines de gaz à effet de serre. Les causes principales de ces émissions, hors élevage, sont la mise en culture de nouvelles terres (prairies ou forêts), l'énergie nécessaire à la production des engrais azotés, la transformation des produits azotés pivots de la fertilisation des cultures en protoxyde d'azote, la consommation énergétique des engins agricoles et la production de méthane par les rizières.

Une maîtrise de ces émissions passe par la mise en œuvre de bonnes pratiques telles que la conservation de carbone dans les sols par le maintien ou l'augmentation de leur teneur en matière organique, l'accroissement de la productivité par unité de surface cultivée évitant la mise en culture de nouvelles terres voire une augmentation des surfaces en forêt et en prairie[1], la culture de légumineuses dans la rotation pour diminuer le besoin de fertilisation azotée, le bon réglage des engins agricoles avec le diagnostic moteur par le passage des tracteurs sur un banc d'essai moteur (BEM), diagnostic qui permet d'optimiser le réglage du moteur, et l'application des règles de l'éco-conduite, le changement de conduite des rizières avec assèchement temporaire.

Que peuvent apporter en outre les nouvelles technologies pour limiter les émissions ?

L'amélioration des plantes pour l'adaptation et l'atténuation

L'amélioration des plantes a déjà permis des progrès substantiels en permettant une intensification de la production par surface cultivée et donc la sauvegarde d'autres surfaces naturelles. Au cours des 15 dernières années le progrès génétique a été en Europe de 1,24 % par an permettant ainsi d'éviter l'émission directe de 3,4 milliard de tonnes de CO_2 [4]. Les variétés modernes ont une meilleure valorisation de l'azote, ce qui permet, pour une production égale, de diminuer la fertilisation azotée donc un gain énergétique.

De nombreuses pistes de recherche sont en cours d'exploration en matière génétique [5] : meilleure capacité de photosynthèse, transfert de la capacité à fixer de l'azote atmosphérique selon différentes stratégies, allant de l'amélioration des bactéries du sol pour une association symbiotique ou non symbiotique, jusqu'à l'insertion dans le génome des céréales des gènes codant l'ensemble des enzymes et protéines nécessaires à cette fixation de l'azote atmosphérique. La transformation de plantes ayant un métabolisme du type C3 (blé, riz, betterave) en plantes du type C4 permettrait une meilleure valorisation de l'azote et une plus forte production de biomasse donc de fixation de CO_2 grâce à l'amélioration de la photosynthèse. Des essais prometteurs ont lieu actuellement sur le riz.

Concernant les émissions de méthane par les rizières, en plus des techniques agronomiques nouvelles très efficaces pour diminuer la production globale de méthane, une nouvelle approche est en cours de développement : un type de riz a été transformé par transgénèse par addition d'ADN d'orge. Ce riz possède une plus forte production de matière sèche et sa culture émet sensiblement moins d'azote

[1] L'augmentation des surfaces en prairie est souvent préconisée mais il existe un conflit avec l'autre préconisation de la diminution de la consommation de viande. Que faire des prairies si l'on n'y pratique pas l'élevage ? De plus les ruminants émettent du CH_4. Une analyse globale serait donc nécessaire.

qu'un riz classique, notamment parce que les micro-organismes producteurs de méthane entourant son système racinaire diminuent.

Il faut enfin noter qu'en complément de l'atténuation de l'effet de serre, l'amélioration des plantes, en créant certaines variétés mieux tolérantes à la sécheresse et aux fortes températures, devrait avoir un rôle important pour une meilleure adaptation aux changements climatiques.

L'agriculture de précision pour éviter des émissions

L'agriculture de précision ouvre plusieurs pistes d'atténuation d'émission de gaz à effet de serre de l'agriculture, l'une des plus importantes étant une **meilleure connaissance des sols** au niveau de la parcelle et donc une adaptation précise des intrants, en particulier de l'azote. La variabilité du reliquat azoté sur une parcelle peut être forte, variant d'un facteur 1 à 3 en fonction de la matière organique et du type de sol. Des cartes précises (carte des sols, carte des rendements, cartes de biomasse) permettent alors de mieux ajuster les doses d'azote à apporter.

L'agriculture de précision permet également de limiter les quantités de produits phytosanitaires et l'utilisation de carburant.

Le développement de **machines agricoles** électriques fait des progrès. Il y a déjà actuellement un tracteur enjambeur électrique opérationnel en viticulture. En cas d'utilisation d'électricité décarbonée, le gain est important. De nombreux constructeurs travaillent dans cette voie avec en particulier des tracteurs avec des moteurs électriques dans chaque roue.

L'amélioration du matériel d'épandage, liée à l'agriculture de précision, devrait permettre des réductions importantes de gaz à effet de serre.

Poursuite du travail

Le groupe de travail commun de l'Académie d'agriculture de France et de l'Académie des technologies « nouvelles technologies et agriculture » poursuivra et affinera ses analyses sur les relations entre technologies, agriculture et changement climatique lors de ses séances de travail de l'année 2017.

3-LA VILLE NUMÉRIQUE

Les consommations d'énergie par les villes peuvent être évaluées à partir des consommations nationales de 2012, publiées par le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) [6] :

	Charbon	Pétrole	Gaz	Electricité	Energies renouvelables	Total Mtep
Résidentiel/ Tertiaire	0,24	9,3	17,5	20	7,8	54,8
Industrie	1	3,6	6,7	6,7	1,5	19,5
Transports		14		0,3	0,7	15
Total Urbain	1,24	26,9	24,2	27	10	89,3
Total National	5,5	66,5	32	37,1	14,3	155,4
% Urbain/National	22%	40%	76%	73%	70%	57%

Répartition des consommations en espace urbanisé, par source (en MTep et %)

Hors transport, la ville consomme des énergies parmi les moins émettrices de CO_2, ce qui est le principal objectif poursuivi.
Cependant, la part urbaine des transports prise à 30 % du total national ne prend en compte que les transports sur territoire urbain, mais environ 80 % des transports sont à destination ou au départ d'une zone urbaine ; l'évolution favorable et continue de la consommation énergétique de l'industrie est liée pour partie à une performance énergétique en progrès sensible, mais aussi à un éloignement des activités fort consommatrices, voire à une réduction des activités industrielles fortement consommatrices d'énergie sur le territoire français ; les performances énergétiques pour le transport et le résidentiel stagnent, et ces secteurs sont prépondérants si l'on prend en compte la remarque ci-dessus concernant le transport.

Quelles évolutions possibles ?

1. Le secteur résidentiel et tertiaire

Le chauffage représente environ 60 % de la consommation du secteur.
La réalisation de bâtiments à énergie positive (BEPOS), et celle d'éco-quartiers, montrent la voie en matière de diminution des émissions de gaz à effet de serre à condition que leur principe se concentre sur la chaleur et non sur la production d'électricité. Le renouvellement du parc est très lent, environ 1 % par an. L'effet sur la consommation totale et sur le type d'énergie consommée est donc faible, de l'ordre de -0,5 % par an, et l'impact sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) est à peine perceptible.

Les opérations de rénovation lourde sont actuellement onéreuses, et leur financement par les particuliers très difficile avec un coût de l'énergie faible. L'utilisation de la maquette numérique[2] devrait permettre des gains de 30 à 50 % des coûts actuels, et donc abaisser fortement les seuils de rentabilité. Son emploi devrait aussi rendre possible des opérations plus nombreuses. Une rénovation du parc sur 30 années permettrait un gain de 1 % par an.

L'utilisation d'isolants de faible épaisseur, et une meilleure régulation thermique sont d'autres pistes pour diminuer les émissions de GES.

L'utilisation de la chaleur fatale[3] est une voie prometteuse de réduction de la consommation d'énergie (ex : Nanterre, échangeur en égout). Plus généralement, la production locale d'énergie et son partage dans un éco-quartier « ancien » peut être une voie, si les barrières réglementaires et d'information réciproque des acteurs sont levées. Les gains peuvent être du même ordre de grandeur que ceux escomptés grâce à la rénovation.

Les solutions de stockage, peut-être via l'hydrogène, doivent aussi contribuer à diminuer les émissions de GES.

Un panachage de ces solutions adaptées à chaque quartier et correspondant aux activités et ressources des habitants devrait permettre de réduire les émissions de GES à un coût optimal par tonne de CO_2 évitée.

2. La mobilité

L'arrivée des moteurs thermiques à faible consommation associés à des véhicules légers ainsi que l'usage des véhicules hybrides promettent des réductions de consommation de l'ordre de 30%, applicables en fonction de la vitesse de renouvellement des parcs. L'usage des véhicules électriques qui réduisent la pollution locale mais dont le rendement énergétique global est plus faible que celui des moteurs thermiques accroît globalement la consommation énergétique avec un impact variable sur les émissions de GES en fonction des modes de production de l'électricité.

