



Le stockage du CO₂

ÉVALUATION DU POTENTIEL DE CAPTURE ET DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO₂ DANS LE MONDE

LES RÉDUCTIONS POTENTIELLES D'ÉMISSIONS DE CO₂ PAR DES PLANTATIONS FORESTIÈRES SUR DES TERRES AGRICOLES DANS LE MONDE À L'HORIZON 2050

Edition

Liste des membres :

ADEME :
Agence de l'Environnement et
de la Maîtrise de l'Energie

BRGM :
Bureau de Recherches
Géologiques et Minières

CIRAD :
Centre de Coopération Internationale
en Recherche Agronomique pour le
Développement

CNRS :
Centre National de la
Recherche Scientifique

CSTB :
Centre Scientifique et
Technique du Bâtiment

CITEPA :
Centre Interprofessionnel
Technique d'Etudes
de la Pollution Atmosphérique

CEA :
Commissariat à l'Energie Atomique

EDF :
Electricité de France

GDF :
Gaz de France

GIE R.E. PSA RENAULT

IFP :
Institut Français du Pétrole

INERIS :
Institut National de l'Environnement
Industriel et des Risques

INRA :
Institut National de la
Recherche Agronomique

INRETS :
Institut National de la Recherche sur
les Transports et leur Sécurité

ONF :
Office National des Forêts

SNCF :
Société Nationale des Chemins
de Fer Français

SNET :
Société Nationale d'Electricité et de
Thermique

Des responsables des ministères
chargés de l'Environnement, de
l'Industrie, de la Recherche, du Plan
et du Logement font partie du Comité
de Coordination et d'Orientation
Scientifique

Le stockage du CO₂

EVALUATION DU POTENTIEL DE CAPTURE ET DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO₂ DANS LE MONDE

*POTENTIAL OF CO₂ CAPTURE AND GEOLOGICAL
STORAGE IN THE WORLD*

Auteurs : Georgia Plouchart (IFP) et Aude Fradet (Gaz de France)

Synthèse	3
Abstract	5
Introduction	7
Etat de l'art	9
Hypothèses et méthodologie - scénario de capture	19
Potentiel de stockage du CO₂ dans les champs de pétrole et de gaz	25
Résultats	27
Conclusion	36
Notes	39

LES RÉDUCTIONS POTENTIELLES D'ÉMISSIONS DE CO₂ PAR DES PLANTATIONS FORESTIÈRES SUR DES TERRES AGRICOLES DANS LE MONDE À L'HORIZON 2050

*WORLD CO₂ EMISSION REDUCTION BY FOREST PLANTATIONS ON
AGRICULTURAL LAND UP TO 2050*

Auteurs : Vincent Dameron (Ingénieur du GREF), Carine Barbier (IDDRI), Arthur Riedacker (INRA)

Résumé	41
Abstract	44
Introduction	45
Un premier enjeu : les surfaces disponibles pour de nouvelles plantations	47
Augmentation du stock de carbone dans les plantations, selon les scénarios d'exploitation forestière	59
Impacts sur le bilan CO₂ de l'usage du bois : le stockage dans les produits récoltés et les substitutions	69
Conclusion	85
Annexes	88
Bibliographie	90
Notes	91

Numéros précédents des Cahiers du CLIP

92

L'iddri assure l'animation du CLIP
et l'édition des Cahiers du CLIP



Editorial

Face au défi posé par le changement climatique, l'idée de capturer, puis de stocker le carbone issu de l'utilisation des combustibles fossiles semble en première approche une voie rationnelle, s'ajoutant au menu des politiques disponibles pour stabiliser la concentration de gaz à effet de serre. Pour autant, ces options ont engendré un débat passionné qui a marqué les différentes étapes de la négociation de Kyoto, et qui est loin d'être clos. Les arguments développés en opposition à cette option relèvent toutefois de différents niveaux logiques qu'il est utile de préciser.

Un premier niveau de débat concerne la crainte de voir ces solutions servir de prétexte à un ajournement de la remise en question de nos systèmes énergétiques actuels. Cet argument a pris toute sa force dans la dynamique de la négociation, où le recours aux « puits de carbone » (séquestration biologique) est apparu comme un moyen détourné d'affaiblir les engagements de réduction d'émissions pris à Kyoto. De ce point de vue, le travail de prospective proposé dans ce cahier du CLIP prend tout son sens car il démontre bien que, si la capture du carbone peut constituer un volet non négligeable des politiques de précaution face à l'effet de serre, elle n'apporte qu'une solution partielle, différée, et mal répartie sur l'ensemble de la planète. Séquestrer fait sens en complément, et non en alternative, à la recherche d'une plus grande efficacité énergétique et d'une diversification vers des sources d'énergie non carbonées.

En second lieu, de nombreux « puits de carbone » biologiques sont certes dépendants des activités humaines (usages des sols, déforestation, boisements, etc.) mais leur quantification pose d'énormes problèmes méthodologiques peu compatibles avec leur prise en compte dans une comptabilité homogène à celle des émissions énergétiques et industrielles. Nous avons ici pris le parti de n'étudier que les potentiels de plantations forestières, pour lesquels les flux nets de carbone sont raisonnablement prévisibles et vérifiables.

Enfin, la séquestration recouvre un vaste champ d'options qui, pour certaines, ne sont pas exemptes de critiques quant aux incertitudes et aux risques qu'elles recèlent tant du point de vue environnemental que social. Ici encore, l'étude est volontairement contrainte par la prise en compte de solutions peu controversées. La séquestration géologique, qui consiste à prélever à la source le carbone libéré par les combustibles fossiles pour le réintroduire dans des gisements souterrains, est limitée à l'utilisation, technologiquement maîtrisée, des anciens gisements de pétrole et de gaz. Pour la séquestration biologique, la biomasse occupe les terres libérées par l'agriculture, en fonction de scénarios d'évolution de la productivité agricole qui déterminent les surfaces disponibles sans concurrence d'usage alimentaire.

Ces précautions limitent évidemment les potentiels mobilisables, mais permettent ainsi de préciser l'enjeu réel sur des options peu controversées. Le principal enseignement pour la séquestration géologique est la forte restriction de potentiel qui découle de la mauvaise adéquation entre sources et gisements. Pour la valorisation de la biomasse, les potentiels dépendent bien évidemment très fortement des perspectives agricoles. Au-delà, on constate que les scénarios qui envisagent une rotation des cultures et une valorisation matériaux ou énergétique des produits sont au moins aussi efficaces du strict point de vue climatique que les scénarios de stockage sur pied (sans exploitation). De plus, les gains en fin de période sont définitivement acquis, alors qu'ils sont fortement réversibles et représentent un lourd passif pour les générations futures dans le cas du stockage sur pied. La seule contrainte provient alors, ici encore, de l'imparfaite adéquation régionale entre potentiels de plantation et marchés aval (matériaux, énergie) : une transformation poussée des produits (biocombustibles liquides) serait alors nécessaire pour permettre des échanges entre grandes régions du monde et valoriser pleinement les capacités de production.

Michel Colombier, Directeur du CLIP

Evaluation du potentiel de capture et de stockage géologique du CO₂ dans le monde

Potential of CO₂ capture and geological storage in the world

Synthèse

L'objectif de cette étude est de dresser un bilan, à l'horizon 2050, du potentiel mondial de capture et de stockage géologique du carbone émis par la production d'électricité d'origine fossile. Ont été pris en compte pour le stockage les gisements de pétrole et de gaz, sites les mieux connus aujourd'hui. Dans un premier temps, pour les différentes régions du monde, les potentiels de capture ont été estimés, à partir de scénarii de développement massif des techniques de capture sur les centrales de production d'électricité, puis les capacités de stockage de chacune des régions identifiées ont été mises en regard des potentiels de capture.

Potentiel de capture

La production d'électricité à l'horizon 2050 a été déterminée à partir du scénario B1 du GIEC, en concordance avec l'étude sur le stockage biologique. Selon ce scénario, elle atteindrait 60000 TWh en 2050 contre 15000 TWh en 2000 au niveau mondial. L'élaboration des scénarii de capture a nécessité l'identification des centrales électriques nouvellement installées chaque année, pour identifier les technologies de capture mises en œuvre. Les performances de capture varient en effet significativement entre les technologies appliquées aux centrales existantes (post-combustion) et celles appliquées aux nouvelles centrales (pré-combustion). Les hypothèses suivantes ont donc été faites : (i) la durée de vie d'une centrale thermique est fixée à 40 ans, (ii) la croissance annuelle de la production d'électricité d'origine fossile est assurée par l'installation de nouvelles centrales thermiques, (iii) la date de début de pénétration des équipements de capture est fixée à 2020, avec un taux d'équipement

de 100% pour les installations neuves et un taux de 10% par an pour les installations existantes d'âge inférieur ou égal à 30 ans, (iv) les centrales sont équipées à partir d'une puissance de 200 MW et 5000 heures de fonctionnement par an. Enfin, pour toute centrale installée entre 2000 et 2020, les rendements électriques actuels sont appliqués alors que pour la période 2020-2050, des gains en consommation de combustible de 7% pour les centrales au charbon et fioul et de 10% pour les centrales au gaz sont utilisés.

Sans l'utilisation de la capture à partir de 2020, et selon le scénario B1, les émissions de CO₂ issues de la production d'électricité d'origine thermique s'élèvent en 2050 à près de 25 Gt/an, soit 3,5 fois le niveau de 2000. Les centrales au charbon, notamment en Chine, représentent 60% de ces émissions en 2050. Le cumul des émissions entre 2000 et 2050 s'élève alors à 870 Gt CO₂. Avec les hypothèses optimistes d'équipement des centrales en systèmes de capture, et *en supposant que les capacités de stockage sont suffisantes*, il serait possible de piéger 66% des émissions en 2050 et de limiter ainsi la croissance des émissions de CO₂ de la production électrique à 16% sur la période 2000-2050. Sur cette période, la capture du CO₂ émis pourrait éviter 375 Gt CO₂ soit 45% des émissions cumulées. Mais la capture s'accompagne d'un surcoût énergétique d'environ 26 Gtep, se traduisant par des émissions supplémentaires de CO₂. Ainsi, ces émissions supplémentaires s'élèveraient à 3,5 Gt CO₂ en 2050, et à 85 Gt CO₂ cumulées sur toute la période 2000-2050.

Potentiel de stockage

Le potentiel de stockage considéré ici correspond à l'injection du CO₂ dans les gisements de

pétrole et de gaz. Dans le cas des champs pétroliers, l'injection de CO₂ peut permettre tout à la fois de stocker du carbone et d'augmenter le taux de récupération des gisements en fin de vie. Les estimations dans le cas des champs pétroliers se sont basées sur différentes études, en particulier l'étude menée par le DTI et celle menée par ECOFYS. Ces travaux caractérisent, en fonction des propriétés des champs, la quantité de pétrole additionnelle récupérée et la quantité de carbone stockée lors de l'injection du CO₂. Selon la technologie, le stockage peut varier entre 0,2 et 2,8 kg CO₂ par m³ de réserve de pétrole pour les champs de petite taille et entre 1,5 et 8,8 kg CO₂ par m³ de réserve de pétrole pour les champs de grande taille. En appliquant la méthode à tous les champs, on arrive au potentiel global de stockage dans les gisements pétroliers. Dans le cas des réservoirs de gaz, l'étude ne tient pas compte de la faisabilité du stockage en fonction des caractéristiques du champ, mais estime le stockage potentiel à une valeur comprise entre 1,5 et 8,8 kg CO₂ par m³ de gaz naturel.

Les estimations issues de ces différentes hypothèses conduisent à un stockage potentiel de CO₂ compris entre 560 et 1170 Gt. Le Moyen-Orient et la Russie sont les deux principales régions de stockage possible : à elles seules, elles couvrent 60% du potentiel mondial.

Comparaison des potentiels aux échelles régionales

À l'échelle globale, le potentiel de stockage suffirait à absorber les 460 Gt CO₂ capturées entre 2020 et 2050. Cependant, au niveau régional, les disparités sont importantes entre la capture et le stockage possibles. Ainsi, les régions peuvent être distinguées en trois grands groupes :

- Les régions excédentaires où le stockage potentiel est au moins une fois et demie supérieur au CO₂ capturé (Moyen-Orient, ex-URSS, Amérique du Sud, Afrique du Nord et de l'Ouest, et Océanie). Mais leur potentiel de capture ne représente que 18% du potentiel mondial d'ici 2050.
- Les régions juste excédentaires ou juste déficitaires, où le stockage potentiel est du même ordre de grandeur que les émissions capturées (Europe de l'OCDE, Asie du Sud Est, Amérique Centrale et Canada). La difficulté dans ces régions se trouve tout d'abord dans le fait que les incertitudes sur les paramètres peuvent faire passer chaque région d'excédentaire à déficitaire ou réciproquement. Une autre difficulté réside dans

les investissements nécessaires pour l'introduction du stockage du CO₂ d'ici 2020, dans la mesure où plus de 80% du potentiel de stockage est en offshore sauf pour l'Amérique Centrale, dans des champs qui risquent d'être en fin d'activité avant 2020.

- Les régions déficitaires, pour lesquelles le stockage dans les gisements de pétrole et de gaz ne suffit pas à absorber les émissions capturées (Europe de l'Est, Etats-Unis, Asie du Sud dont Inde, Asie de l'Est dont Chine, Japon, Afrique du Sud et Afrique de l'Est). Ces régions représentent 83% du potentiel de capture contre 9% du potentiel de stockage.

Ainsi, la prise en compte d'une distance seuil entre la source d'émissions et les sites de stockage de 1000 km réduit sensiblement le potentiel de la filière de capture et stockage du CO₂. Les pays couvrant 80% du potentiel de capture ne pourraient stocker que 126 Gt CO₂, soit permettre d'éviter 16% de leurs émissions d'origine électrique cumulées entre 2000 et 2050. Parmi ces pays, la Chine, l'Inde et les Etats-Unis, couvrant à eux seuls 53% du potentiel mondial de capture, ne pourraient stocker que 72 Gt CO₂ soit éviter 14% de leurs émissions d'origine électrique cumulées entre 2000 et 2050.

Le développement d'une telle filière dans le secteur de l'électricité impose donc de relever de nombreux défis d'ici à 2020 tant sur le plan économique que technologique. Son potentiel de réduction d'émissions de CO₂ dépend également beaucoup des capacités réelles de stockage des aquifères salins et des veines de charbon inexploitable, encore mal connues à ce jour. Compte-tenu du rythme de déploiement de cette filière et des nombreuses incertitudes qui pèsent sur elle, elle ne peut être qu'une solution partielle et de long terme. Les politiques de maîtrise de la demande d'électricité et l'utilisation d'alternatives plus maîtrisées telles que les énergies renouvelables ou la cogénération, restent primordiales.