Les apports du numérique peuvent aussi avoir un impact sensible sur la diminution de la consommation d'énergie, en réduisant par exemple fortement les kilomètres parcourus à la recherche d'une place de parking (20 à 30 % dans certaines villes), en partageant le trajet, en optimisant l'usage des infrastructures par la prise en compte de la totalité des activités des habitants qui génèrent leurs déplacements, en développant les véhicules autonomes, connectés, en remplaçant certains déplacements par des vidéoconférences… Les gains tant de pollution que de consommation énergétique peuvent être d'environ 30%, avec une mise en œuvre rapide et peu consommatrice d'investissements.

Pour atteindre l'objectif national de réduction des émissions de gaz à effet de serre, tout en répondant aux aspirations de mobilité de nos concitoyens, il est nécessaire de cumuler tous ces effets c'est à dire

[2] Représentation en 3D permettant d'analyser, contrôler, simuler le comportement d'objets.
[3] Chaleurs générées par des processus d'origine industrielle ou ménagère utilisables directement sous forme de chaleur et sans émission de CO_2 mais aujourd'hui dissipées dans la nature.

à la fois de “décarboner” tous types de véhicules, d'orienter de façon très volontariste la mobilité vers les modes de transport les moins émissifs, dont le train, les modes partagés (covoiturage de proximité en particulier, l'utilisation de la voiture solo pour les déplacements périurbains représentant une cause majoritaire d'émissions) et les modes actifs (vélo, marche). Ceci nécessite de conjuguer les actions des acteurs publics et privés par des politiques cohérentes (changement des règles d'occupation du sol et d'urbanisme, donner un prix au carbone ...).

Un enjeu important est l'articulation des correspondances entre les différents modes de transport autour de nœuds intermodaux (permettant par exemple le report entre un train ou un car et le vélo ou le covoiturage). La gestion des derniers kilomètres nécessite des applications mobiles et calculateurs d'itinéraires puissants, les études récentes montrant que plus des trois quarts des voyageurs sont prêts à les utiliser au quotidien pour gérer et optimiser leurs déplacements.

Enfin, le lissage de l'heure de pointe, en favorisant le télétravail dans l'entreprise grâce aux nouveaux outils collaboratifs utilisant la vidéo et en facilitant l'échelonnement du début des prises de fonction permet des gains substantiels des coûts d'infrastructure de transport.

En plus de la contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ces changements représentent une opportunité majeure pour le pays de réduire l'accidentologie, d'améliorer significativement la santé publique et plus généralement la qualité de vie.

3. Pour une approche nouvelle et globale par territoire

Une approche nouvelle de la mobilité des biens et des personnes, élément de création de valeur dans tous les domaines d’activité humaine, semble porteuse de réductions de 30 à 50 % de l’utilisation de mobiles (automobiles, camions, trains…), selon les premiers résultats des démonstrateurs du programme ADEME (*cf.* Bretagne Mobilité Augmentée [7]).

Une participation active des habitants et des décideurs tant politiques qu’économiques à l'échelle de chaque territoire permettra de créer des dynamiques locales acceptées et portées par tous, adaptées à chaque cas. Ceci nécessite de créer des territoires « intelligents » aux modes de gouvernance éclairés. Les gains potentiels sont là aussi prometteurs.

4-LA LOGISTIQUE VERTE

A la suite du Grenelle de l'environnement, une prise de conscience des effets sur l'environnement des activités de la logistique, *a minima* pour le **transport et l'entreposage**, s'est faite et de nombreux travaux de recherche, suivis de mise en œuvre, ont été menés souvent à la demande des chargeurs. L'enjeu à l'échelle nationale est significatif puisque les transports représentent 31,9 % de la consommation d'énergie et 25 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES) dont environ 44 % imputables au seul transport de marchandises, et alors même que le total des émissions en France a diminué entre 1999 et 2009, la part des transports a augmenté durant la même période.

Les chaînes logistiques sont devenues majoritairement mondiales, avec la globalisation de l'économie, en particulier pour les produits manufacturés ou transformés. Quand on parle de logistique « verte », il s'agit de toute la chaîne dans sa dimension locale, nationale ou mondiale. L'objectif est bien de réduire les émissions de gaz à effet de serre tout au long de celle-ci tout en maîtrisant les niveaux de service négociés et les coûts. Le paramètre coût est déterminant ; en effet un des bénéfices d'une logistique verte peut être une baisse globale des coûts[4], contrairement à une idée reçue, car les contraintes de marché excluent toute perte de compétitivité globale[5].

Cette vision « globale » induit une grande complexité, puisque, dans la plupart des cas, une multitude d'acteurs interviennent pour constituer la chaîne de service, et ils n'ont pas nécessairement un bénéfice identifié à intégrer les paramètres environnementaux et à les transmettre. Néanmoins, au cours des vingt dernières années, les entreprises de logistique ont déployé des **systèmes de traçabilité et de suivi des marchandises** qui constituent la colonne vertébrale de la collecte des informations liées au développement durable. Ces mécanismes sont à l'œuvre et les pieds de factures des transporteurs et des logisticiens comportent désormais des informations environnementales toujours plus fiables[6]. Peut-on savoir quelle est la quantité de gaz à effet de serre émise ? « Beaucoup de chargeurs ne contrôlent qu'une petite part de leur empreinte carbone » [9], il faut faire un choix entre précision et performance, mais une attitude pragmatique permet d'obtenir des résultats et la multiplicité des initiatives montre bien la pression sociétale qui s'exerce « mondialement » pour afficher une attitude éco responsable[7]. De nombreux chargeurs sont en recherche de méthodes à la fois justes (fiables) et praticables. En la matière, la France a choisi de favoriser la mise en place de labels environnementaux via l'AFNOR (Association française de normalisation).

La connaissance de cette information deviendra obligatoire, acquérant un statut « comptable » (auditable, traçable) ; et le prix des externalités liées à l'environnement (marché de la tonne de CO_2, prix de l'énergie) accélérera cette transformation, surtout si des incitations et contraintes y contribuent au niveau mondial.

Une étude réalisée dans le cadre du Ministère des Transports (Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - Predit), la prospective Fret 2040 [10], insiste sur le

[4]Voir par exemple « Reduce cost and CO_2 emission through behavioural change », Bearing Point, 2010, p5 [8].
[5] La mesure de la performance s'entend sur la totalité de la chaîne.
[6] Voir Décret n°2011-1336 du 24 octobre 2011 relatif à l'information sur la quantité de dioxyde de carbone émise à l'occasion d'une prestation de transport : https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024710173
[7] Voir les engagements pris par DHL, HapagLlyod...

renforcement de la massification et de la prédominance du transport maritime comme un des éléments faisant baisser durablement le nombre de tonnes/km pour la distribution des marchandises, en particulier par voie routière.

La situation française est de ce point de vue contrastée : en dépit d'acteurs mondiaux de premier plan, d'une façade maritime importante, la performance logistique portuaire, ferroviaire et fluviale ne la classe que 17ème mondiale (classement de la Banque mondiale). En Europe, elle est un des rares pays, où la part des transports propres ou alternatifs stagne ou régresse (pour le fer)[8], tout en accumulant des déficits importants. Ces faits se traduisent par une augmentation relative de la part des émissions de CO_2 dans le bilan national, et une non atteinte des objectifs intermédiaires du Grenelle. C'est un gisement potentiel de diminution des émissions de gaz à effet de serre dans le cadre des engagements de la France pris en 2016 (*Intended Nationally Determined Contribution - INDC*).

Un des enjeux majeurs des années à venir est la **redynamisation des modes alternatifs à la route**, et du transfert modal, et bien sûr l'amélioration énergétique continue des transports routiers qui resteront largement les premiers en volume[9].

L'atteinte de ces deux objectifs ne peut s'obtenir que par une transformation des chaînes logistiques de la longue ou moyenne distance (nationale) et de la distribution « urbaine » dite « du dernier kilomètre ». Les éléments de la performance durable sont connus : en amont, privilégier une éco-conception des produits et des emballages, réduire les parcours à vide, réduire les véhicules/km en optimisant les plans de transport, privilégier les transports propres, mettre en œuvre des solutions d'entreposage et de transbordement performantes tant du point de vue environnemental qu'économique, favoriser la mutualisation – ou l'accès à la ressource à un coût environnemental marginal – chaque fois que cela est possible.

Si la mise en œuvre est différente dans un contexte portuaire versus une plateforme logistique urbaine, les transformations à mettre en œuvre sont de même nature et mobilisent des potentiels de recherche équivalents : appréhender et modéliser des systèmes complexes tant du point de vue économique que technique, identifier des optimisations qui puissent se traduire dans les processus de service, accompagner le changement des organisations qui les mettront en œuvre, s'assurer de la performance économique, installer un cadre juridique adapté. La multidisciplinarité est au cœur de la réussite de la construction d'une chaîne logistique moins émettrice de gaz à effet de serre, chaque élément étant contributif du gain environnemental, économique et social associé, en tenant compte du prix du carbone adopté par la France.

Dans le domaine de la logistique urbaine – l'humanité sera à plus de 66% urbaine en 2050[10] – le potentiel de transformation est considérable en bénéficiant à la fois des progrès des technologies et en particulier des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) mais aussi en accompagnant une demande sociale forte des urbains pour des solutions plus éco responsables : on voit déjà certaines enseignes utiliser cet argument pour conquérir des parts de marché. Les zones fortement urbanisées créent aussi des besoins spécifiques pour les logistiques « arrière », de traitement des déchets et de recyclage, secteurs à fort potentiel de développement économique. La

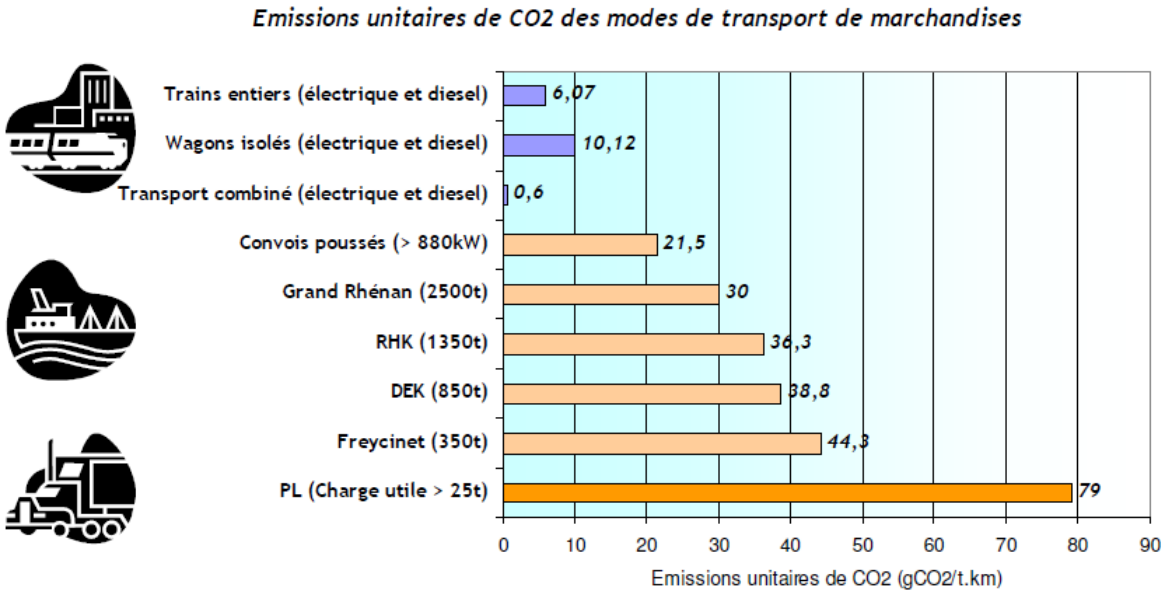
[8] Le transport fluvial progresse certes mais sa part relative est faible.
[9] Cette amélioration pouvant se réaliser via des camions plus propres, hybrides ou électriques mais aussi plus lourds d'où le débat sur les 45T...
[10] World Urbanization Prospects – ONU 2014 [11]

demande sociale est plus orientée vers la réduction des différents types de pollution et la qualité de la vie, que vers la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Le CO_2 n'est pas un polluant, il est abondant dans l'atmosphère. C'est donc un objectif additionnel que nos engagements climatiques nous assignent. Le prix attaché à la T de $CO_{2\text{-equ}}$ doit aider à cette prise de conscience collective.

Les collectivités territoriales ont commencé à intégrer cette dimension durable – à l'unisson de leurs électeurs. Il est souhaitable que leurs initiatives soient coordonnées aux niveaux national et européen pour éviter une fragmentation de ce marché et une perte d'opportunité pour les entreprises françaises innovantes dans ce secteur.

Le **transport de marchandises** est globalement émetteur de gaz à effet de serre. Les émissions dépendent d'une part des quantités et des tonnages transportés et d'autre part des modes de transports choisis.

L'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) a publié les émissions unitaires de CO_2 des modes de transport des marchandises :



Dans les hypothèses retenues, les trains électriques n'émettent pas de GES car l'électricité utilisée est supposée totalement non fossile, ce qui est spécifique de la France. L'émission des convois fluviaux est indiquée dans le cas des canaux traditionnels dit « Freycinet » (44 g/t.km) et dans le cas d'un canal à grand gabarit du type de ce que pourra être le canal Seine Nord Europe qui reliera la Seine au réseau fluvial Nord Européen (21 g/t.km). Un convoi poussé de 4 400 tonnes remplace 220 camions. Certaines études calculent des émissions de 11 gCO_2/t.km pour un canal moderne. L'émission des poids lourds est donnée pour le transport interurbain par des camions de plus de 25 tonnes ; elle est de l'ordre de 79 g/t.km.

En plus de la réduction d'émissions de CO_2, les transports ferroviaires et fluviaux limitent les trafics intenses sur certains axes comme la jonction Rotterdam-Anvers/ région parisienne, et à l'entrée des grandes villes.

Ces émissions sont des émissions de fonctionnement. On pourrait (ou on devrait) prendre en compte les émissions durant la phase de construction et les phases de travaux d'entretien de l'infrastructure correspondante (et aussi durant la fabrication des trains, des camions ou des bateaux). Ce calcul est intéressant à faire au cas par cas. Cependant, une infrastructure est un patrimoine collectif qui valorise le territoire pour le futur et la comparaison des émissions purement opérationnelles reste intéressante.

Du point de vue des émissions de GES et donc de la satisfaction des engagements de la France, **la voie ferrée et la voie d'eau permettent d'éviter des émissions de GES à la tonne transportée**. Le canal Seine Nord Europe permettrait ainsi d'économiser 14 millions de tCO_2-éq cumulées en 2060 (700 000 tonnes/an), soit en supposant un prix du CO_2 de 50 €/tCO_2-éq à cette époque, une valeur économique cumulée de 700 millions d'€.

La logistique verte portée par le Grenelle de l'environnement puis par la COP21 ne semble plus un sujet prioritaire pour les pouvoirs publics ; pourtant elle contribuerait significativement à l'atteinte des objectifs intermédiaires fixés par la France pour les transports et la logistique. Cependant, les chaînes logistiques prennent de plus en plus en compte les paramètres environnementaux et le renchérissement inévitable de l'énergie à terme rend indispensable des choix d'organisation logistique plus économes et donc souvent plus verts. Il faut introduire l'impact des engagements climatiques de la France dans la logique de la logistique verte, qui est plus large que les objectifs de baisse d'émissions de CO_2 de la France. Ces objectifs de baisse d'émissions ne sont pas inclus pour l'instant dans le prix de marché du CO_2 EU ETS (*Emission trading scheme*), puisque les transports en sont exclus. Le prix de CO_2 adopté par la France devrait permettre de mieux comprendre les implications économiques de ces baisses d'émission de gaz à effet de serre.

En conclusion, la logistique verte est à l'image de la logistique, polymorphe, et réserve un potentiel d'innovation considérable. L'enjeu est important, des opportunités nouvelles vont permettre aux différents acteurs de cette chaîne, le chercheur, le chargeur, le logisticien, le transporteur, l'informaticien de réinventer leur métier, de le développer tant en France qu'à l'international, et de promouvoir un savoir-faire qui répond déjà à une demande mondiale. Le coût économique du CO_2 prendra une place croissante dans les choix des acteurs et la capacité de proposer des solutions à faibles émissions donnera un avantage compétitif.

5-L'AUTOMOBILE DU FUTUR

L'automobile peut se définir comme un produit centenaire, technologique et industriel, qui a été, et est encore l'élément de base de la conquête sociale de la mobilité individuelle, et en même temps une source importante de nuisances globales et locales.
La prise en compte des nuisances environnementales est devenue, pour le marché européen et nord-américain un élément essentiel du contexte de mise en œuvre des véhicules. Si des progrès importants et constants ont eu lieu dans les vingt dernières années, le scandale « Volkswagen » a illustré l'extrême sensibilité à ce sujet et le risque économique et environnemental qui en découle.

L'automobile est un produit technologique

Une automobile est la combinaison de très nombreuses technologies, entre autres :
utilisation et mise en forme de matériaux très divers : aciers, plastiques, caoutchouc, verre,… ; cinématique, mécanique des solides, mécanique des fluides, tribologie ; traitements de surface, chimie, électrochimie, peintures,... ; thermique ; optique ; électricité, électronique, informatique ; ergonomie ; calculs numériques, modélisation, conception assistée par ordinateur (CAO),…
Au cours des cent ans de son existence, l'automobile a intégré rapidement les « nouvelles technologies » apparues sur le marché. Par exemple l'électronique intégrée dans les automobiles au début des années 80, représente aujourd'hui environ 30% de la valeur des véhicules occidentaux.
Mais pour l'essentiel sur cette période de 100 ans le produit automobile a très peu évolué dans ses fondements : il a quatre roues et des liaisons mécaniques ; un moteur à combustion interne (essence, diesel) ; une carrosserie, un conducteur aux commandes.
Les technologies jouent un rôle essentiel dans la réduction des nuisances environnementales, mais le comportement du conducteur et l'entretien du véhicule également. En outre, un délai significatif sépare l'innovation en laboratoire et en test, le produit industriel et le véhicule commercialisé.