Abstract

Large scale use of fossil fuels as primary energy source has resulted in large CO₂ emissions. It is now generally admitted and proved that emissions of greenhouse gases (GHG) or more precisely the increasing atmospheric concentrations of GHG cause a temperature rise and are likely to influence global climate.

An important sector regarding GHG emissions is power generation, accounting for almost 40% of the world total energy related CO₂ emissions. CO₂ emissions are either concentrated or diffuse. Many methods exist for carbon capture and storage, adapted either to concentrated sources of carbon emissions (geological storage) or to both concentrated and diffuse sources (biological storage). This study focuses on geological carbon storage and its potential for carbon capture for CO₂ emitted from electricity production. Two main objectives are studied : the first aim of this study is to assess, from now to 2050, the potential for carbon capture at the global scale, for emissions coming from electricity production from fossil fuels (coal, oil and gas); the second aim is to compare capture and storage potentials. In order to estimate the potential for carbon storage once captured, this study focuses on storage in oil and gas fields, which are the best known at the time.

Capture potential

The first step for such a study is to estimate power generation from now to 2050. The IPCC B1 scenario was used, from which the power generation in 2050 was estimated to 60000 TWh, almost 4 times the 2000 electricity production. To define the capture scenarii, newly installed power plants have to be identified for each year of the time frame, in order to adapt the scenarii to the new capture technologies. Capture efficiency may indeed vary significantly between technologies adapted to existing power plants (post-combustion) and technologies adapted to new power plants (pre-combustion). Several assumptions have been taken into account :

- the life time of a power plant is supposed to be 40 years,
- the annual growth of the power demand from fossil fuels is supposed to be supplied for by newly installed power plants,

- capture equipment is supposed to be in use after 2020, at a rate of 100% for new plants and 10% annually for existing plants under 30 years,
- all plants above 200 MW and 5000 hr/yr are equipped for capture,
- for any plant installed between 2000 and 2020, electric efficiencies are supposed to be equal to the present values, whereas for all plants installed between 2020 and 2050, a decrease in fuel consumption is taken into account, equal to 7% in case of a plant using coal or oil, and 10% for a plant using natural gas.

Without capture starting from 2020, the B1 scenario leads in 2050 to almost 25 Gt CO₂/yr emitted by power generation from fossil fuels, that is to say 3.5 times the 2000 emission level. Coal power plants, especially in China, represent 60% of the total amount. Cumulated emissions between 2000 and 2050 rise up to 870 Gt CO₂. With those optimistic assumptions and if the storage capacities are supposed large enough, it would be possible to sequester 66% of the 2050 emissions and so doing to limit the growth of CO₂ emissions from electricity production at 16% of the B1 level along the time frame 2000-2050. During this period, the capture of emitted CO₂ could avoid 375 Gt CO₂, or 45% of cumulated emissions. But capture implies also an energetic cost, and consequently supplementary emissions. Those emissions could rise up to 3.5 Gt CO₂ in 2050, or to 85 Gt CO₂ if cumulated between 2000 and 2050.

Storage potential

Here are taken into account storage potentials from CO₂ injection in oil and gas fields. As for oil fields, CO₂ injection may at the same time store carbon and increase the oil recovery depleted fields. Storage estimates in oil fields are based here on several studies, that give the quantity of additional oil recovered and of carbon stored during injection, depending on fields properties. Storage may vary between 0,2 and 2,8 kg CO₂/m³ of oil in ground for small fields and between 1,5 and 8,8 kg CO₂/m³ of oil in ground for large fields, depending on the technology used. The global storage potential is the sum of the

potentials of all fields. As for natural gas fields, this study doesn't take into account the size of the fields, but the potential storage lies between 1,5 and 8,8 kg CO₂/m³ of natural gas.

Based on those assumptions, the potential storage may be between 560 and 1170 Gt CO₂. Middle East and Russia are the two main regions in terms of storage potential, with 60% of the total world potential.

Potential comparison at the regional scale

At the global scale, the storage potential could be enough to absorb the 460 Gt CO₂ captured between 2020 and 2050. Nevertheless, at the regional scale, disparities are large between possible capture and storage. Three main groups can thus be distinguished :

- Region of large surplus, for which the potential storage is at least 3 times larger than the total amount of captured CO₂ (Middle East, former USSR, South America, North and West Africa). But the total capture potential of those region represents only 17% of the world capture potential from now to 2050.
- Region of surplus, where the potential storage is larger than captured emissions, but with a ratio lower than 3 (OECD Europe, Oceania, South East Asia and Central America). The potential difficulty for those regions are the necessary investments for the introduction of CO₂ capture in 2020, because more than 80% of the potential storage are in offshore fields, that may be mature before 2020.
- Overdrawn regions, where the storage in oil and gas fields is not enough to absorb captured emissions (Eastern Europe, Canada, USA, South Asia of which India, Eastern Asia of which China, Japan, South Africa and Eastern Africa). Those regions represent 83% of the capture potential but only 9% of the storage potential.

If a threshold of 1000 km is taken into account between the source of emissions and the storage location, the resulting potential for carbon capture and storage is significantly reduced. The countries representing 80% of the global capture potential could only store 126 Gt CO₂, in other words avoid 16% of their emissions from power generation cumulated between 2000 and 2050. Among those countries, China, India and USA, representing 53% of the world capture potential, could only store 72 Gt CO₂ that is to say avoid 14% of their emissions from power generation cumulated between 2000 and 2050.

The development of capture and storage of carbon in the power sector implies to overcome several difficulties from now to 2020, as well from an economical point of view as from a technical point of view. The potential of such technologies to reduce CO₂ emissions depends on the real capacities of saline aquifers and unusable coal mines, that are both little known at the time. Taken into account the slow development as well as the uncertainties of this technology, carbon capture and storage may only be a partial solution in the long term. Other policies are needed, such as electricity demand control and the use of more controlled alternatives (renewable energy use, cogeneration).

Introduction

L'activité humaine, notamment la combustion des hydrocarbures fossiles, a entraîné depuis environ un siècle une augmentation extrêmement rapide de la teneur en certains gaz dans l'atmosphère, dont le CO₂ (pour lequel la concentration est passée de 280 à 370 ppm depuis le début de la révolution industrielle). Or les experts s'accordent à dire que cette augmentation de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, due aux émissions anthropiques toujours croissantes, provoque des modifications sensibles ainsi qu'une forte variabilité du climat.

Les scénarios du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) montrent que la teneur en CO₂ dans l'atmosphère pourrait passer de 370 ppm actuellement à plus de 1000 ppm d'ici la fin du siècle, si aucune mesure de réduction n'était mise en œuvre d'ici là. Cette concentration entraînerait des risques considérables de changement climatique.

Malgré les incertitudes qui persistent sur la connaissance et l'évolution du phénomène, les impacts potentiels d'un tel changement climatique sur les écosystèmes et les activités humaines a fait prendre conscience à la communauté internationale de la nécessaire maîtrise des émissions de gaz à effet de serre. Ceci s'est notamment traduit par la signature en 1997 du Protocole de Kyoto prévoyant pour l'ensemble des pays industrialisés signataires une réduction des émissions des 6 gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) de 5,2% sur la période 2008-2012 par rapport à la situation de référence de 1990. Grâce à la ratification de la Russie en novembre 2004, le Protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 février 2005. Les objectifs de réduction prévus par le Protocole de Kyoto ne constituent néanmoins qu'une première étape encore modeste vers une réduction plus significative des émissions mondiales d'au moins 50% à l'horizon 2050. Cette réduction serait en effet nécessaire pour stabiliser la teneur du CO₂ dans l'atmosphère entre 450 et 650 ppm. Compte tenu des perspectives de développement des pays émergents à cette échéance (notamment la Chine et l'Inde), cette exigence de réduction de - 50% des émissions de gaz à effet de serre en 2050 pourrait se renforcer pour les pays développés à - 75%, objectif de plus en plus repris par nombre d'autorités politiques.

Une réduction des émissions mondiales d'une telle ampleur dans un contexte d'accroissement des consommations énergétiques des pays développés et a fortiori des pays en développement nécessite de développer dès à présent tous les outils susceptibles de contribuer à ce résultat.

Au-delà d'une réduction très significative de la consommation (via par exemple l'amélioration de l'efficacité énergétique) qui est la démarche première, et du recours à des combustibles et énergies plus faiblement émettrices de CO₂, l'utilisation d'alternatives aux énergies fossiles présente des limites.

- Le parc de centrales nucléaires peut être étendu, mais il est surtout adapté à la production d'électricité de base. En outre, il nécessite une ou des solutions à grande échelle pour la gestion des déchets.
- Pour une production en pointe, une partie est assurée par l'hydroélectricité. Cependant, la plupart des sites hydroélectriques sont aujourd'hui exploités dans les pays développés et les barrages géants comme celui en cours de développement en Chine ont un impact humain et écologique considérable. C'est pourquoi la croissance de la production électrique de pointe est aujourd'hui envisagée via le développement de centrales au gaz ;
- Le recours à l'énergie éolienne, quant à lui, restera nécessairement limité compte tenu de la faible densité énergétique du vent et de son caractère aléatoire. En effet, au-delà des contraintes d'ordre spatial, cette filière nécessite systématiquement l'installation d'un parc de centrales thermiques d'une puissance équivalente au parc éolien afin de compenser les « creux » de production liés aux chutes imprévisibles du vent.
- De même, la dernière étude CLIP a pu démontrer les limites en France du solaire thermique dans le secteur résidentiel : son développement intensif ne permettrait qu'une contribution de l'ordre de 10% dans le bilan CO₂ du secteur par rapport aux objectifs français de division par 4 des émissions de CO₂ à l'horizon 2050.

Face à la demande toujours grandissante en énergie, qui devra être satisfaite à des coûts acceptables, les énergies fossiles resteront donc très probablement fortement consommées. Des efforts sont par

conséquent dès aujourd'hui nécessaires pour limiter les émissions liées à leur combustion. Outre l'augmentation des puits naturels de carbone tels que les forêts, la capture et le stockage durable de CO₂ dans des formations géologiques sont souvent cités comme une voie prometteuse.

L'objectif de cette étude est donc d'estimer, aux travers de scénarios de développement massif de la capture et de la séquestration géologique, **le potentiel maximal de réduction des émissions de CO₂ dans le secteur de la production d'électricité** et de mettre en évidence les contraintes spatiales et temporelles qu'un tel développement pourrait poser.

En effet, les cartes ci-dessous (figures 1 et 2) révèlent la déconnexion importante entre la répartition géographique des principales sources d'émissions de CO₂ et celle des gisements de pétrole et de gaz, lieux potentiels de stockage¹. Compte-tenu de cette réalité géographique, nous chercherons à évaluer la part des émissions de CO₂ qu'il est possible réellement de stocker dans des champs pétroliers ou gaziers situés à une distance acceptable des sources d'émissions.

La première partie se consacre à la présentation de l'état de l'art technologique des trois principales étapes de séquestration géologique du CO₂ : la capture, le transport et stockage.

Dans le cadre des connaissances technologiques actuelles, un second volet décrit la méthodologie d'élaboration des scénarios de capture et d'estimation des potentiels de stockage dans **les gisements de pétrole et de gaz**, sites les plus connus aujourd'hui.

L'analyse des résultats de potentiels de capture et de stockage géologique fait l'objet de la dernière partie.

Figure 1 : Sources d'émissions de CO₂ d'origine industrielle ou pour la production électrique.

Industrial and power plant CO₂ point sources.

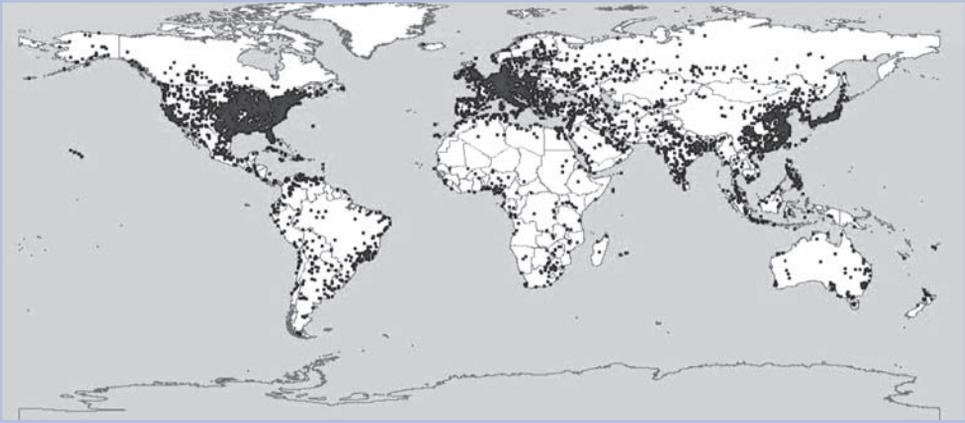
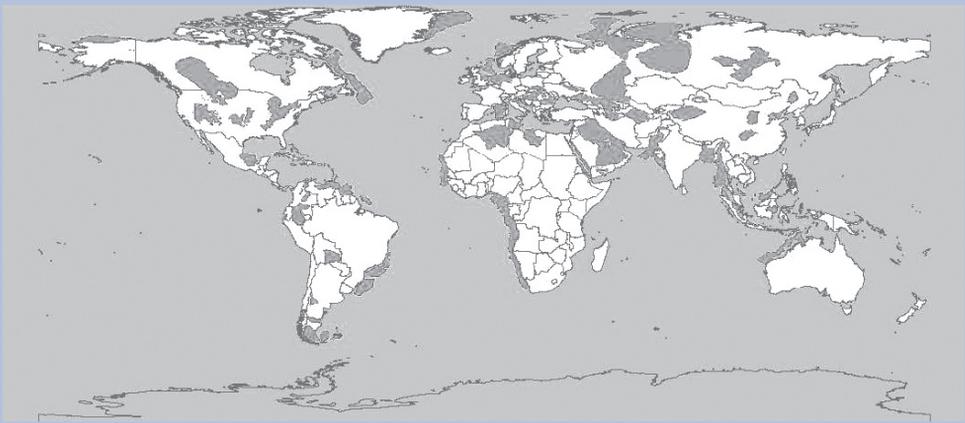


Figure 2 : Gisements de pétrole et gaz. Global oil and gas occurrences.



Etat de l'art

La séquestration géologique du CO₂ comprend trois principales étapes : la capture/compression, le transport et le stockage du CO₂.