L'automobile est un produit industriel

Une automobile est composée de plusieurs milliers de pièces et composants assemblés dans des usines travaillant à des cadences élevées pouvant aller jusqu'à la production d'un véhicule par minute. Le haut niveau de performance atteint par ces outils industriels, et le niveau élevé des investissements associés, expliquent au moins partiellement un certain conservatisme dans les es solutions techniques et architecturales. Cependant les fournisseurs innovent de leur côté et prennent en compte les cahiers des charges exigeants des constructeurs.

L'automobile est aussi une source de nuisances globales et locales

Dans les pays développés, les transports représentent 1/4 de la consommation d'énergie et 40% des émissions de CO_2, dont 80% pour les véhicules routiers. C'est donc un des gisements majeurs de diminution des émissions dans le cadre des engagements climatiques de la France.

Dans les pays développés, et en particulier dans l'Union européenne, ces émissions sont en cours de réduction en raison des réglementations s'appliquant aux nouveaux véhicules mis sur le marché (les normes EURO 1 ont été mises en place il y a plus de 17 ans, un nouveau durcissement EURO 6 est en

place depuis 2015). Sur les **polluants réglementés**, la pollution locale n'est plus un problème en Europe. En revanche le sujet des particules fines reste très actuel. Les normes en place – établies dans des conditions d'usage très contraintes – sont perçues comme trop arrangeantes pour les constructeurs. La situation est plus critique encore dans les pays émergents et à développement urbain rapide. La question sanitaire, de plus en plus sensible dans de nombreuses villes, s'ajoute au **besoin de réduction des émissions de gaz à effet de serre** cité au paragraphe précédent.

En France métropolitaine, en 2015, 3 461 personnes ont trouvé la mort dans des accidents de circulation (plus de 70000 blessés) [12]. Ces nombres sont en forte diminution en raison des progrès réalisés sur la sécurité des véhicules, l'amélioration des infrastructures routières et, il faut le dire, la politique de prévention et de répression des excès de vitesse mise en place ces dernières années par les pouvoirs publics. Il n'en est pas de même dans tous les pays du monde, loin de là. En 2006, 1,2 millions de personnes ont été tuées dans des accidents de la route (40 fois plus étant blessées).Le record est en Russie où, malgré la faiblesse du parc automobile, il y a eu 35 000 morts, et aux USA, pays qui possède le parc automobile le plus important, 45 000 tués. **La sécurité restera une exigence**.

Il faut mentionner la paralysie croissante de la circulation dans les villes. En Europe, la Commission européenne estime que 1% du PIB (produit intérieur brut) est perdu dans les **embouteillages urbains**. La situation est bien pire dans les pays en voie de développement. Elle va s'y aggraver rapidement en raison de l'accroissement en cours du parc automobile, du manque de moyens pour développer des infrastructures routières adéquates et de l'urbanisation rapide.
Diverses mesures, telles que le péage urbain, les limitations de circulation…. sont testées et mises en œuvre dans certaines villes (Londres, Stockholm, Rome,…). Mais, dans de nombreuses métropoles, par exemple au Caire, l'automobile est parfois transformée en « auto-immobile » !

L'automobile reste cependant synonyme de liberté individuelle et d'activité économique

La tolérance à l'ensemble des nuisances décrites est grande, parce que la voiture est perçue comme un élément de la liberté individuelle, et qu'elle porte une activité économique importante, qu'aucun pays ne souhaite sacrifier sur l'autel de l'environnement. Pour la France on peut considérer qu'environ 2,5 millions de personnes ont un emploi assuré directement et indirectement par le secteur automobile, ce qui représente 10% de la population active.
Comme on peut le constater actuellement, toute crise dans ce secteur a des répercussions importantes sur l'emploi, et devient très rapidement un problème politique.

Quel sera le modèle automobile de demain ?

Une récente projection publiée par le fonds monétaire international (FMI) estime que le parc automobile mondial passerait de 600 millions de véhicules aujourd'hui à 2,9 milliards à l'horizon 2050 [13], soit une multiplication par 5. Depuis 2014 la Chine est le 1er marché mondial (et le 1er producteur mondial). Deux milliards de nouveaux véhicules « rouleront » dans quelques pays du monde : Chine, Inde, pays d'Amérique latine, pays où leur nombre (par rapport au nombre d'habitants) est aujourd'hui encore faible.
Il n'est pas possible d'envisager une telle croissance avec des véhicules et des usages tels que nous les connaissons :

- propulsion par des moteurs à combustion interne utilisant des dérivés du pétrole (essence, gazole) dont la disponibilité pourrait décroître, et entraînant des émissions de CO_2 incompatibles avec les engagements climatiques des pays dans le cadre de l'accord de Paris ;
- véhicules multiplaces ne transportant pour l'essentiel du temps qu'une seule personne alors que l'incitation à utiliser des voitures pleines (covoiturage, BlaBlaCar, etc) conduit à une diminution immédiate des émissions de gaz à effet de serre par personne - km ;
- véhicules pouvant atteindre des vitesses élevées (+ de 160 km/h) et dimensionnés pour cela (freinage, puissance,…) alors que la vitesse est très généralement limitée.

Le modèle unique qui a marqué le XX^{ème} siècle devra fortement évoluer pour atteindre les objectifs de mobilité individuelle exprimés pour le XXI^{ème} siècle, tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre.

Fort heureusement, nous voyons émerger **de nouveaux formats et de nouveaux imaginaires pour les déplacements individuels et collectifs**. De très nombreux signaux, plus ou moins forts, peuvent nous permettre d'esquisser l'automobile de demain :Le monde n'est plus centré sur le « modèle occidental ». Les philosophies qui structurent le comportement de la grande majorité des sociétés, groupes, individus ne sont plus les nôtres. Par exemple, le confucianisme (25% de l'humanité) privilégie très fortement les valeurs collectives.Le problème climatique est maintenant visible des plus réticents et à la suite de l'accord de Paris, tous les pays se sont engagés à baisser leurs émissions de gaz à effet de serre et donc à réduire progressivement le recours aux combustibles fossiles.

L'urbanisation de la planète se développe exponentiellement. En 1950,30 % de la population vivait en ville. En 2007, 50 % de la population y vit. En 2020, 60 % y vivra, 80 % dans certains pays en développement dont l'Inde et la Chine. En 2015, 18 villes abritent plus de 10 millions d'habitants (Mumbai 22M, Dehli 19M, Shanghai et Lagos 17M,…). Il est essentiel que cette urbanisation se fasse à niveau d'émissions de gaz à effet de serre décroissant, donc avec un usage décroissant des combustibles fossiles.

En France, la voiture est un produit acheté par les « vieux »: l'âge moyen des acheteurs est de 54 ans, il augmente régulièrement. A Tokyo, 13 % seulement des 20-40 ans ont une voiture. Ils étaient 23.6 % en 2000. Là où se crée la culture des jeunes générations, la voiture individuelle n'a pas sa place.
Enfin, les **développements technologiques récents permettent des changements majeurs**. Les batteries lithium-ion rendent possible le véhicule électrique et le véhicule hybride rechargeables. Les matériaux de synthèse permettent l'allègement des véhicules et une plus grande liberté des formes,… L'électronique et l'informatique rendent possible les connexions entre véhicules (*vehicle to vehicle* - V2V) et avec l'infrastructure de transport (*vehicle to infrastructure* - V2I) afin d'améliorer la sécurité et la fluidité du trafic.

Les véhicules de l'avenir à court terme (10 ans) seront des véhicules urbains de petite taille (2,7 à 3,5 m de longueur) et de faible consommation. Le précurseur est la SMART. Le véhicule à succès est la nouvelle FIAT 500. Ce seront **des véhicules « low cost »**. Le précurseur est la Logan de DACIA (7 000 €). Depuis, il y a encore moins cher : la MARUTI Duo (4 500 $), la CHERY QQ3 (4 200 $) et la Nano de TATA (2 500 $).Il est intéressant de noter qu'en Europe occidentale, sur les 10 premiers mois de l'année 2008, et sur un marché déprimé (-5,4 %), seules les ventes de ces types de véhicules ont progressé. Ces véhicules sont plus légers, plus faiblement motorisés et moins émetteurs de gaz à effet de serre que les gros véhicules statutaires.