Sources de CO₂ concernées par la séquestration géologique

La capture représente la majeure contribution au coût de la séquestration géologique. Or, présentant des coûts d'investissement élevés et soumises aux économies d'échelle, les technologies de capture du CO₂ sont plutôt adaptées aux *larges sources d'émissions localisées*, c'est-à-dire les grandes installations de combustion d'énergies fossiles, telles que les *centrales thermiques ou certaines installations industrielles* comme les raffineries, les cimenteries, la pétrochimie et la production d'engrais.

En 2000, les émissions de CO₂ liées à la combustion d'énergies fossiles s'élevaient au total à 23,4 Gt de CO₂². Elles sont principalement issues des USA, de la Chine, de l'OCDE/Europe et des pays de l'Ex-Union Soviétique dont les parts respectives sont de 25%, 14%, 17% et 9% (Figure 3).

Les principaux secteurs responsables de ce bilan sont la production d'électricité, le transport et l'industrie manufacturière et du bâtiment, avec des parts respectives de 33%, 24% et 19% (Figure 4). Selon l'inventaire récent de l'AIE GHG (Green House Gases)³ et les estimations IFP/Total (pour le secteur pétrolier), les émissions de CO₂ dans le monde issues de l'industrie pétrolière, du ciment, de l'acier et du fer et de l'électricité s'élèvent en 2000 à un total de 12,55 Gt CO₂.

Pour les installations chimiques, le CO₂ est un sous-produit (e.g. production d'hydrogène, d'ammoniac⁴...) parfois valorisé. En sortie de process, la teneur en CO₂ est alors proche de 100% ; le CO₂, déjà concentré, ne nécessite donc pas de capture.

Dans le cas des centrales thermiques, les fumées de combustion ont une teneur faible en CO₂ (environ 15% pour une centrale à charbon et 3 à 10% pour une centrale au gaz naturel) qui nécessite une étape de capture, décrite dans les chapitres qui suivent. Même s'il a déjà été envisagé de s'affranchir de l'étape de capture, étape la plus coûteuse, en trans-

Figure 3 : Répartition géographique des émissions mondiales de CO₂ pour l'année 2000. *World CO₂ emissions by region in 2000.*

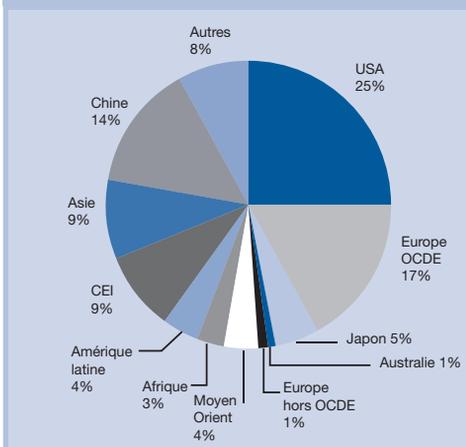
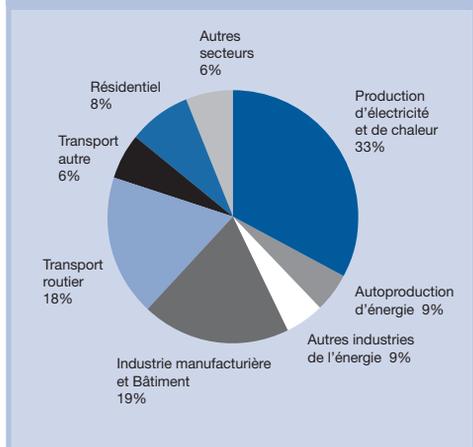


Figure 4 : Répartition sectorielle des émissions mondiales de CO₂ pour l'année 2000. *World CO₂ emissions by economic sector in 2000.*



portant et stockant directement des fumées de combustion, cette solution est aujourd'hui abandonnée pour deux principales raisons :

- Les volumes concernés à comprimer, à transporter et à stocker, seraient multipliés par 7 à 25 par rapport au volume du CO₂ pur. Les volumes de fumées de combustion contiennent de 4 à 15% de CO₂ selon le combustible. Cette solution augmenterait fortement les coûts des infrastructures de compression et de transport, tout en saturant plus rapidement les capacités de stockage),
- Les risques de corrosion liés en particulier à la présence d'eau et d'oxygène.

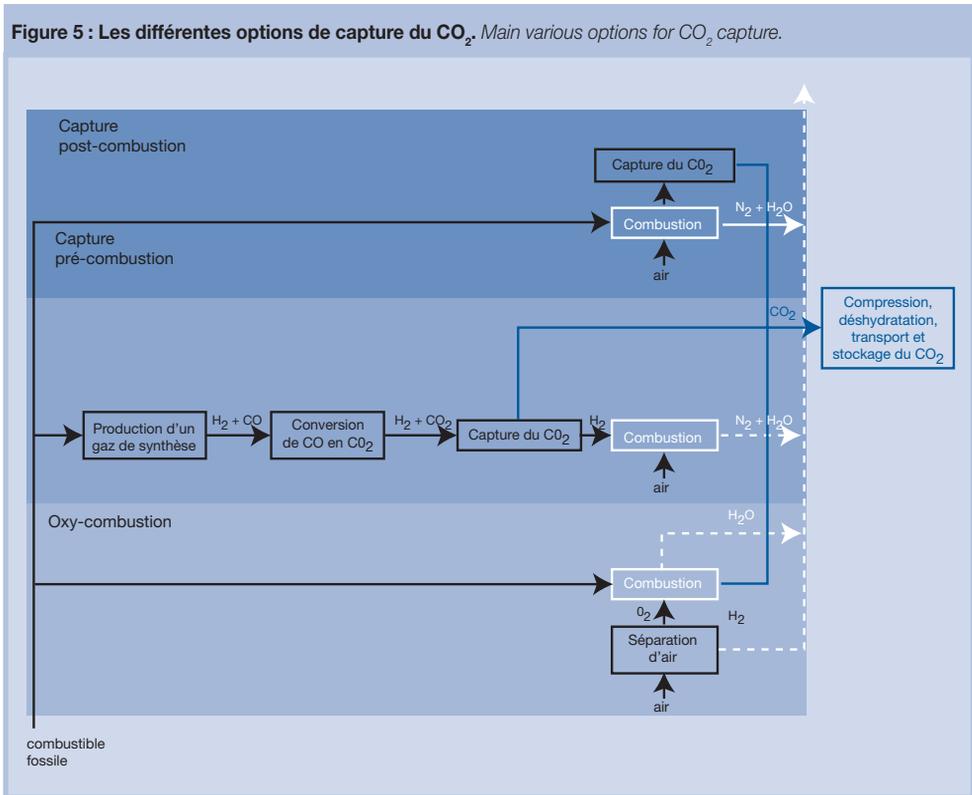
Techniques de capture

La capture du CO₂ des fumées de combustion est une opération qui nécessite des investissements élevés. Représentant 2/3 du coût global de la séquestration, elle concerne en premier lieu des flux de CO₂ importants et concentrés, en particulier ceux issus de la production d'électricité, mais aussi de quelques autres secteurs industriels, comme le raffinage, la pétrochimie et la fabrication du ciment.

Trois stratégies, décrites dans la figure 5 et les chapitres qui suivent, sont envisagées pour piéger le CO₂ issu de la combustion.

- la capture en post-combustion. Bien que coûteuse et consommatrice d'énergie, cette solution possède l'avantage de s'adapter aux installations existantes. Elle est aujourd'hui la technologie la plus maîtrisée, mais des progrès technologiques devraient permettre de l'améliorer encore en diminuant ses coûts et sa consommation énergétique.
- la capture en pré-combustion. Cette technique peu éprouvée, applicable uniquement à des installations neuves adaptées, engendre des consommations d'énergie plus faibles que la capture en post-combustion; il faut toutefois noter que, puisque les consommations énergétiques de la capture en post-combustion sont appelées à diminuer, cet écart devrait se réduire à moyen terme (en particulier pour le gaz et dans une moindre mesure pour le charbon).
- l'oxy-combustion. Cette technologie, encore immature à l'heure actuelle, devrait permettre des gains importants en terme de consommation d'énergie.

Figure 5 : Les différentes options de capture du CO₂. Main various options for CO₂ capture.



Capture en post-combustion

La capture en post-combustion consiste à séparer le CO₂ des fumées de combustion. Cette séparation pourrait en théorie être réalisée de diverses façons (absorption, adsorption, procédés membranaires...). Cependant, pour les centrales thermiques classiques, dont les fumées de combustion présentent une pression et une concentration en CO₂ faibles (4 à 15%), *la technologie la mieux adaptée et la plus éprouvée est l'absorption chimique*, utilisant un solvant tel que la MEA (MonoEthanolAmine). Les autres procédés sont généralement moins éprouvés, moins efficaces en terme d'énergie, et plus chers.

Après avoir absorbé du CO₂, le solvant peut être régénéré par chauffage. C'est principalement cette étape de régénération qui est consommatrice d'énergie. Les pertes énergétiques estimées de la capture en post-combustion par absorption chimique varient entre 15 et 30% pour une unité au gaz naturel, et entre 30 et 60% pour une centrale à charbon⁵, en fonction du procédé de capture et de son intégration.

Les axes d'amélioration (réduction des coûts et meilleure efficacité énergétique) actuellement étudiés sont le développement et l'association de nouvelles technologies (par exemple l'usage de membranes qui faciliterait le contact entre l'effluent gazeux et le solvant), le développement de nouveaux solvants et une meilleure intégration des technologies de capture, qui pourraient diminuer les pertes énergétiques, *jusqu'à environ 20% pour le charbon et 13% pour le gaz*. Ces améliorations envisagées à moyen terme (2012) pourraient permettre de *réduire de 20 à 30% le surcoût lié à la capture du CO₂* pour les nouvelles centrales à charbon ou à gaz, de type classique, avec capture par absorption chimique, de l'ordre de 60 \$ par tonne de CO₂ actuellement ; les coûts passeraient à 40 à 50 \$ par tonne de CO₂ à l'horizon 2012⁶.

Les technologies de capture en post-combustion ont l'avantage d'être adaptées aux installations existantes. Cependant, pour les nouvelles installations, d'autres options de capture sont envisagées, telles que la capture en pré-combustion et l'oxy-combustion, qui présentent des coûts par tonne de CO₂ capturée moins élevés.

Capture en pré-combustion

La capture en pré-combustion est une technologie émergente qui consiste à transformer un combustible fossile en hydrogène par :

- un reformage à la vapeur ou une oxydation partielle à l'oxygène (production d'un gaz de synthèse contenant de l'hydrogène et du CO),

- puis une conversion du CO en CO₂

(CO + H₂O → CO₂ + H₂),

- et une capture du CO₂.

L'hydrogène peut alors être utilisé pour produire de l'énergie sans émission de CO₂⁷. Cependant, des améliorations sont encore nécessaires, notamment le développement d'une turbine à gaz adaptée à la combustion d'hydrogène.

Il faut remarquer que le procédé IGCC (Integrated Gasification Combined-Cycle) qui se base sur la gazéification du combustible, première étape de la capture en pré-combustion, est une technologie aujourd'hui maîtrisée. Elle est depuis peu commercialisée dans le secteur de la production d'électricité à partir de charbon.

Une capture en pré-combustion se fera préférentiellement par absorption physique, technique la mieux adaptée aux conditions de sortie du gaz de synthèse issu du reformage (concentration du CO₂ plus élevée : 35% à 40%; et une pression supérieure à 20 bar).

Cette voie de capture est moins énergivore que la capture en post-combustion par absorbant chimique : *les pertes d'énergie sont d'environ 15%*⁸ et le surcoût lié à la capture, estimé actuellement pour une centrale IGCC à environ 40 \$ par tonne de CO₂⁹, devrait atteindre sur le moyen terme 30 \$ par tonne de CO₂¹⁰.

Oxy-combustion

L'oxy-combustion consiste à séparer l'oxygène de l'air et à réaliser une combustion à l'oxygène. Une partie des fumées est recyclée afin de concentrer le CO₂ (jusqu'à 90%). Cette technologie permet une efficacité thermique améliorée et une réduction de la taille des équipements, notamment par l'utilisation d'un flux de CO₂ très concentré. Cependant, l'étape de production d'oxygène par séparation d'air est très coûteuse¹¹, et des difficultés techniques subsistent (recirculation des fumées, températures plus élevées résultant de la combustion à l'oxygène).

Pour éviter le coût de séparation de l'oxygène de l'air, une technologie prometteuse est envisagée : le « Chemical Looping » (Figure 6), qui consiste à utiliser un oxyde métallique pour transporter l'oxygène de l'air vers le combustible. Il n'y a alors aucun contact direct air/combustible et les produits de combustion (eau + CO₂) ne sont pas mélangés aux autres effluents gazeux (N₂, O₂ restant). Cette technologie repose sur l'association de deux réacteurs à lit fluidisé : l'un où l'oxyde métallique est réduit en libérant de l'oxygène par

réaction avec le combustible, l'autre où l'oxyde métallique réduit est oxydé par l'air. Il n'existe actuellement qu'une unité pilote de 10 kW, à l'Université de Chalmers en Suède.

Energie consommée par la capture

Comme décrit précédemment, la capture du CO₂ nécessite une consommation énergétique importante, essentiellement due à la régénération du solvant d'absorption (environ 1,2 kWh par kg de CO₂ actuellement) et à la compression du CO₂ (0,1 kWh par kg de CO₂¹³).

Il est donc nécessaire de distinguer le « CO₂ capturé » du « CO₂ évité » comme illustré par la Figure 7. L'énergie consommée par la capture du CO₂ peut

être exprimée sous deux formes différentes, suivant le cas de base considéré entre la situation avec capture et celle sans capture.

- **La consommation énergétique est la même en entrée.** Le cas d'une centrale avec capture génère en sortie une production d'électricité plus faible par rapport à la référence sans capture. Cette différence est exprimée sous forme de « pertes énergétiques ».

- **La puissance en sortie est la même.** Le cas d'une centrale avec capture entraîne des besoins en combustibles plus importants par rapport à la référence sans capture. Cette différence est exprimée sous forme de « sur-consommation énergétique ».

Figure 6 : Principe d'un procédé Chemical Looping¹². *Chemical Looping process principle.*

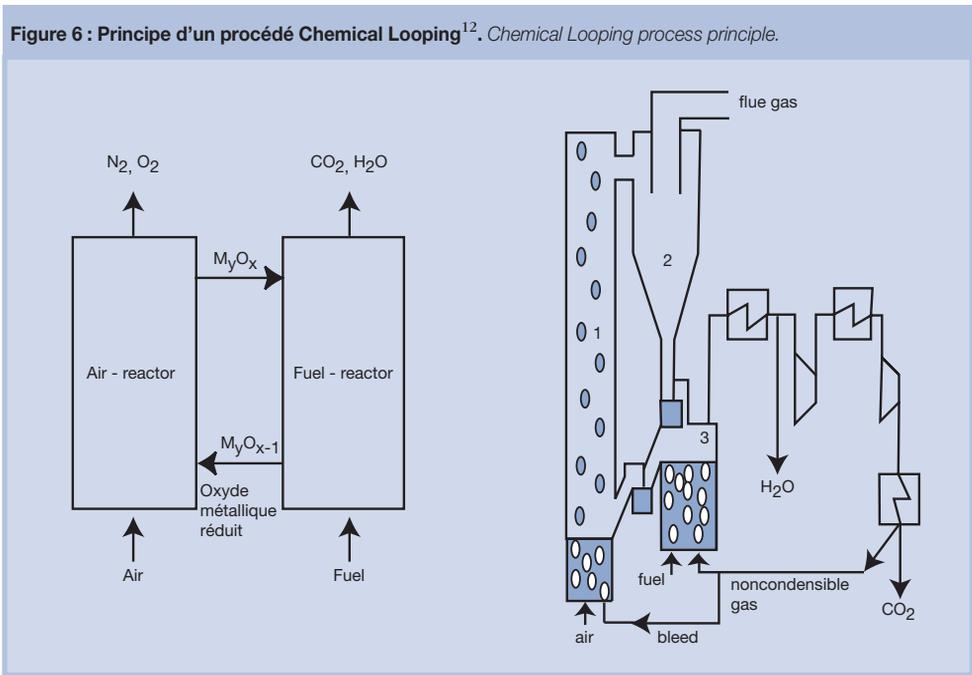
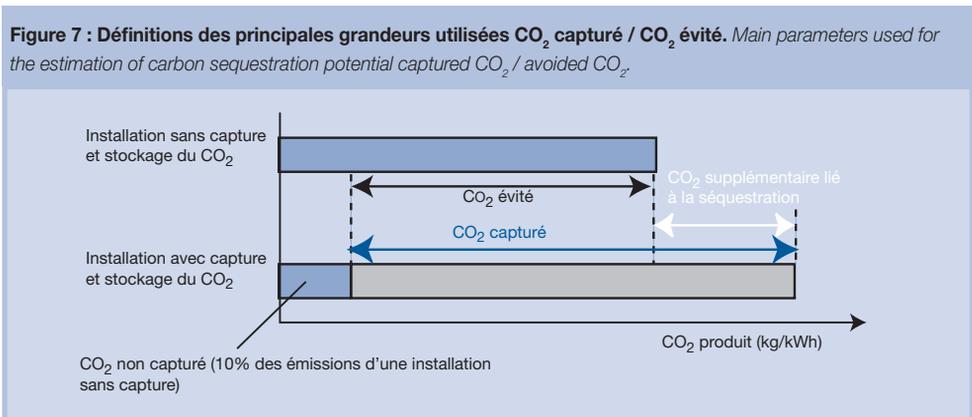


Figure 7 : Définitions des principales grandeurs utilisées CO₂ capturé / CO₂ évité. *Main parameters used for the estimation of carbon sequestration potential captured CO₂ / avoided CO₂.*



Ainsi, les 1,2 kWh/kg de CO₂ nécessaires à la capture post-combustion (1,1 kWh/kg pour la régénération du solvant¹⁴ et 0,1 kWh/kg pour la compression) équivalent :

- à des pertes énergétiques de 47% dans le cas du charbon, soit une sur-consommation énergétique de 89%,
- à des pertes énergétiques de 30% dans le cas du gaz, soit une sur-consommation énergétique de 43%.

Si les objectifs de R&D de division par deux de la consommation énergétique de régénération du solvant (projet européen CASTOR) sont atteints, ces pertes s'élèveraient sur le moyen terme à :

- 20% dans le cas du charbon, soit une *sur-consommation de combustible de 25%*,
- 13% dans le cas du gaz, soit une *sur-consommation de combustible de 15%*.

Dans le cas de l'IGCC, les pertes énergétiques dues à la capture du CO₂ sont d'environ 15%, ce qui correspond à une **sur-consommation de combustible de 18%**.

Le Tableau 1 récapitule les consommations énergétiques liées à la capture du CO₂ par absorption, en termes de pertes énergétiques et de sur-consommation, pour des centrales à cycle combiné au gaz naturel, à charbon pulvérisé et IGCC charbon (gazéification du charbon + cycle combiné).

Transport

Le transport du CO₂ du lieu de capture vers celui de stockage peut se faire par canalisations sous forme dense (état supercritique) ou par navire sous forme liquide¹⁵ (les volumes de gaz à transporter excluent le transport par camion et train).

Transport par canalisations

Généralités

Le CO₂ est transporté par canalisations sous sa forme supercritique. Il atteint cet état pour une pression supérieure à 73 bars. Au-delà de cette pression, quelle que soit la température, si elle est supérieure à -56°C, le gaz ne rencontre jamais de phase liquide/vapeur, ce qui le rend idéal pour le transport par canalisation sensible à ce phénomène. Sous cette forme à 20°C le CO₂ possède une densité d'environ 0,8. Cependant des variations de température peuvent significativement changer cette densité. Le CO₂ à l'état supercritique possède également les qualités d'un liquide et nécessite donc peu d'énergie pour ses étapes de recompression lors de son transport. Selon Skovholt (1993), il est nécessaire de disposer d'une station de recompression tous les 100 à 250 km (en fonction du diamètre de canalisation¹⁶). Un ordre de grandeur typique de la puissance d'une station de recompression est 750 kW¹⁶ (pour une canalisation de diamètre 500 mm, soit un débit de 5 à 6 Mt de CO₂ par an). Mais l'essentiel du coût énergétique du transport a lieu lors de la première étape de compression.

Déjà largement utilisé aux Etats-Unis (pour transporter, dans la plupart des cas, du CO₂ issu de gisements naturels vers des champs de pétrole afin d'en améliorer la récupération), le transport par canalisation apparaît comme la solution la plus raisonnable dans les conditions technico-économiques actuelles (Figure 8). Aujourd'hui, environ 3000 kilomètres de canalisations existent dans le monde, la plupart étant située en Amérique du Nord¹⁷.

Tableau 1 : Pertes énergétiques et sur-consommation. *Energy losses and overconsumption.*

		Si la consommation en entrée est la même avec ou sans capture		Si la puissance en sortie est la même avec ou sans capture	
		Pertes énergétiques		Sur-consommation	
		Actuellement	Espérées à moyen terme	Actuellement	Espérée à moyen terme
Capture post-combustion, Absorption chimique ¹⁵	Gaz NGCC	30 %	13 %	43 %	15 %
	Charbon pulvérisé	47 %	20 %	89 %	25 %
Capture pré-combustion, Absorption physique	Charbon IGCC		15 %		18 %

Remarque : le concept de capture pré-combustion sur une centrale NGCC peut également être envisagé. Le principe est alors le même que pour l'IGCC. Les performances énergétiques espérées à moyen terme seraient équivalentes au cas NGCC avec capture en post-combustion.

Coûts

La majeure partie du coût de transport par canalisations est attribuée aux investissements d'infrastructure, qui dépendent essentiellement du diamètre interne de la canalisation, donc du débit de CO₂, de l'épaisseur, de la longueur et du milieu traversé et, dans le cas d'une canalisation off-shore, de la profondeur d'eau. Le coût d'investissement d'une canalisation off-shore peut atteindre 3 fois celui d'une canalisation on-shore¹⁸, selon la profondeur. Les estimations de ce coût varient *entre 1 – 2 et 7 – 8 \$ par tonne de CO₂ et par 100 km.*

Transport par navire

Dans le cas du transport maritime, mode plus flexible que le gazoduc, le CO₂ est transporté à l'état liquide dans des navires de transport de GPL, à basse température (<-56°C) et pression modérée (> 5 bars).

Des navires sont déjà utilisés pour le transport maritime de CO₂¹⁹. Destinés à transporter du CO₂ à usage alimentaire (e.g. dans les boissons gazeuses), ils sont de taille modérée. Etant donné les quantités mises en jeu dans la filière de capture et de séquestration, des navires de capacité beaucoup plus importante devront être développés.

Coûts

Le coût de transport directement lié au navire est estimé à environ 2 \$/t de CO₂²⁰, mais cette valeur ne comprend ni la liquéfaction, ni les installations portuaires (stockage, injection). Le coût global du transport de CO₂ par navire, incluant le coût des installations portuaires, de la plate-forme et de la canalisation verticale d'injection varie entre 15 et 23 \$ par tonne de CO₂²¹.

Influence de la distance de transport

A priori, le coût du transport de CO₂ par navire varierait peu avec la distance de transport. Avec des hypothèses de consommation de fuel fixée à 8 tonnes par jour correspondant à un GPLier (Flatseth, 2002) et de prix du fuel à 130 euros par tonne, le coût du carburant (pour un navire de 38 000 m³) représente *environ 5% du coût total du transport par navire.*

Emissions de CO2

Les émissions générées par le transport par navire du CO₂ représenteraient environ 9 000 tonnes de CO₂ par an²², soit *moins de 1% de la quantité transportée* (par exemple, 0,1% pour un navire de 38 000 m³ et 0,3% pour un navire de 10 000 m³).

Figure 8 : Le transport de CO₂ aux Etats-Unis (principalement de gisements naturels vers des champs de pétrole, pour des opérations de récupération assistée). CO₂ transport in the USA (mainly from natural sources to oil fields, for enhanced oil recovery).



Comparaison des coûts de transport par canalisation et par navire

La comparaison des coûts de transport par canalisations et par navire (figure 9) en fonction de la distance parcourue met en évidence le seuil kilométrique à partir duquel le transport par navire devient économiquement plus attractif. Ce seuil s'élève à environ 500 km.

Stockage

Après sa capture et son transport, il est nécessaire de pouvoir stocker le CO₂ suffisamment longtemps pour réduire le pic de concentration de CO₂ dans l'atmosphère prévu dans les cent prochaines années.

Dans ce contexte, le stockage géologique du CO₂ qui s'appuie sur l'existence de gisements naturels qui ont contenu de manière étanche du gaz, et ce depuis plusieurs millions d'années, apparaît comme une solution prometteuse.

La ré-injection dans des formations souterraines appropriées n'est pas une technique nouvelle : depuis plus de 80 ans, l'industrie gazière utilise couramment cette technologie pour stocker provisoirement du gaz naturel afin de répondre aux besoins d'une consommation irrégulière avec des pics saisonniers incompatibles avec le mode de distribution par gazoduc peu flexible. Près de 500 stockages sous-terrains temporaires existent aujourd'hui de part le monde. Des réservoirs de

différents types sont utilisés : réservoirs d'hydrocarbures en fin de vie, aquifères profonds, cavités salines. Il est donc raisonnable d'envisager d'utiliser les mêmes procédés pour stocker du CO₂ de manière pérenne.

Un objectif souvent avancé de stockage de CO₂ est de quelques centaines à plusieurs milliers d'années, valeur bien en deçà des durées d'étanchéité géologiques des gisements naturels de CO₂ et d'hydrocarbures qui est de plusieurs millions d'années.

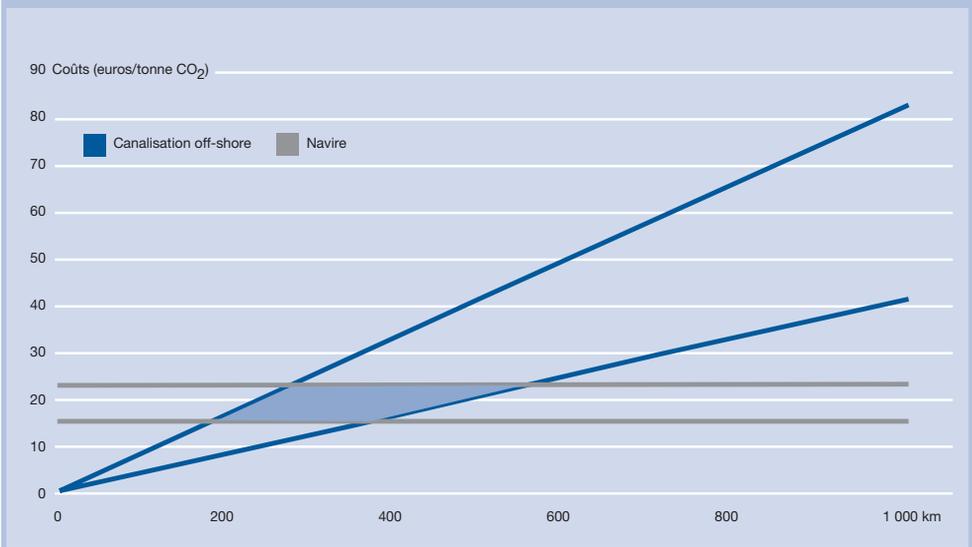
Principales voies de stockage géologique du CO₂

Trois principaux types de formation géologique sont envisagés pour stocker du CO₂ : les réservoirs de pétrole ou de gaz naturel en fin de vie, les aquifères salins et les veines de charbon non exploitables.

Stockage en réservoirs déplétés d'hydrocarbures

L'injection du CO₂ dans les gisements de pétrole et de gaz est certainement la voie de stockage géologique la plus maîtrisée et la plus économique à l'heure actuelle. L'industrie pétrolière stocke déjà indirectement du CO₂ dans des formations souterraines depuis plusieurs décennies. Aux États-Unis en particulier, un mode de récupération assistée d'hydrocarbures par l'injection de CO₂ (Enhance Oil Recovery = EOR) est assez répandu sur de nombreux champs matures :

Figure 9 : Comparaison des coûts de transport par canalisation et par navire. *Comparison between costs of transport by pipe and by ship.*



188 000 b/jour ont été produits par injection de CO₂ aux USA en 2000. La particularité du CO₂ est de réduire notablement la viscosité du pétrole en place ce qui améliore sa mobilité et donc sa récupération. L'injection du CO₂ se fait en général lors de la phase de déclin de la production de pétrole. C'est en effet sur cette période que la récupération améliorée de pétrole présente un intérêt économique. Des quantités considérables ont ainsi été stockées sous terre. Cependant le stockage du CO₂ ne constituant pas l'objectif premier, peu de données ou de bilans sont disponibles concernant les phénomènes de piégeage et de circulation potentielle du CO₂ vers la surface.

Au delà de l'éventuelle récupération de pétrole additionnel, l'intérêt économique de l'injection de CO₂ dans les champs de pétrole et de gaz est également de pouvoir bénéficier à la fois :

- des connaissances géologiques du réservoir acquises au cours de la production d'un champ
- et des infrastructures (puits producteur injecteur, canalisations...) déjà mises en place, si l'injection intervient dans un laps de temps minimum après la fin de vie du champ.