Ce seront des **véhicules avec de nouvelles motorisations**, introduites dès l'an prochain. Il s'agit de véhicules électriques (batteries Li-ion), d'abord sur des modèles existants : BMW mini E, puis rapidement sur des véhicules spécifiques. Si la part de 10% du marché mondial des véhicules électriques à l'horizon 2010, n'a pas été atteinte, elle croît désormais rapidement. Il s'agit également des véhicules hybrides rechargeables pour les voitures « routières », les fourgons et les camions.
L'introduction de ces nouvelles motorisations s'accompagne de l'allègement *absolument nécessaire*, et dans certains cas, de l'assistance électro-informatique (V2V et V2I) pour optimiser l'impact de leur introduction. Il y a là un gisement important de réduction des émissions de gaz à effet de serre par personne transportée. Sur cette période de court terme, **les véhicules équipés de moteurs à combustion interne constitueront encore la très large majorité des véhicules mis sur le marché**. Ceci d'autant plus que les laboratoires des principaux constructeurs occidentaux voient quelques possibilités d'amélioration de l'efficacité (rapport consommation-puissance-pollution) pour ces moteurs : la désactivation de cylindres ; l'injection directe haute pression + suralimentation ; l'optimisation de la gestion du recyclage des gaz d'échappement (*Exhaust gas recirculation*, EGR), ce qui, couplé à des technologies périphériques (« *stop and start* », réduction des frottements - pneumatiques, utilisation d'addition en proportion croissante de « bio-carburants »,….) permettra de respecter les réglementations de limitation des émissions de CO_2 (> 2016). Cela ne règle évidemment pas les problèmes posés à moyen et long termes (2020-2050), mais cela permet une transition progressive dans un cadre industriel connu. Le développement de raffinerie alimentée par de la biomasse, nationale ou importée, comme à La Mède (Total) montre peut-être le chemin du futur.Ces évolutions seront couplées avec des **évolutions importantes des modes de relation au produit** automobile : propriété / location, partages, taxis,….

A plus long terme, une progression des véhicules électriques (véhicules urbains, fourgonnettes, et certains véhicules routiers) **et des véhicules hybrides rechargeables** se produira, **et** surtout **de nouveaux concepts produits** - par exemple : tricycle, « fauteuil roulant », le robot comme support de mobilité, se développeront. Beaucoup de ces concepts sont déjà visibles ou expérimentés chez certains constructeurs, par exemple VOLKSWAGEN 2028, TOYOTA ou HONDA.

Et l'utilisation de l'hydrogène ? En particulier la pile à combustible ? Les biocarburants ?
Aujourd'hui de nombreux constructeurs font rouler des véhicules prototypes équipés de piles à combustible produisant de l'électricité pour faire fonctionner le (ou les) moteur(s) électrique(s). Ces véhicules arriveront-ils sur le marché, et à quel horizon ? Même si le difficile problème du volume de la pile nécessaire pour produire une quantité d'électricité suffisante est partiellement résolu, de nombreuses questions se posent encore avant d'arriver à une industrialisation et la mise sur le marché : la production et le transport de l'hydrogène, le stockage de l'hydrogène à bord des véhicules dans les conditions de sécurité requises, l'identification des matériaux les plus efficaces (techniquement et économiquement) pour la réaction électrochimique, la durée de vie de la pile en fonctionnement réel.La résolution de ces nombreux problèmes amène à penser que l'introduction sur le marché ne se fera pas, au plus tôt, avant 2025.
Pour remplacer les carburants liquides, les **biocarburants** sont une autre voie qui présente un meilleur bilan en matière de gaz à effet de serre que les carburants fossiles. Les biocarburants de première génération sont déjà sur le marché. Le biodiesel (86% du total) est incorporable au diesel, et le bioéthanol (14%) à l'essence. En 2014, en France, ils fournissaient 2 955 kTep dont 77% provenant de biodiesel d'origine végétale (source : MEDDE). Ils ont été critiqués car ils consomment des produits agricoles qui pourraient être utilisés pour l'alimentation. Aussi, sont en développement des

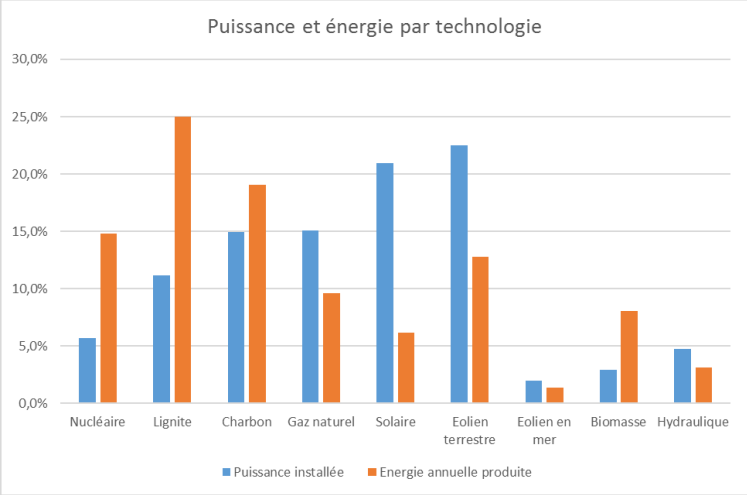
biocarburants dits « avancés ». Les biocarburants de 2ème génération sont produits à partir des plantes entières, de déchets agricoles ou forestiers... par voie biochimique (éthanol) ou thermochimique (gaz naturel de synthèse bio-sourcé, et kérosène et gazole de synthèse). Les premières productions arrivent en Europe comme aux Etats-Unis mais ils devraient se développer vraiment vers les années 2020. Les biocarburants de 3ème génération obtenus après photosynthèse (micro-algues) et transformation, ou par voie de fermentation de matières organiques diverses, font l'objet de travaux de recherche intenses. L'usage des biocarburants se développera certainement dans les années à venir mais il est largement dépendant des normes et des politiques fiscales applicables.

En conclusion, citons le Président de la *Society of Automotive Engineers* (SAE) : "*as change in our industry continues to accelerate, successful companies and people will be those that are able to better predict and adapt to future realities*".

6-L'INTÉGRATION DES ÉNERGIES INTERMITTENTES DANS LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE FRANÇAIS

Les énergies récupérables directement du soleil et du vent sont intermittentes. Leur facteur de charge (rapport entre leur production effective pendant un an, et leur production théorique si elles fonctionnaient en permanence à pleine puissance est donc médiocre (10% pour le solaire, et 14% pour l'éolien sur des sites moyens de l'Europe de l'Ouest). Dans de telles conditions, et si l'on se fixe un objectif pour la part de l'éolien ou du solaire dans la production totale, la puissance à installer doit prendre en compte cette faible disponibilité. En conséquence, la puissance investie en énergie renouvelable intermittente doit être très supérieure à sa contribution effective.

En Allemagne par exemple, pays chantre des énergies renouvelables, le solaire et l'éolien représentent 45 % de la puissance électrique installée, mais seulement 20 % de l'énergie produite (situation 2015[11]).



Mix électrique allemand (Puissance et énergie) - 2015

L'écart entre puissance installée et énergie produite est évidemment bien inférieur dans les pays bien dotés en soleil et en vent ; au Maroc, par exemple, le régime de vent est très favorable aussi bien près de Gibraltar que dans les alizés. Le vent est régulier, pratiquement sans lacune. Les pales des turbines peuvent être optimisées. Pour l'énergie solaire, la centrale Noor 1 de Ouarzazate est une centrale thermodynamique. Cela signifie qu'elle produit de la chaleur (technologie des sels fondus) à environ 400°C qui est transformée en électricité par un groupe turbo-alternateur. L'installation peut stocker la chaleur quelques heures, pour de l'électricité après la tombée du soleil. La centrale Noor produira à terme une puissance de 580 MW et couvrira une surface de 3000 ha.

La loi de transition énergétique française (n° 2015-992 du 17 août 2015) prévoit que les énergies renouvelables devraient en 2030 représenter 40 % de la production d'électricité, 38 % de la consommation finale de chaleur, 15 % de la consommation finale de carburant et 10 % de la consommation de gaz. La demande totale d'électricité ne devrait pas croître significativement dans le futur, malgré de nouveaux usages (transports notamment). En effet les usages industriels de l'électricité décroissent régulièrement, en lien avec la désindustrialisation du pays et l'amélioration de l'efficacité énergétique. En outre, les pouvoirs publics, via la réglementation technique (RT 2012) visent à faire baisser significativement la part de l'électricité dans le chauffage des logements.

L'électricité d'origine hydraulique représente près de 13% de la production d'électricité française (2014) ; elle devrait se maintenir dans le futur en niveau absolu. Pour que 40 % de l'électricité soit

[11] *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft* – BDEW – 2015.

renouvelable, et en admettant que l'électricité produite par diverses sources renouvelables (déchets, biogaz, etc.) représente 7% à 8% du total, il faudrait donc que les installations solaires et éoliennes produisent environ 20 % de l'électricité française en 2030 ; et donc représentent, selon l'ordre de grandeur allemand, environ 45 % de la puissance installée soit de l'ordre de 58 GW, l'équivalent de la puissance nucléaire actuelle. Cette estimation est cohérente avec les projections de Réseau de Transport d'Electricité (RTE) qui prévoit un parc éolien et photovoltaïque de 46 GW en 2025 [14].