Stockage en aquifères salins

Les aquifères salins sont nombreux ; ils sont constitués de couches sédimentaires poreuses contenant de l'eau très salée. Ils ne peuvent pas constituer des sources d'eau utilisables pour la consommation humaine ou l'agriculture, à cause de leur profondeur et de leur teneur en sels. Ainsi, lorsqu'ils sont assez profonds et qu'ils présentent une structure fermée (identique à celle d'un gisement d'hydrocarbures), ils pourraient servir de réservoirs de stockage de CO₂. Ils constitueraient un potentiel important en terme de capacité de stockage.

Toutefois, ces réservoirs sont très mal connus car, n'offrant aucune ressource particulière, ils n'ont quasiment pas été étudiés. Un effort de caractérisation important devra être mené afin de qualifier de tels sites pour le stockage géologique.

Stockage en veines de charbon

Il est envisageable d'injecter du CO₂ dans des veines de charbon non exploitables, car trop profondes. Pour autant que le charbon ne soit jamais extrait, le gaz carbonique serait ainsi piégé pendant de nombreuses années. Dans ce cas, le CO₂ n'est pas emprisonné dans un réservoir

confiné (tel qu'un gisement de pétrole ou de gaz), mais est adsorbé par le charbon dans des concentrations volumiques élevées. De plus cette technique pourrait permettre dans certains cas de rendre la filière économiquement intéressante par l'extraction des quantités de méthane naturellement présentes dans le charbon.

Le paramètre clé de ce type de stockage qui pourrait constituer un frein pour le stockage du CO₂ est certainement la perméabilité de ce type de formation. Elle est en général très faible comparée aux roches réservoir des gisements d'hydrocarbures et des aquifères plus adaptées au stockage du CO₂.

N'ayant jamais présenté d'intérêt jusqu'à aujourd'hui, les caractéristiques des veines de charbon inexploitablees sont mal connues, tout comme celles des aquifères salins profonds. Les connaissances faibles de ces sites ne permettent pas d'avoir une visibilité claire sur le potentiel de la filière.

Sites d'injection de CO₂ existants ou en projet

Différents sites de démonstration de séquestration injectent déjà du CO₂ : Sleipner et K12b en Mer du Nord, Weyburn au Canada, Frio Brine aux États-Unis, In Salah en Algérie. D'autres opérations devraient commencer très prochainement : Ketzin (Allemagne), Lindach (Autriche), Casablanca (Espagne), Gorgon (Australie), et Snøhvit (Mer de Barents).

• Sleipner

A Sleipner²³, dans le cadre du programme SACS (Saline Aquifer CO₂ Storage) et depuis 1996, du CO₂ est extrait d'un flux de gaz naturel, puis comprimé et réinjecté dans un aquifère salin proche, à 1000 mètres de profondeur ; toutes ces opérations sont réalisées en off-shore. La quantité injectée est d'un million de tonnes de CO₂ par an.

• Weyburn

Le champ pétrolifère on-shore de Weyburn au Canada, découvert en 1954, a produit environ 350 millions de barils de pétrole au moyen des méthodes de production primaires et secondaires. Depuis octobre 2000, du CO₂ est injecté dans le but de récupérer à terme environ 120 millions de barils de pétrole supplémentaires. Le stockage associé s'élèverait à près de 14 millions de tonnes de CO₂. Celui-ci provient d'une usine située dans le Dakota du Nord, à raison d'environ 5 000 tonnes par jour. Il est transporté vers Weyburn grâce à un pipeline d'une longueur de 323 kilomètres.

- K12b

Un gisement de gaz off-shore en fin d'exploitation, situé en Mer du Nord et exploité par Gaz de France Production Nederland B.V. produit un gaz naturel à forte teneur en CO₂. Ce gaz naturel est traité afin d'abaisser sa concentration en CO₂ et jusqu'à maintenant, le CO₂ capturé était rejeté à l'atmosphère. Le but du projet est de réinjecter ce CO₂ dans le réservoir de gaz pour le stocker. Une étape de démonstration à petite échelle a commencé en 2004 et devrait être suivie d'une étape de démonstration à grande échelle.

- Snøhvit

Statoil est à l'origine d'un projet de stockage souterrain de CO₂, issu du traitement du gaz naturel, du gisement de Snøhvit en Mer de Barents. Le projet commencera à partir de 2006 : le gaz naturel produit sera envoyé par pipeline vers des installations on-shore où il sera transformé en GNL. Le CO₂ capturé sera alors renvoyé vers Snøhvit, par une autre canalisation, où il sera injecté dans un aquifère situé sous le gisement de gaz naturel ; 0,7 million de tonnes de CO₂ devraient être ainsi stockées chaque année.

acceptabilité du point de vue du grand public sont encore incertains. Pour être acceptée comme solution de réduction des changements climatiques, la séquestration du CO₂ doit être étudiée et présentée selon une approche globale, en tant que contribution à une gestion durable de l'énergie. D'une manière générale, pour que de tels projets soit acceptés par le public et les autorités, il faudra démontrer que les risques potentiels de fuite significative comportant un danger pour les populations sont très réduits et que l'étanchéité du stockage est suffisante sur le très long terme pour que l'impact positif sur le climat soit avéré. Pour cela, des méthodes de certification sécurité/environnement et d'efficacité de stockage sur le long terme du CO₂ restent à développer.

Enjeux de la séquestration géologique

La séquestration géologique du CO₂ constitue une option de limitation des changements climatiques. Cependant, elle ne pourra se développer que si elle surmonte différents défis.

- **économiques** : avec des coûts d'investissement et opératoires conséquents (incompatibles avec les prix escomptés du marché du CO₂, soit entre 10 et 20 /t de CO₂), accompagnés de bénéfices potentiels limités (récupération assistée d'hydrocarbures), la séquestration du CO₂ ne pourra se développer que si ses coûts diminuent, en particulier ceux de la capture.

- **réglementaires** : la législation actuelle ne semble pas adaptée au concept de séquestration du CO₂²⁴. En effet, le statut du CO₂ est mal défini (est-ce un déchet ou un produit ?), tout comme celui de la réduction des émissions de CO₂, qui est différente d'une activité de production à une autre. L'évolution de la réglementation devrait donc jouer un rôle essentiel dans le développement de la séquestration du CO₂, en particulier concernant le contrôle des émissions et des activités de séquestration, avec éventuellement la définition de responsabilités dans la pérennité de la séquestration.

- **acceptation et soutien** : le soutien que la séquestration géologique peut espérer recevoir des industriels et des gouvernements, ainsi que son

Hypothèses et Méthodologie

Scénario de Capture

Le scénario énergétique de référence

En concordance avec l'étude sur la séquestration biologique, le scénario B1 du GIEC a été retenu comme scénario de référence pour la production d'électricité mondiale à l'horizon 2050. Il se base sur une croissance continue de la mondialisation et de l'économie avec une intégration des aspects environnementaux et sociaux. Ces aspects se traduisent par une évolution vers un fonctionnement équilibré et de plus en plus modernisé. Le monde auquel se réfère le scénario B1 est modeste et décent : bureaucratique, régulé, mais également à la recherche de l'équité et du développement durable. Le bilan de la demande en énergie primaire du scénario B1 est donné par le tableau 2⁵.

Sur la période 2000-2050, la demande en énergie primaire est multipliée par 2. En effet, sur cette période les gains apportés par les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique ne permettent pas de compenser la croissance de la population (+40%) et la croissance économique des pays émergents.

Sur la seconde période 2050-2100, ces efforts énergétiques continus portent leurs fruits (-24%) avec une population en phase de décroissance.

Tableau 2 : Demande en énergie primaire du scénario énergétique B1 de référence. *Primary energy demand from the B1 energy reference scenario.*

Gtep	Scénario B1		
	2000	2050	2100
Charbon	2,1	2,8	1,3
Pétrole	3,7	5,7	1,5
Gaz naturel	2,0	6,4	4,2
Biocarburants modernes	0,0	1,3	2,2
Biocarburants traditionnels	1,2	1,0	0,6
Electricité d'origine non thermique	0,2	1,1	4,1
Hydroélectricité	0,3	0,5	0,6
Total	9,5	18,9	14,4

Figure 10 - Régions du modèle IMAGE - IMAGE regions



Les régions étudiées

Les régions étudiées correspondent à celles du modèle IMAGE, soit 17 régions au total réparties comme indiqué dans la figure 10.

Le modèle IMAGE²⁵ a été implémenté pour des scénarios d'évolution du monde correspondant aux scénarios proposés par l'équipe du SRES²⁶.

Le parc de production d'électricité

L'évolution de la production d'électricité

Une première étape consiste à initialiser la production mondiale d'électricité pour chaque pays en 2000 avec les données issues de ENERDATA. Pour chaque région, l'évolution de cette production d'électricité est calculée à partir de la croissance de la consommation d'électricité (la production d'électricité n'étant pas disponible dans la base de données IMAGE des scénarios du GIEC²⁶) et de la répartition de la production d'électricité issues du scénario énergétique B1.

Les résultats compilés au niveau mondial sont illustrés par les figures 11 à 13.

Entre 2000 et 2050 la production d'électricité est

multipliée par 4 pour atteindre 60 000 TWh. Cette croissance est principalement attribuée aux pays émergents, notamment la Chine et l'Inde, qui en absorbent plus de 80% sur la même période.

Identification des nouvelles centrales électriques installées au cours du temps

La partie décrivant des systèmes de capture a mis en évidence un écart important de performances entre l'application de la technologie sur une centrale thermique existante et celle sur une centrale thermique neuve. Il est donc nécessaire pour l'élaboration des scénarios de capture de pouvoir distinguer les centrales existantes des nouvelles installées chaque année. Les différentes hypothèses permettant cette distinction ainsi que les résultats sont traités dans les chapitres qui suivent.

Hypothèses générales

L'identification des centrales électriques installées chaque année reposent sur deux principales hypothèses:

- la durée de vie d'une centrale thermique est fixée à 40 ans ;

Figure 11 : Répartition de la production mondiale d'électricité par source. *World electricity production by source.*

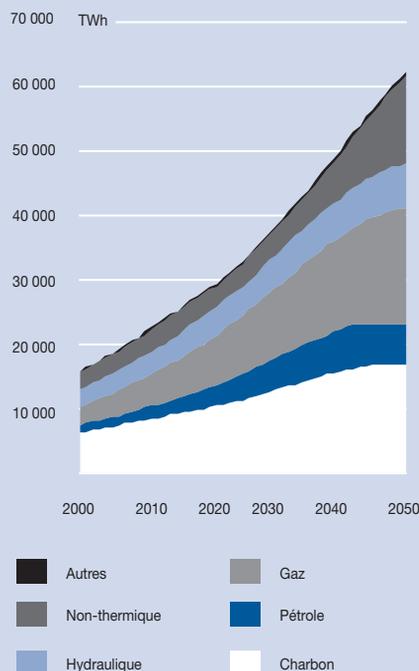
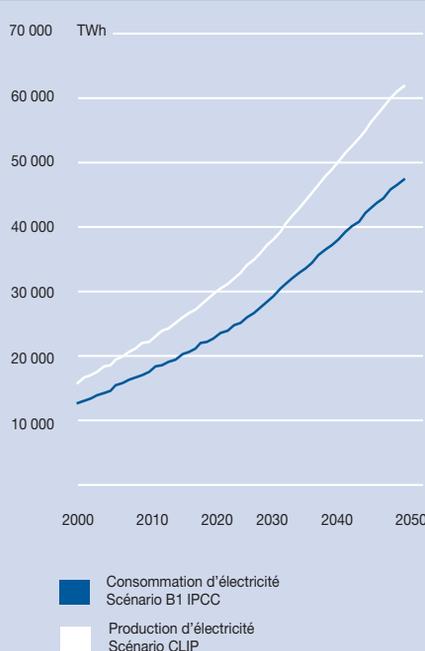


Figure 12 : Scénario d'évolution de la production d'électricité dans le monde. *World electricity production evolution scenario.*



• la croissance d'une année sur l'autre de la production d'électricité d'origine fossile est assurée par l'installation de nouvelles centrales thermiques. Ceci implique l'hypothèse forte suivante : les centrales déjà installées gardent un temps de fonctionnement annuel stable tout au long de leur vie et n'assurent pas une partie de la croissance de la demande en électricité.

Le parc électrique existant en 2000

Le taux de renouvellement du parc existant en 2000 est calculé à partir de la base de données de l'IEA GHG²⁷. Cette base recense une grande partie des centrales thermiques existantes en 2000 pour chaque pays, donnant leur âge, leur puissance et leur production d'électricité.

Lorsque les données ne sont pas représentatives

Figure 13 : Production mondiale d'électricité en 2000. *World electricity production in 2000.*

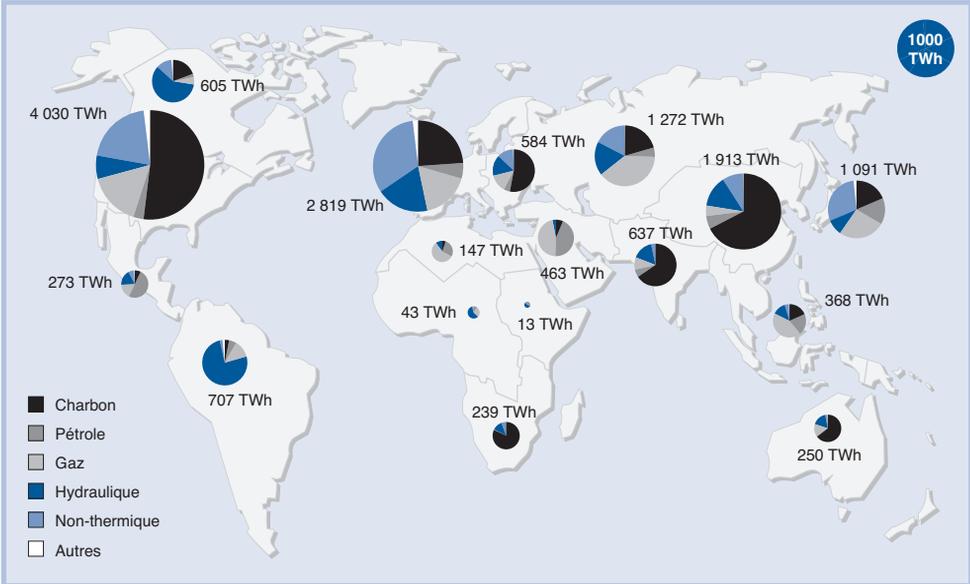
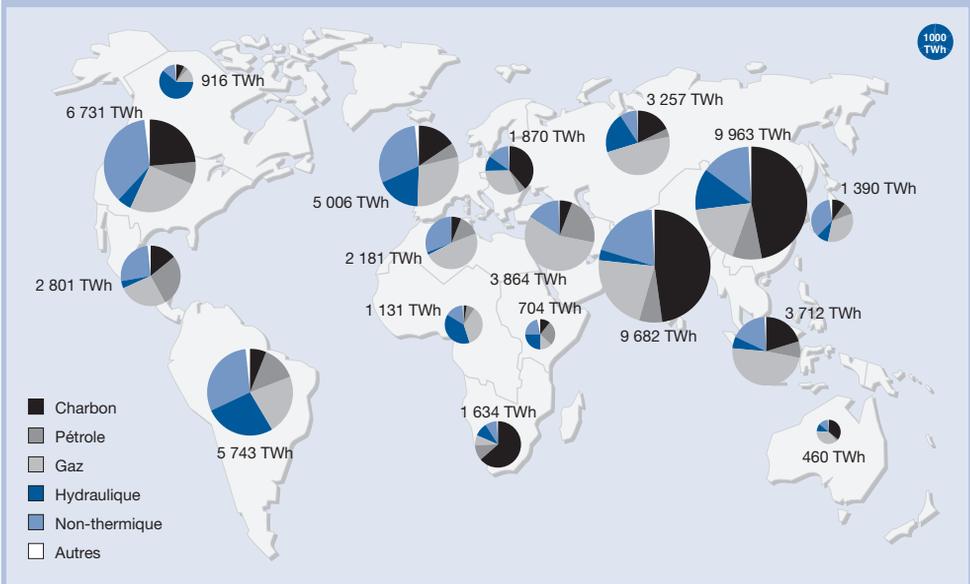


Figure 14 : Production mondiale d'électricité en 2050. *World electricity production in 2050.*



pour un pays, c'est-à-dire lorsqu'elles ne couvrent pas 80% de la production d'électricité thermique du pays, le taux de renouvellement de ces centrales est modélisé à l'aide de la loi normale pour un âge moyen du parc de centrales correspondant à celui de la région et un écart type de 5 ans.

Résultats

Les résultats obtenus par cette méthodologie sont illustrés par la figure 15. Le premier pic observé en 2019 correspond à un renouvellement important des centrales installées dans les années 80 dans les pays de l'OCDE. Le pic de 2040, correspond principalement au renouvellement du parc de centrales de la Chine, dont l'âge moyen est de 6 ans en 2000.

Les scénarios de capture
Pénétration de la capture

La date de début de pénétration des équipements de capture est fixée à 2020, date planifiée par les pays de l'OCDE, notamment, les USA²⁸, l'Europe²⁹ et le Japon. A partir de cette date les taux d'équipement différent suivant le type de centrale :

- pour les installations neuves, un taux d'équipement de 100% est choisi ;
- pour les installations existantes d'âge inférieur ou égal à 30 ans, un taux d'équipement de 10% par an est appliqué.

Ces hypothèses supposent que les investissements nécessaires à une pénétration massive des techniques de capture ne constituent pas un frein.

Hypothèses technico-économiques

L'étude économique qui suit est une première étape nécessaire à l'élaboration des scénarios de capture. Elle a pour principaux objectifs de définir :

- les critères économiques du seuil d'équipement d'un poste de capture d'une centrale électrique,
- les critères techniques (consommation d'énergie, efficacité de capture ...) en fonction du type de la centrale.

Seuil de puissance

Les données économiques disponibles correspondent généralement à des centrales de puissance 500 MW (sans capture). Une centrale classique au charbon de 500 MW avec rendement électrique de 30% produit 4,9 millions de tonnes de CO₂ par an ; les coûts d'investissement engendrés par l'installation d'un système de capture (post-combustion, par absorption aux amines) sont estimés à 800 – 900 euros/kW³⁰, ce qui correspond à environ 40 euros par tonne de CO₂ évité.

Une centrale au gaz de puissance 500 MW avec un rendement de 50% produit 1,9 million de tonnes de CO₂ par an. L'investissement lié à la capture (en post-combustion) est de 400 à 600 euros/kW³¹, ce qui correspond à environ 60 euros par tonne de CO₂ évité.

Figure 15 : Installations annuelles de nouvelles centrales thermiques (TWh) dans le monde. World annual new power plant (TWh).

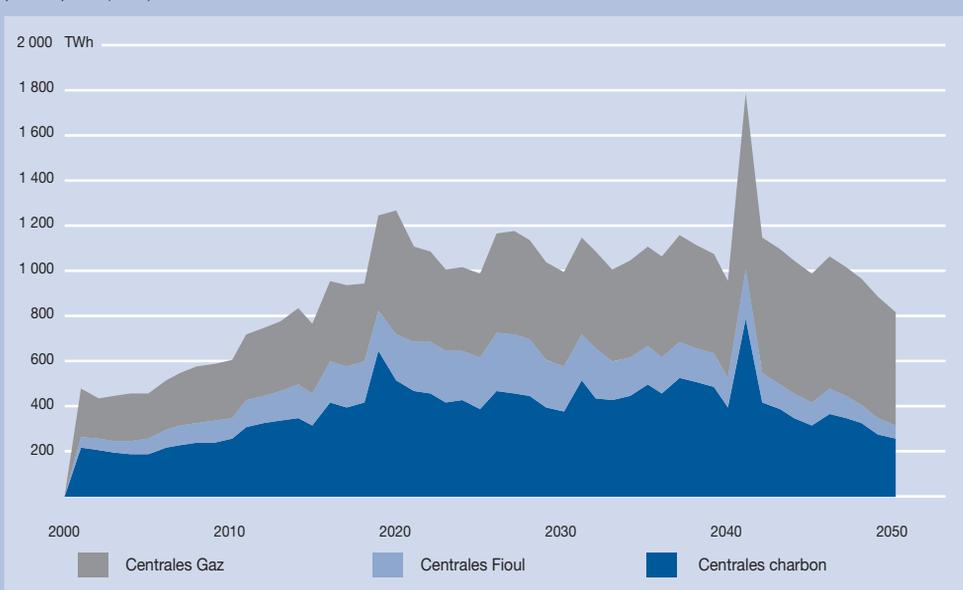


Tableau 3 : Coûts de capture. *Capture costs.* - Source : calcul Gaz de France

Centrale classique	Puissance (sans capture)	Production de CO ₂	Investissement	Surcoût	
				€/ t CO ₂ évité	c€/ kWh
Charbon	500 MW	4.900.000 t CO ₂ /an	800 – 900 €/kW	40	4,4
Gaz	500 MW	1.900.000 t CO ₂ /an	400 – 600 €/kW	55 – 60	2,5

Tableau 4 : Surcoût de la capture à l'horizon 2020 (source IEA).

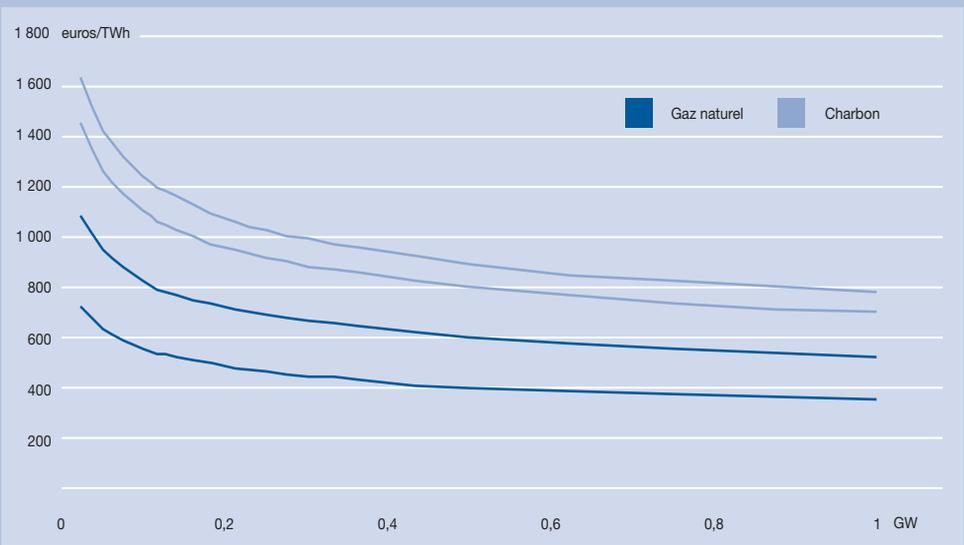
	Coûts sans capture (c\$/kWh)	Coûts avec capture (c\$/kWh)	Surcoût de la capture
IGCC capture pré-combustion	3,30	4,10	+ 24%
PC capture post-combustion	2,92	4,63	+ 59%
NGCC capture post-combustion	2,62	3,68	+ 46%
NGCC capture pré-combustion	2,52	3,48	+ 38%

Les surcoûts de capture présentés dans le Tableau 3 sont des estimations correspondant à la situation actuelle. Un rapport de l'IEA, « Prospects for CO₂ capture and storage », présente des valeurs possibles à l'horizon 2020. Ces valeurs sont rappelées à titre indicatif dans le tableau 4. Les coûts d'investissement sont représentés sur la figure 16 pour d'autres puissances. A noter que ces données ne proviennent pas d'installations existantes mais d'un calcul théorique basé sur un ratio classique d'économie d'échelle.

Ces résultats montrent clairement qu'en deçà d'une puissance installée de 200 MW, les coûts d'investissement de la capture augmentent très fortement.

Ce seuil est choisi comme critère de sélection pour l'équipement des centrales électriques. Les pourcentages de centrales thermiques de capacité supérieure à 200 MW par pays et par région permettant cette sélection sont issus de la base de données AIEGHG²⁷.

Figure 16 : Coûts d'investissement d'un équipement de capture en fonction de la puissance. *Investments costs for capture as a function of power.*



Seuil en temps de fonctionnement

Un autre facteur à prendre en compte est le temps de fonctionnement des centrales, qui a un fort impact sur le surcoût (par tonne de CO₂ et par kWh produit) lié à la capture, comme le montrent les figures 17 et 18. Au vu de ces résultats le seuil du temps de fonctionnement à partir duquel une centrale peut être équipée d'un poste de capture est pris à **5000 h par an**, ce qui correspond à un fonctionnement en base ou semi-base.

Pour sélectionner les centrales répondant à ces critères, la méthode suivante a été adoptée :

La production d'électricité en base et semi-base couvre 80% de la production d'électricité totale avec en priorité dans l'ordre décroissant :

- les centrales nucléaires,
- 2/3 de la production des centrales hydrauliques,
- les centrales au charbon,
- les centrales au gaz,
- les centrales au fuel.

Performances techniques de la capture

Les technologies de capture et pertes énergétiques

liées à la capture prises en compte sont décrites dans le tableau 5.

L'année de début d'introduction de la capture étant fixée à l'horizon 2020, les niveaux de performances choisis correspondent aux objectifs de R&D en Europe.

Une efficacité de capture de 90% du CO₂ produit est fixée pour chacune de ces technologies.

Performances des centrales électriques

Les rendements des centrales électriques par type de combustible permettant d'effectuer les bilans énergétiques et CO₂ sont déterminés comme suit :

- pour toute centrale installée sur la période 2000-2020, les rendements électriques actuels (Base de données : AIE, 2002 energy balances, édition 2004) sont appliqués ;
- des gains en consommation de combustible de 7% pour les centrales au charbon/fioul et de 10% pour les centrales au gaz sont appliqués pour chaque nouvelle installation sur la période 2020-2050.

Figures 17 et 18 : Coût de capture en fonction du temps de fonctionnement des centrales. *Capture costs as a function of power plant use.*

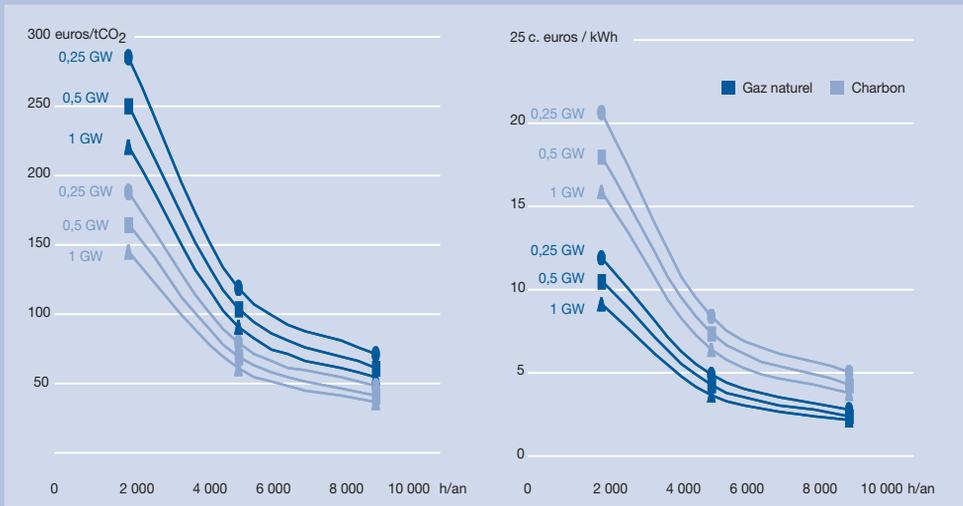


Tableau 5 : Performances techniques de la capture. *Capture technical performance.*

	Technologie de capture		Surconsommation de combustible
	Existante	Capture en post-combustion	
Centrale au charbon / Fuel	Existante	Capture en post-combustion	25%
	Neuve	Capture en pré combustion (IGCC)	18%
Centrale au gaz	Existante / Neuve	Capture en pré combustion ou post-combustion	15%

Hypothèses et Méthodologie

Potentiel de stockage du CO₂ dans les champs de pétrole et de gaz

Bases de données

Les données utilisées pour les champs pétroliers et gaziers sont issues de la base IHS Energy qui répertorie plus de 25 000 champs dans le monde hors USA onshore. Certaines données manquantes ont été complétées soit par d'autres bases de données (Infield et Wood Mackenzie) soit par des estimations.

Près de 450 Gtep de réserves initiales (i.e. totalité des hydrocarbures récupérables avant la production) de pétrole et de gaz sont recensées dans la base. A ce recensement, il faut ajouter 30 Gtep correspondant à la zone onshore des USA, soit un total de 480 Gtep. La plupart de ces réserves (77%) appartiennent à des champs définis comme « Géants », c'est-à-dire dont les réserves en gaz sont supérieures à 2,7 Tcf⁸² et/ou dont les réserves en pétrole sont supérieures à 500 Mb. Pour cette raison, plus de 80% des réserves initiales sont issues de champs en cours de production actuellement.

Ils sont situés principalement au Moyen-Orient et en Russie, comme le montre la figure 19.