Si 20 % de la production totale peut paraître modeste, 45 % de la puissance installée est en réalité très significatif. En effet, la disponibilité moyenne des énergies intermittentes est médiocre ; mais il peut arriver qu'il y ait simultanément vent et soleil ; et qu'à cette période, la demande d'électricité soit faible. C'est par exemple ce qui s'est passé en Allemagne le dimanche 8 mai 2016 en fin de matinée, où la situation de la production et de la consommation d'électricité était la suivante :

Source	GW	% Consommation intérieure	% Production totale
Solaire	27,62	59,2%	45,8%
Eolien	17,3	37,1%	28,7%
Conventionnel > 100 MW	15,32	32,8%	25,4%
Production totale	60,24		100%
Exportation	13,59		
Consommation intérieure	46,65		

Electricité allemande - 8 mai 2016

Pendant quelques heures, les énergies intermittentes (solaire et éolien) ont représenté 75 % de la production totale, et 96 % de la consommation intérieure.

De tels niveaux d'énergie intermittente posent deux grandes catégories de problèmes :

- L'équilibre global entre l'offre et la demande
- La stabilité du réseau et la fiabilité de l'alimentation

L'équilibre global entre l'offre et la demande

Les énergies intermittentes « déversent » sur le réseau. Si la demande augmente, elles ne peuvent la satisfaire puisqu'elles fonctionnent déjà à pleine puissance ; si la demande diminue, elles continuent à déverser, soit que les contrats d'enlèvement d'électricité le prévoient (Allemagne par exemple), soit que le marché de l'électricité l'impose puisque les énergies intermittentes ont le coût marginal de production le plus faible.

Peut-on alors déstocker, ou stocker de l'électricité ? Le seul stockage (virtuel) d'électricité sous forme de courant alternatif – celui distribué sur le réseau et aux consommateurs finaux – se fait sous forme hydraulique dans les barrages. Les capacités ne sont pas amenées à croître dans le futur, compte tenu du coût et des considérations environnementales attachées à la réalisation de nouveaux stockages. Les autres formes de stockage sont en courant continu (batteries), ou indirectes (*Power to gas*, Hydrogène).

Toutes ces solutions sont aujourd'hui couteuses, et ne peuvent fournir qu'une quantité limitée d'énergie au regard des aléas de la production solaire ou éolienne. Par exemple les stations de transfert

d'énergie par pompage (STEP) avec deux réservoirs situés à deux altitudes différentes reliés par une usine hydroélectrique permettent en France de stocker l'équivalent de 5 GW pour une durée de 6 à 7 heures seulement. Aucune solution de stockage ne permet de garantir la fourniture d'électricité pendant les périodes de faible ensoleillement ou vent, qui peuvent se compter en semaines (conditions anticycloniques).

Pour les décennies à venir, l'équilibre global en énergie requerra plusieurs conditions :

1. Réduire les amplitudes des variations résultant des énergies intermittentes ; ceci implique de fortes interconnexions entre régions aux régimes climatiques différents. Par exemple, tant en matière d'ensoleillement que de vent, les régimes de la France de l'Ouest et de la France du Sud sont très différents et largement non corrélés. L'Allemagne prépare la construction de trois grandes « autoroutes » de l'électricité Nord-Sud pour que l'éolien du Nord parvienne aux industries et populations du Sud. Des projets globaux existent, au niveau européen, de renforcement des interconnexions. Compte tenu des difficultés d'acceptation de nouvelles lignes Très Haute Tension qui en rendent les réalisations très longues, les indispensables projets français devraient commencer à être esquissés : on ne peut, sans courir de risque majeur de déséquilibre, se contenter de prétendre que les énergies solaires éoliennes sont des énergies locales à consommer localement.
2. Améliorer les prévisions climatiques, et les prévisions à 24 h de production d'énergie solaire et éolienne. Des progrès importants ont déjà été faits, que l'accroissement de la puissance des très grands calculateurs devrait permettre de poursuivre. L'analyse des situations passées (*big data*) devraient également contribuer à l'amélioration des prévisions.
3. Conserver une puissance installée significative en moyens de production ajustable. En Allemagne, ces moyens (nucléaire, charbon, gaz, et dans une moindre mesure lignite) représentent à peu près la même puissance installée que le solaire et l'éolien. Ce sont eux qui garantissent l'équilibre production-consommation.

   En France, les centrales nucléaires ont les capacités de suivi de charge et de téléréglage permettant d'assurer l'équilibre. Si elles venaient à être mises hors service, il faudrait créer de nouvelles sources de production garantissant la fourniture de puissance, et susceptibles de faire varier rapidement leur charge. La durée d'appel de ces installations sera faible ; ces sources devront avoir un faible coût d'investissement, mais leur coût de combustible peut être élevé : il s'agira de turbines à gaz à cycle direct.

   Si la capacité quotidienne de suivi de charge des centrales nucléaires françaises est grande, leur capacité de retour à pleine puissance après une longue période de fonctionnement à puissance réduite est plus limitée[12]. Cette limitation mérite d'être mieux évaluée au regard de périodes éventuellement longues (plus d'une semaine) très ensoleillées ou très ventées, qui conduiraient à faire fonctionner durablement des centrales à puissance partielle.

   Les producteurs d'électricité ne maintiendront pas inactives ou à charge partielle des installations sans être rémunérés pour la sécurité qu'ils assurent au réseau. Il conviendra que les gestionnaires chargés de garantir l'équilibre du réseau achètent des garanties de capacité.

[12] Du fait de limitation sur la tenue du combustible.

C’est en projet avancé en Allemagne, et en début d’expérimentation en France ; une directive européenne est en préparation sur ce point.

Si l’appel aux centrales nucléaires françaises était fortement réduit par la pénétration des éoliennes, et malgré la rémunération de capacité et de sécurité qu’elles apporteront, il sera peut-être économique de les mettre à l’arrêt définitif, et de leur substituer des centrales à gaz télé-opérées. Tant que le combustible de ces centrales sera totalement ou partiellement d’origine fossile, cela augmentera de fait les émissions de gaz à effet de serre français.

4. Organiser les échanges d’électricité pour les rendre plus rapides ; l’Allemagne passe actuellement d’enchères à une heure à des enchères par quart d’heure. Ces échanges devraient aussi comprendre la vente de capacités d’effacement à organiser au moyen d’une gestion fine par les distributeurs des consommations finales.

Stabilité du réseau et la fiabilité de l’alimentation

La stabilité du réseau ne se limite pas à garantir l’équilibre global production-consommation. D’autres équilibres sont à assurer, globalement ou localement.

Il faut pouvoir remettre en service un réseau ayant subi un *black out* total. L’intensité de démarrage des grands moteurs asynchrones (tels que ceux des pompes primaires des centrales nucléaires) est telle que des plans de secours doivent être établis, dans lesquels les barrages hydrauliques jouent un rôle clef. En revanche l’éolien et le solaire ne peuvent raisonnablement y contribuer.

L’optimisation de la distribution nécessite de régler non seulement la puissance apparemment consommée (puissance active), mais aussi la puissance réactive. L’électronique de puissance des centrales solaires et éoliennes peut y parvenir, à la condition que les spécifications de raccordement au réseau soient suffisamment exigeantes.

Les réseaux locaux sur lesquels déversent des centrales solaires ou éoliennes peuvent dans des conditions favorables d’ensoleillement ou de vent connaitre un excédent de production. Or, ils sont présentement organisés pour privilégier le sens descendant. Des modifications dans les nœuds du réseau (transformation et distribution) sont possibles ; elles sont en cours en Allemagne pour quelques centaines de millions d’euros.

En outre, il faudra procéder à une régulation fine de la fréquence tout au long des réseaux Basse et Moyenne Tension (*smart grids*), ce qui n’est pas le cas actuellement. Des investissements en contrôle, mais aussi en matériels (capacités et *selfs*) seront sans doute nécessaires.

L’importation et l’exportation

L’Allemagne et le Danemark résolvent actuellement une partie du problème posé par les excédents non maîtrisés de production d’énergie intermittente en les exportant. D’ores et déjà certains pays commencent à réaliser des barrages au nom de la sécurité de leur propre réseau (Pologne, Belgique). Mais c’est aussi de la déstabilisation des marchés de l’électricité qu’ils veulent se protéger : des investissements subventionnés allemands conduisent dans ces périodes d’excédents à des prix régionaux de l’électricité qui sont fortement négatifs. Et ce sont les producteurs limitrophes qui supportent une large partie des pertes.