Les capacités de stockage de CO₂ dans les réservoirs de pétrole

Le stockage géologique du CO₂ dans des gisements de pétrole est de plus en plus considéré comme une opportunité intéressante à moyen terme pour à la fois :

- réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère par injection dans des formations géologiques tout en bénéficiant des travaux de caractérisation pendant la phase d'exploitation pétrolière ;
- augmenter le taux de récupération de ces gisements en fin de vie par remobilisation d'une partie du pétrole en place, non produit pendant les premières phases de production (récupération assistée).

Figure 19 : Réserves initiales de pétrole et de gaz dans le monde. *Initial world oil and gas reserves.*

Source : base de données IHS + estimations IFP et CEDIGAZ pour les USA

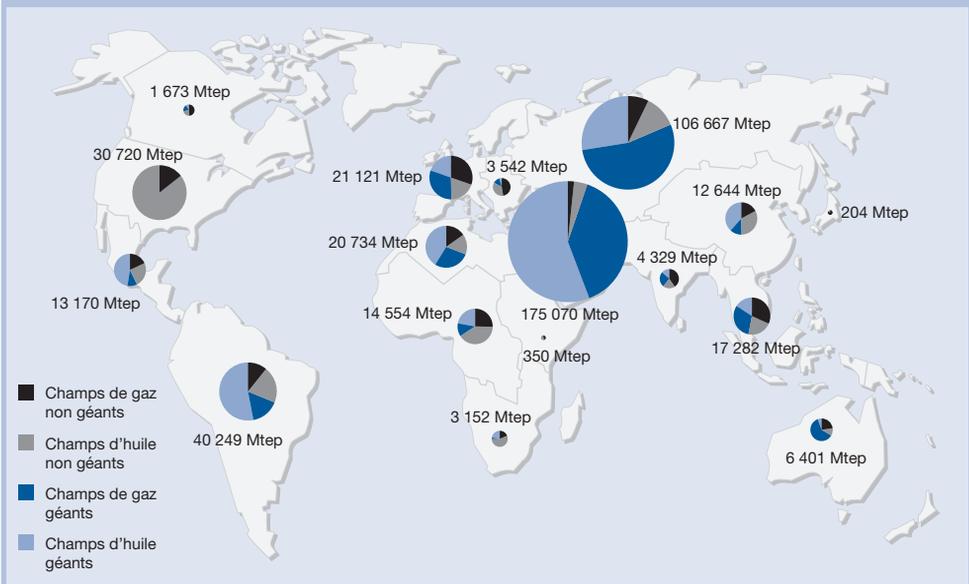
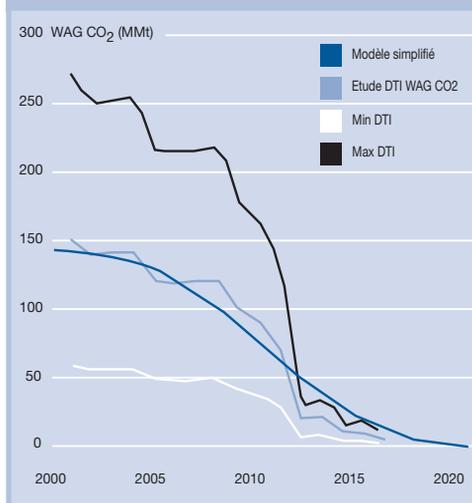


Figure 20 : Validation du modèle de stockage dans les gisements de pétrole sur les données DTI.

Model validation for carbon storage in oil fields based on DTI data.



Modèle utilisé

L'estimation des potentiels de séquestration de CO₂ dans les champs de pétrole se base sur l'étude menée en 2002 par AEA Technology (aujourd'hui ECL Technology) pour le DTI (Department of Trade and Industry)³³. Elle comprend une revue des paramètres de réservoir qui jouent un rôle dans l'efficacité de l'injection³⁴ puis une étude quantitative pour évaluer la quantité correspondante de pétrole additionnel produite mais aussi le volume de CO₂ qu'il est possible de stocker géologiquement en fonction du temps (Goodfield and Woods, 2002). L'étude s'appuie sur une base de données détaillée de tous les champs UK offshore de la Mer du Nord et distingue deux modes d'injection en fonction des propriétés du réservoir :

- L'injection « WAG » (Water Alternating Gas) adaptée aux champs de petite taille. Elle consiste à injecter de façon alternée de l'eau et un gaz, le CO₂ dans notre cas. Elle ne nécessite pas d'installations nouvelles de puits mais requiert un circuit de recirculation du CO₂ injecté, en effet une partie du CO₂ se retrouve dans le pétrole ainsi récupéré ; il faut alors le séparer et le réinjecter.
- L'injection « GSIG » (Gravity Stable Gas Injection) adaptée aux champs de grande taille. Elle consiste à injecter du gaz (CO₂ dans notre cas) en continu au-dessus du réservoir. Le pétrole est récupéré par effet de gravité. Cette technique impli-

que une installation nouvelle de puits injecteurs et producteurs, mais ne requiert pas nécessairement de circuit de recirculation du CO₂ injecté.

Chaque type de technologie conduit à des récupérations additionnelles de pétrole et des volumes de CO₂ stockés différents. L'avantage de cette étude est de prendre en compte la spécificité de chacun des réservoirs.

Les quantités de CO₂ pouvant ainsi être stockées pour chaque technologie sont les suivantes :

WAG: 0,2 à 2,8 kg CO₂ par m³ de réserve de pétrole.

GSIG: 1,5 à 8,8 kg CO₂ par m³ de réserve de pétrole.

Validation des données

Afin de valider les données de la base IHS, les algorithmes de l'étude DTI ont été appliqués aux champs de la base de données IHS pour la même zone que celle étudiée par l'étude DTI (Figure 20). La comparaison des résultats a permis de valider la méthode ainsi que l'établissement de certains facteurs de probabilité. Ces algorithmes ont alors été appliqués à tous les champs répertoriés dans la base de données IHS. Une étude plus approfondie sur les caractéristiques des champs pour chaque région pourrait permettre d'affiner l'estimation, notamment en tenant compte de la pression ou de la profondeur du champ. Les conditions standard dans le cadre de cette étude ont été prises à 200 bar et 100°C, ce qui correspond à des champs situés entre 1500 et 2500 m de profondeur.

Les capacités de stockage de CO₂ dans les réservoirs de gaz

Pour l'estimation du stockage de CO₂ dans les réservoirs de gaz, les algorithmes utilisés sont issus de l'étude ECOFYS. Ils donnent des quantités pouvant être stockées variant de 1,5 à 8,8 kg de CO₂ par m³ de gaz naturel.

Par rapport à l'étude DTI décrite dans le chapitre précédant, les estimations de stockage dans les champs de gaz ne tiennent pas compte de la faisabilité de l'injection de CO₂ en fonction des caractéristiques du champ. Les résultats sont par conséquent plus approximatifs.

Dans le cas d'injection de CO₂ dans un champ de gaz naturel, aucune récupération additionnelle d'hydrocarbures n'est considérée. Même si quelques rares cas existent à l'heure actuelle, cette pratique est techniquement non maîtrisée et peu appliquée par manque d'intérêt. En effet, les taux de récupération du gaz naturel sont souvent élevés et ne nécessitent pas, ou rarement, de techniques de récupération améliorée.

Résultats

Les scénarios de potentiel de capture

Bilan CO₂ sans capture

Au total, sans l'intégration de la capture à l'horizon 2020 et selon le scénario B1, les émissions de CO₂ liées à la production d'électricité d'origine thermique atteignent en 2050 près de 25 Gt/an, soit 3,5 fois le niveau d'émissions de 2000 (figure 21). Les centrales au charbon, notamment celles installées en Chine, pèsent lourdement dans ce bilan avec une part de 60 % en 2050.

Le cumul des émissions de CO₂ entre 2000 et 2050 s'élève à environ 870 Gt soit près de 115 ans de la production actuelle du secteur électrique.

Le potentiel de capture de CO₂

Les figures illustrent les résultats d'évaluation du potentiel de capture de CO₂ provenant des centrales thermiques de production d'électricité.

Les hypothèses prises en compte supposent que les investissements ne sont pas un frein à une pénétration massive des techniques de capture, que les objectifs de performances de ces mêmes

technologies sont atteints, et enfin que les capacités de stockages sont suffisantes. Les résultats obtenus sont les suivants.

- En 2050, il est possible d'éviter 66 % des émissions annuelles, soit d'atteindre un niveau d'émissions de 16% supérieur à celui de 2000 (Figure 22). Mais, les pertes énergétiques liées à la capture engendrent à cet horizon une capture de CO₂ additionnel de 21% supérieure aux émissions réellement évitées, soit 3,5 GtCO₂. A titre indicatif, ce chiffre correspond à près de 50% des émissions de 2000 liées à la production d'électricité.

- En termes d'émissions cumulées entre 2000 et 2050 (Figure 23), la capture permet d'éviter au total 45 % des émissions cumulées, soit 395 GtCO₂. Le CO₂ additionnel capturé lié aux pertes énergétiques de la capture s'élèvent au total à 88 GtCO₂ cumulés sur la même période, soit près de 11 fois le niveau d'émissions du secteur de la production d'électricité de l'année 2000. La pénétration massive de la capture permet donc de réduire sensiblement les émissions du

Figure 21 : Emissions mondiales de CO₂ issues de la production d'électricité d'origine thermique.

World CO₂ emissions from electricity production.

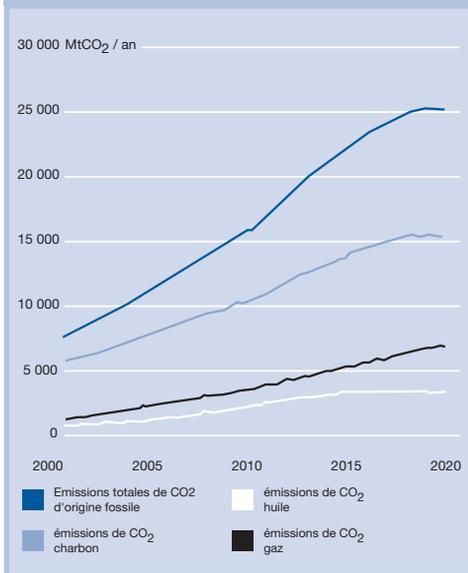
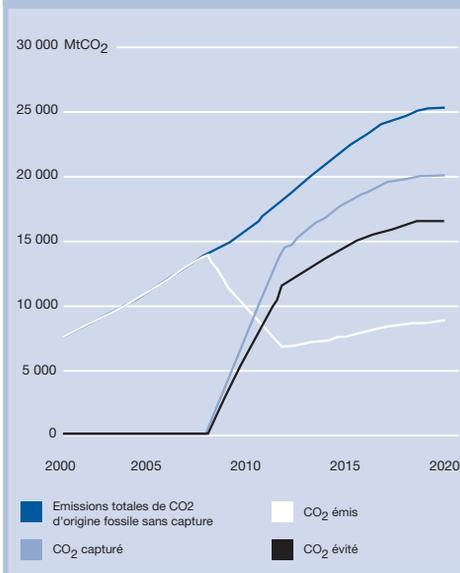
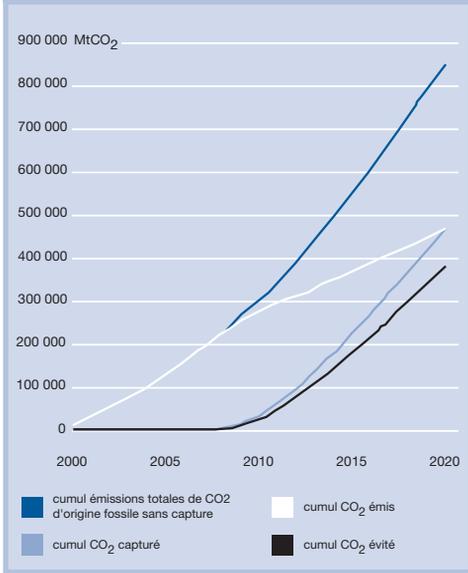


Figure 22 : Bilan annuel mondial de CO₂ pour la production d'électricité entre 2000 et 2050. World CO₂ balance for electricity production between 2000 and 2050.



secteur de la production d'électricité à l'horizon 2050, mais induit en parallèle une quantité additionnelle importante de CO₂ capturée liée uniquement aux pertes énergétiques du procédé de capture. Ce phénomène est plus important dans les pays dont le charbon est l'énergie primaire

Figure 23 : Bilan CO₂ mondial cumulé sur 2000-2050. *World CO₂ cumul between 2000 and 2050.*



majoritaire, les consommations énergétiques liées à la capture en post-combustion d'une centrale à charbon étant élevées (Figure 24).

Selon les scénarios du GIEC une division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2050 par rapport au niveau de 2000 permettrait de stabiliser les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère à 450 ppm. Par rapport à ces objectifs, la généralisation de la capture du CO₂ émis par les centrales électriques ne constitue pas une solution suffisante pour ce secteur. Compte tenu des perspectives de développement des pays émergents à cette échéance (notamment la Chine et Inde), cette exigence de réduction des émissions de gaz à effet de serre de - 50% en 2050 se renforcerait pour les pays développés à une division par quatre, objectifs de plus en plus repris par nombre d'États industrialisés, notamment la France (Figure 25). La capture intensive du CO₂ dans le secteur de l'électricité contribuerait à 70% de ces objectifs. En terme de surconsommation énergétique, les ressources fossiles supplémentaires nécessaires pour atteindre ces niveaux de capture s'élevaient à 26 Gtep (cumul sur 2000- 2050), dont 67 % de charbon et 25% de gaz. Cette surconsommation cumulée représente 11 fois les besoins en combustibles de la production d'électricité de l'année 2000 (Figure 26).