Dans le sens des importations, l'Allemagne exclut les pays voisins des marchés de capacité, au motif que les marchés import-export ne sont ni assez fiables ni assez rapides. Des améliorations sont indispensables à cet égard.

On doit enfin noter que lorsque la France aura atteint le niveau d'énergie éolien et solaire qu'elle s'est assignée, et dès lors qu'elle devra conserver des capacités modulables assurant la fiabilité du réseau, elle se trouvera exportatrice en même temps que l'Allemagne ! Cette situation ne pourra en pratique être traitée qu'en obligeant à des réductions momentanées de puissance/déconnexion (*curtailment*) des installations solaires et éoliennes. Les réglementations nationales et européennes devraient de ce fait être modifiées.

Conclusion

L'insertion d'énergies intermittentes (solaire et vent) dans le réseau électrique français, compte tenu des ordres de grandeur visés à l'horizon 2030, ne pose pas de problèmes techniquement insurmontables.

Il convient cependant d'être transparent vis-à-vis du public en indiquant la nécessité de :

- Créer de nouvelles lignes d'interconnexion (ou supporter d'importants surcoûts de non foisonnement).
- Maintenir en fonctionnement à un niveau significatif des capacités de production modulable (en France, le nucléaire, même si on accepte de détériorer sa disponibilité) ; si elles devaient être arrêtées, la sécurité et la capacité devraient être assurées par des turbines à gaz à cycle direct.
- Investir dans une conduite plus fine des réseaux.
- Améliorer les marchés de l'électricité, et rémunérer les capacités maintenues disponibles mais exploitées à charge partielle pour faire la place au solaire ou à l'éolien.
- Rendre plus fluides les importations et exportations.

7-LA FILIÈRE BOIS ÉNERGIE

Le biogaz (complément)

L'Académie des technologies a publié récemment un rapport sur le paysage français du Biogaz et du Bio-méthane [15].

Une étude récente[13] confirme et actualise le diagnostic déjà posé. Malgré le soutien du gouvernement et des objectifs ambitieux, la France est encore très en retard sur ses voisins européens en matière de gaz vert. L'Hexagone ne comptait fin 2015 que vingt unités produisant du bio-méthane, c'est-à-dire du biogaz issu d'un processus de méthanisation puis purifié afin de pouvoir être injecté dans les réseaux. Avec 82 gigawatt-heures (GWh) injectés en 2015 (mais 279 GWh de capacité annuelle installée), la France se situe à l'avant-dernier rang des 9 pays européens étudiés dans l'observatoire. L'Allemagne arrive largement en tête, avec 10 000 GWh injectés pour 190 unités, suivie par le Royaume-Uni avec 2 000 GWh et 51 unités.

L'avance de l'Allemagne, où la méthanisation est développée depuis longtemps, s'explique en particulier par le fait que ce pays utilise des cultures dédiées à la production de biogaz, ce qui lui permet d'utiliser des matières premières homogènes et d'industrialiser ses procédés en optimisant leur productivité. L'Allemagne a même déjà diminué les aides à la filière, signe de maturité.

Au Royaume-Uni la croissance du bio-méthane est impressionnante : le gouvernement britannique a introduit un tarif de rachat garanti pour le bio-méthane en 2011, tout comme en France. Son succès s'explique par un tarif légèrement supérieur au tarif français, mais surtout par l'autorisation, là aussi, des cultures énergétiques.

Malgré des incitations importantes, le bio-méthane souffre encore en France de plusieurs freins. Les projets y sont particulièrement complexes, car seule l'utilisation de déchets est autorisée pour la méthanisation et les conditions d'obtention des subventions restent très encadrées. Selon l'observatoire, 67 % des unités de l'Hexagone utilisent des déchets agricoles.

L'obstacle principal reste la réticence des banques à financer les projets, essentiellement liée aux difficultés rencontrées dans le passé par de nombreuses installations de méthanisation agricole. Parmi les autres mesures préconisées par les professionnels, on peut insister sur la valorisation du digestat (ce qui reste en fin de processus), aujourd'hui considéré comme un déchet : ils réclament notamment son homologation automatique pour les installations utilisant des déchets agricoles ou alimentaires, afin de pouvoir l'utiliser comme engrais ou le vendre sans procédures complexes. La prolongation de quinze à vingt ans du tarif garanti serait peut-être une façon d'accélérer la réalisation des projets.

Enfin, alors que le gaz carburant (gaz naturel pour véhicules - GNV) commence à se développer dans l'Hexagone, les producteurs souhaiteraient que le GNV issu de bio-méthane soit considéré comme un biocarburant, et plus généralement mieux promu.

En attendant, de nombreux nouveaux projets sont en liste d'attente : ils étaient 200 début avril 2016, selon GRDF (Gaz réseau distribution France), représentant une production annuelle de 5 200 GWh à l'horizon 2019. Selon un décompte du distributeur de gaz, 16 projets devraient entrer en service cette

[13] Deuxième observatoire du Biométhane, SIA partners, juillet 2016.

année et 46 en 2017. La loi sur la transition énergétique d'août 2015 fixe un objectif de 10 % de gaz vert dans les réseaux en 2030, représentant un volume de 30 000 GWh.

8-L'ACCOMPAGNEMENT TECHNOLOGIQUE DES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT

La courte synthèse intitulée ''En Bref'' du rapport de l'Académie des technologies sur les technologies et le changement climatique [2] évoque au point 7 les pays en développement [qui] souvent plus vulnérables aux changements climatiques, devront faire l'objet d'une attention particulière de la part des acteurs publics ou privés, pour évaluer avec eux les facteurs clés d'adaptation et les technologies disponibles ou à développer et pour mobiliser les financements nécessaires.

La présente note a pour objet de développer ce point pour orienter la réflexion de l'Académie et ses futurs travaux dans ce domaine.

Dès 1992, la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques a fait une place à part aux pays en développement (PED). Dans son préambule, les parties à la Convention notent que la majeure partie des gaz à effet de serre (GES) émis dans le monde par le passé et à l'heure actuelle ont leur origine dans les pays développés, que les émissions par habitant dans les pays en développement sont encore relativement faibles et que leur part dans les émissions totales ira en augmentant pour leur permettre de satisfaire leurs besoins sociaux et leurs besoins de développement. Ce même préambule souligne la vulnérabilité des pays en développement (pays de faible élévation totale ou partielle, zones arides ou semi-arides…) et la difficulté particulière de ceux de ces PED dont l'économie est fortement tributaire de la production d'énergies fossiles.

La Convention stipule en conséquence que les pays développés fourniront des ressources financières nouvelles et additionnelles pour couvrir la totalité des coûts encourus par les PED du fait de leurs obligations découlant de l'article 12 § 1 de la Convention.

Rappelons enfin que cette Convention prévoyait, outre la réunion régulière de la conférence des Parties (les COP et notamment la COP 22 à Marrakech en 2016), la création d'un Conseil scientifique et technologique. Ce Conseil a notamment pour fonction de recenser les technologies et savoir-faire de pointe, novateurs et performants et d'indiquer les moyens d'en encourager le développement et d'en assurer le transfert. Il est clair que l'adaptation aux changements climatiques et la réduction des émissions de GES nécessitent toutes deux des choix technologiques et l'Académie des technologies est bien placée pour contribuer à éclairer ces choix.

Nous nous intéresserons dans la suite de cette note au continent africain qui regroupe la majeure partie des pays les moins avancées. Les travaux ultérieurs devront tenir compte des situations différentiées des cinq grandes régions que constituent le Maghreb, l'Afrique australe et les parties occidentale, centrale et orientale du reste de ce continent.

Démographie et Développement

La contribution de l'Afrique aux émissions de GES est encore marginale : 3,8 % des émissions mondiales. Mais cette part augmentera rapidement du fait de l'explosion démographique et de l'élévation du niveau de vie des Africains. L'Afrique compte actuellement environ 1,2 milliards d'habitants. Elle verra sa population doubler en 2050 et pourrait compter 4,2 milliards d'habitants en 2100. Sur la base des tendances actuelles, un homme sur quatre sera africain en 2050. L'élévation du niveau de vie, sans être aussi rapide que celle des pays asiatiques, est notable. Le PIB (produit intérieur brut) par habitant de l'Afrique subsaharienne a cru de 60 % entre 2000 et 2015 alors que la moyenne

mondiale ne progressait que de 40 %. Mais à 3 500 USD/habitant, il reste encore inférieur au quart de cette moyenne mondiale (14 800 USD/habitant). La conjonction de ces deux facteurs fait qu'entre 1990 et 2006, les émissions de CO_2 de l'Afrique ont progressé de 55 % quand les émissions mondiales augmentaient de 34 %.

Vulnérabilité des pays africains

Les pays d'Afrique sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques en raison de facteurs comme la pauvreté, la récurrence des sècheresses et la dépendance forte à une agriculture qui a très peu recours à l'irrigation. L'agriculture est la principale ressource économique de nombreux pays africains en dehors de ceux qui produisent et exportent des matières premières comme le pétrole ou le gaz. L'agriculture contribue dans une proportion de 20 à 30 % au PIB des pays du sud du Sahara et représente 55 % de la valeur totale des exportations africaines. Presque partout en Afrique, l'exploitation agricole est entièrement tributaire de la saison des pluies, ce qui rend ce continent particulièrement vulnérable aux changements climatiques. De plus, 30 % des infrastructures côtières d'Afrique, y compris les aménagements urbains au long du golfe de la Guinée et des côtes sénégalaises, gambiennes et égyptiennes risque d'être submergées. Ainsi la majeure partie de Banjul, la capitale de la Gambie (plus de 200 000 habitants) est à une altitude inférieure ou égale à 1m !

L'Afrique recèle environ 10 % des ressources prouvées d'énergie fossile. Les pays producteurs sont en difficultés en raison de la faiblesse des cours du pétrole. Ils le seront encore bien davantage à long terme si la lutte contre les changements climatiques conduit à limiter drastiquement le recours à ces énergies fossiles.

Les engagements volontaires de réduction des émissions de GES

Les pays africains, dans le cadre de la COP 21 ont déposé des engagements volontaires de réduction des émissions de GES (*Intended Nationally Determined Contributions* - INDC). Ces plans prévoient en général une forte réduction de la progression des émissions (20 à 50%) par rapport aux *scenarii* tendanciels. Ils sont généralement subordonnés à des financements accordés dans le cadre de l'engagement pris en 2009 à Copenhague par les pays développés : porter en 2020 à 100 milliards de dollars la contribution de ces pays aux investissements des PED pour lutter contre le changement climatique.

Les financements

Le rapport [16] demandé en 2015 à l'OCDE (organisation de coopération et de développement économiques) et au *think tank Climate Policy Initiative* a évalué à 62 milliards de dollars le montant des financements publics et privés mobilisés en 2014 par les pays développés à l'appui d'actions climatiques dans les PED. Ces fonds provenaient par tiers assez proches des financements publics bilatéraux, des financements publics multilatéraux et des cofinancements privés mobilisés grâce aux fonds publics (effet de levier). Ils doivent être portés à 100 milliards en 2020 en partie grâce à la contribution du Fonds vert pour le climat de l'ONU (organisation des nations unies) doté de 10,2 milliards de dollars. L'objectif est d'allouer à terme ses ressources de manière équilibrée entre atténuation et adaptation. 50 % des ressources dédiées à l'adaptation seront affectés au PED les plus vulnérables. Les États membres de l'UE se sont engagés à financer près de la moitié de ce fonds (4,7 milliards de dollars dont 1 pour la France). Les pays africains sont particulièrement attentifs à la mobilisation de l'ensemble de ces fonds. C'est un enjeu politique important de la COP 22 à Marrakech.

Vers une croissance verte

Dans cette perspective, le concept d'une industrialisation verte en Afrique apparaît de plus en plus comme la seule option pour un développement soutenu et continu de ce continent. La production et l'utilisation des énergies fossiles contribuant pour 87 % au total des émissions de CO_2 générées par l'activité humaine, la réduction de l'exploitation et de l'emploi des énergies fossiles se trouve au centre des préoccupations des défenseurs des initiatives vertes. Ce qui n'est pas sans poser des problèmes aux pays producteurs (Nigeria, Angola,…). Le rapport de la Commission Économique des Nations Unies pour l'Afrique (CEA) publié en 2016 souligne que les pays africains doivent tirer parti ''des innovations, des nouvelles technologies et des nouveaux modèles économiques qui optimisent l'utilisation des ressources naturelles renouvelables''. Le domaine de l'énergie et, plus particulièrement, l'électricité est révélateur des progrès possibles. A fin 2015, l'Afrique disposait de 2 100MW d'installations solaires photovoltaïques (65 % en Afrique du sud, 13 % en Algérie, 9 % à La Réunion et donc seulement 13 % dans le reste de l'Afrique). C'est vingt fois moins qu'en Allemagne où pourtant ces installations sont beaucoup moins performantes. Lors des deux dernières années, le continent africain a plus que quadruplé la puissance photovoltaïque installée. Celle-ci reste encore très modeste au regard de l'immense potentiel africain.

En conclusion, il est clair que l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à ses effets représentent pour l'Afrique un défi considérable qui va nécessiter l'emploi de nouvelles technologies et la mobilisation de moyens financiers considérables. C'est l'opportunité de repenser les modèles de développement. Mais il ne faut pas se tromper de technologies et de modèles car le gâchis serait catastrophique pour les Africains et pour l'Europe. L'Académie des technologies, directement ou à travers le GID (groupement interacadémique pour le développement), doit apporter sa contribution au développement ''vert'' d'un continent qui est proche de l'Europe et dont la démographie accroîtra sans répit l'importance dans la mondialisation.

LISTE DES CONTRIBUTIONS

Complément au Rapport « Les technologies et le changement climatique – des solutions pour l'atténuation et l'adaptation » (Académie des technologies, Avril 2016), élaboré par un groupe de travail animé par Marion GUILLOU avec l'appui de Lucie GOUESLAIN.

Avec les contributions de :

Bernard LE BUANEC, Thierry CHAMBOLLE, Barbara DALIBARD, Bruno JARRY, Olivier MAUREL, Paul PARNIERE, Alain PAVE, Jean-Claude RAOUL, Bernard TARDIEU, Dominique VIGNON

SIGLES UTILISÉS

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFNOR	Association française de normalisation
BEM	Banc d'essai moteur
BEPOS	Bâtiment à énergie positive
BIM	*Building information modeling*
CAO	Conception assistée par ordinateur
CCS	*Carbon capture and storage* (Captage/stockage de CO_2)
CEA	Commission économique des Nations Unies pour l'Afrique
COP	Conférence des parties
EGR	*Exhaust gas recirculation* (Recirculation des gaz d'échappement)
ETS	*Emission trading scheme*
FMI	Fonds monétaire international
GES	Gaz à effet de serre
GID	Groupement interacadémique pour le développement
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNV	Gaz naturel pour véhicules
GRDF	Gaz réseau distribution France
GWh	Gigawatt-heure
INDC	*Intended Nationally Determined Contributions*
MEDDE	Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
MTep	Mégatonne équivalent pétrole
NTIC	Nouvelles technologies de l'information et de la communication
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ONU	Organisation des nations unies
PED	Pays en développement
PIB	Produit intérieur brut
Predit	Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres
RTE	Réseau de transport d'électricité
SAE	*Society of automotive engineers*
STEP	Station de transfert d'énergie par pompage
tCO_2-éq	Tonne de CO_2 équivalent
TICPE	Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques
V2I	Connexion véhicule à infrastructure (*vehicle to infrastructure*)
V2V	Connexion véhicule à véhicule (*vehicle to vehicle*)

RÉFÉRENCES

[1] Académie des technologies, Avis Les technologies et le changement climatique – des solutions pour l'atténuation et l'adaptation, 2015.

[2] Académie des technologies, Rapport Les technologies et le changement climatique – des solutions pour l'atténuation et l'adaptation, 2016.

[3] Commissariat général à la stratégie et à la prospective, L'évaluation socioéconomique des investissements publics, Rapport de la mission présidée par E. Quinet, 2013.

[4] HFFA Research GmbH, The economic, social and environmental value of plant breeding in the European Union, 2016.

[5] Comprendre l'amélioration des plantes, A. Gallais, Éditions Quae, 2015.

[6] Commissariat général au développement durable, Chiffres clés de l'énergie, Edition 2012. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Chiffres_cles_de_l_energie_2012.pdf

[7] http://bretagne-mobilite-augmentee.fr/

[8] Bearing Point, Reduce cost and CO_2 emission through behavioural change, 2010. http://www.bearingpoint.com/ecomaXL/files/DKClimate.pdf&download=0

[9] The Economist |Technology Quarterly – Carbon footprints, Following the footprints, 4 juin 2011.

[10] Predit (Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres), Cinq scenarios pour la logistique et le fret en 2040, sous la direction de P. Duong et M. Savy, Samarcande Etudes et Conseils, 2008.

[11] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014), World Urbanization Prospects: The 2014 Revision.

[12] Observatoire national interministériel de la sécurité routière - Bilan de l'accidentalité de l'année 2015.

[13] FMI (Fonds monétaire international), World Economic Outlook, 2008, p142, Box 4.1 Rising car ownership in emerging economies: implications for climate change.

[14] RTE (Réseau de transport d'électricité), Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France – Edition 2016. http://www.rte-france.com/sites/default/files/bp2016_complet_vf.pdf

[15] Académie des technologies, Rapport Le biogaz, EDP Sciences 2016.

[16] OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), Le financement climatique en 2013-2014 et l'objectif des 100 milliards de dollars, Rapport de l'OCDE établi en collaboration avec Climate Policy Initiative.