Figure 24 : Bilan régional du CO₂ capturé en cumulé sur la période 2000-2050. *Regional balance of total CO₂ captured between 2000 and 2050.*

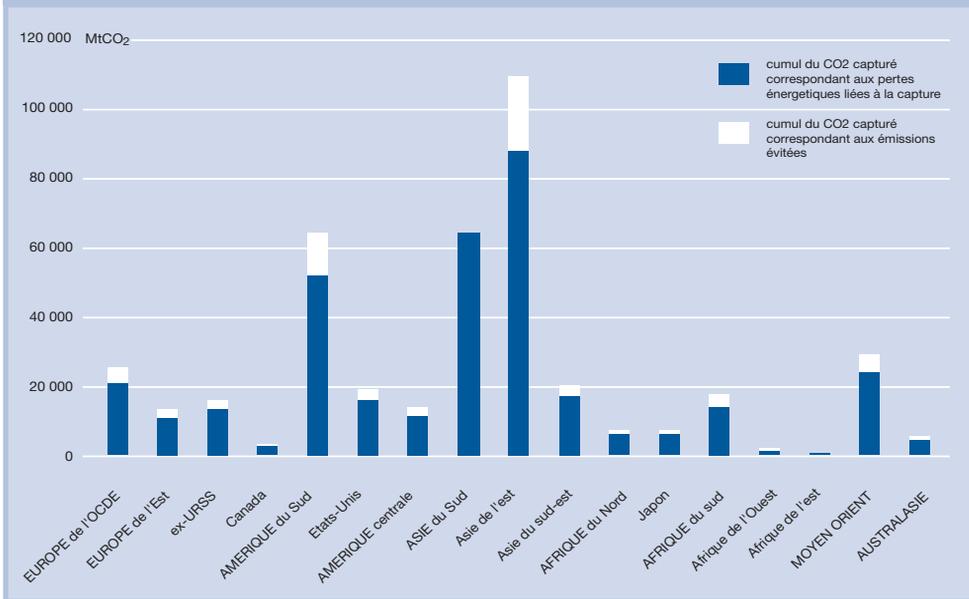
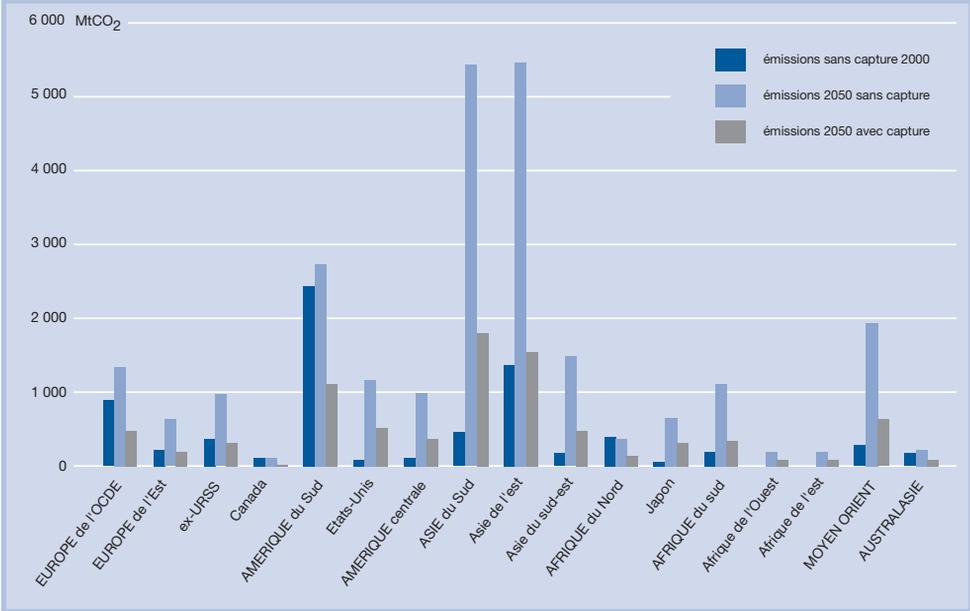


Figure 25 : Niveaux d'émissions de CO₂ en 2050 comparés à ceux de 2000. CO₂ emissions in 2050 compared to 2000.



Le poids des centrales existantes en 2020

Rappelons que le scénario de référence de l'étude considère à partir de 2020 un taux d'équipement de 10% par an pour les centrales existantes (technologie de capture en post-combustion) et de 100% par an des centrales nouvelles (technologie de capture en pré-combustion).

Ce parc de centrales existantes en 2020 joue un rôle important dans le potentiel de capture. En effet, si ce parc n'était pas équipé, et si les investissements ne se concentraient que sur les nouvelles installations, le potentiel de la capture en matière de CO₂ évité sur la période 2000-2050 se réduirait à 26% contre 45% dans le scénario de référence.

Or, comme il a été souligné au chapitre traitant des performances technologiques des procédés de capture, la voie de la capture en post-combustion adaptée aux centrales existantes est très consommatrice d'énergie par rapport à une centrale neuve conçue pour être équipée d'un poste de capture en pré-combustion.

Les rendements énergétiques pour 2020 choisis dans le scénario sont optimistes. Ils ne sont en effet pas encore atteints aujourd'hui et correspondent aux objectifs du projet européen CASTOR, soit la division par deux des consommations énergétiques actuelles pour la post-com-

Figure 26 : Bilan énergétique mondial de production d'électricité avec le scénario de capture.

World energy assessment of electricity production with capture.

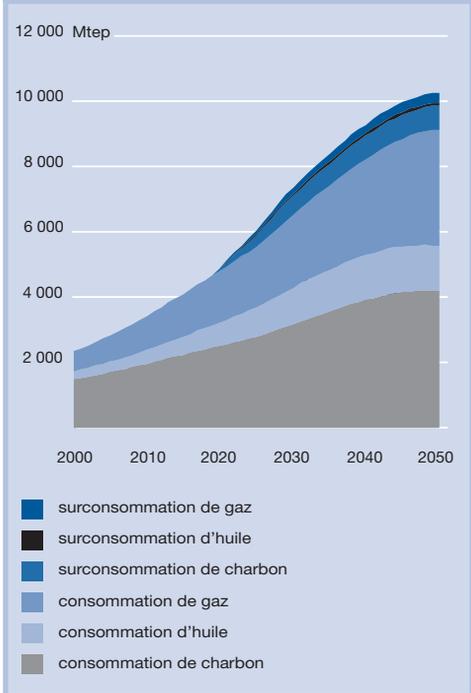


Tableau 6 : Pertes énergétiques liées à la capture du CO₂. *Energy losses from CO₂ capture.*

Type de centrale		Technologie	Surconsommation de combustible	
			Cas de base (objectifs Castor)	Performances actuelles
Centrale au charbon / Fuel	Existante	Capture en post-combustion	25%	34%
	Neuve	Capture en pré-combustion (IGCC)	18%	18%
Centrale au gaz	Existante	Capture en post-combustion	15%	25%
	Neuve	Capture en pré-combustion	15%	15%

bustion. Le tableau 6 met en regard les performances actuelles de la technologie avec celles escomptées à l'horizon 2020.

Ainsi si aucun effort n'était effectué d'ici 2020 sur l'amélioration du rendement énergétique de la technologie de capture en post-combustion, les volumes cumulés capturés seraient très élevés pour une efficacité équivalente en terme de CO₂ évité : 94 GtCO₂, soit 34% des émissions évitées (Figure 27).

En terme de surconsommation énergétique liée à la capture, le bilan est tout aussi alarmant (Figure 28). Il s'élèverait à une consommation additionnelle de 56 Gtep cumulée sur la période 2000-2050, soit 6 fois la demande totale d'éner-

gie primaire actuelle (tous secteurs confondus) ou encore l'équivalent des besoins cumulés de combustibles pour la production d'électricité entre 2000 et 2017.

Dans ces conditions, pour les régions où le charbon est le principal combustible des centrales électriques, les volumes capturés dépasseraient les niveaux d'émissions de CO₂ atteints par le parc entier de centrales électriques si ce dernier n'était pas équipé de capture.

Figure 27 : Bilan CO₂ mondial du scénario de capture avec les rendements actuels de la technologie de capture en post-combustion. *World CO₂ assessment for capture with actual yields for post-combustion capture.*

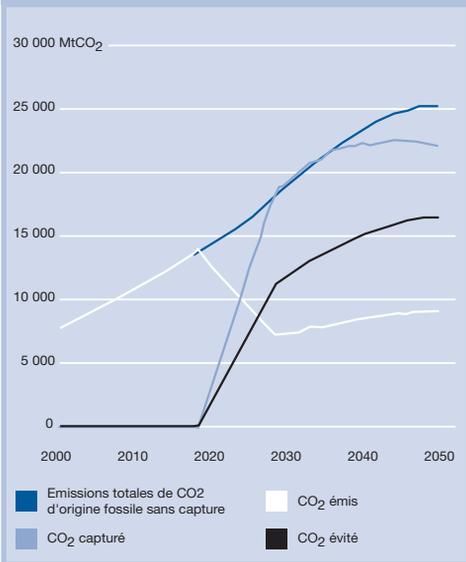
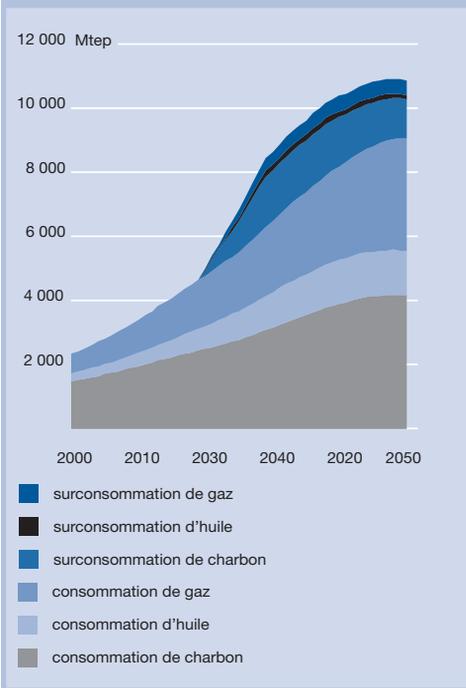


Figure 28 : Bilan énergétique mondial de production d'électricité du scénario de capture avec les rendements actuels de la technologie de capture en post-combustion. *World energy assessment of electricity production for capture with actual yields for post-combustion capture.*



C'est en particulier le cas de l'Asie de l'Est (Chine) comme l'illustre la figure 29 mais aussi celui des USA, et de l'Australie. Si aucun progrès technologique n'était effectué pour améliorer le rendement énergétique de la capture de CO₂ en post-combustion, l'équipement de postes de capture sur les centrales électriques existantes de ces pays représenteraient une aberration tant du point de vue environnemental que du point de vue de l'économie d'énergie.

L'évaluation du potentiel de séquestration géologique et la comparaison avec le scénario de capture

Bilan régional capture / stockage de CO₂ dans les gisements de pétrole et de gaz

Bénéficiant d'une longue expérience de l'industrie pétrolière, le stockage géologique dans les gisements de pétrole et de gaz est de loin le mode le plus économique et le mieux maîtrisé à l'heure actuelle. Les estimations IFP du potentiel de ce type de stockage de CO₂ s'élèvent à 715 GtCO₂ avec une plage de variation possible comprise entre 560 à 1170 Gt de CO₂.

Figure 29 : Bilan CO₂ pour l'Asie de l'Est avec les rendements énergétiques actuels des technologies de capture en post-combustion. Eastern Asia CO₂ balance with actual energy yields for post-combustion capture.

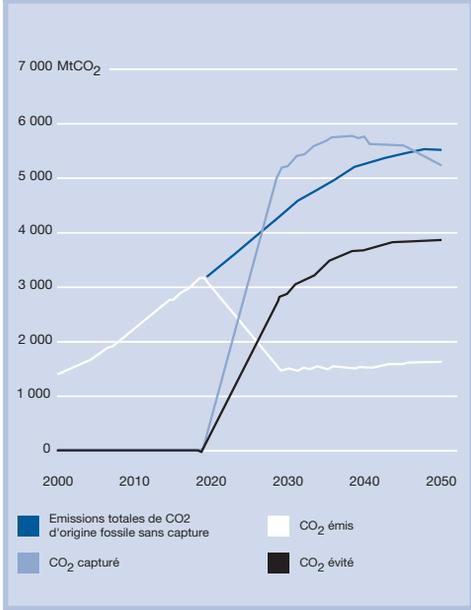


Figure 30 : Mise en regard des potentiels de stockage de CO₂ dans les gisements de pétrole et de gaz par rapport aux cumuls de CO₂ capturés. CO₂ storage potential in oil and gas fields vs. cumulated captured CO₂.

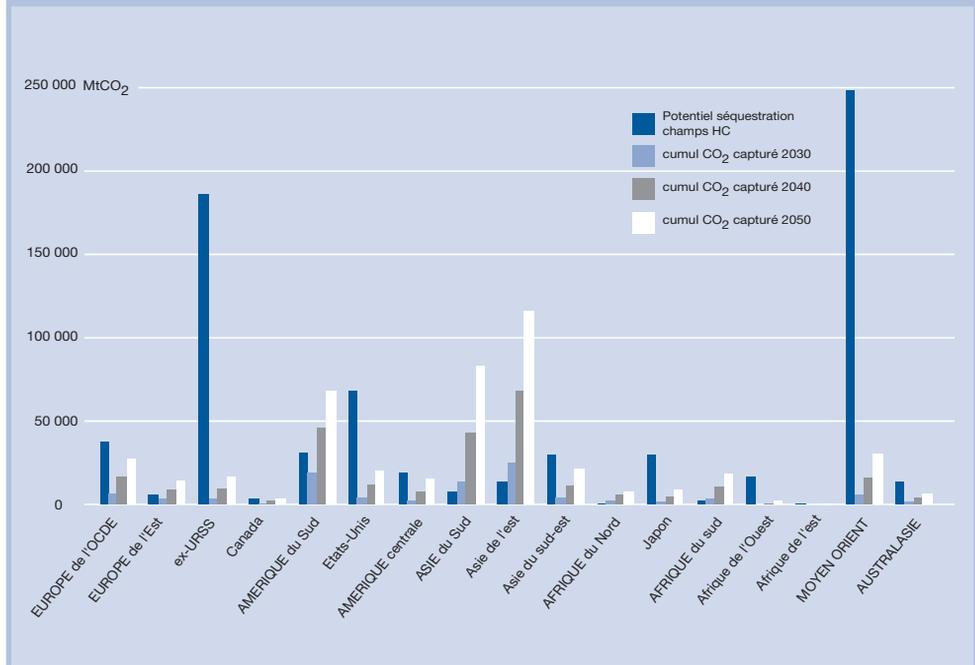


Figure 31 : Potentiel de séquestration dans les champs de pétrole offshore UK. *Sequestration potential in UK offshore oil fields.*

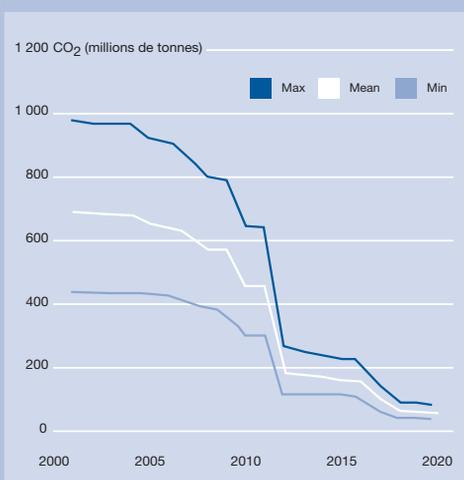


Tableau 7 : Potentiels régionaux de capture et de stockage dans les gisements de pétrole et de gaz.

Regional capture and sequestration potential in oil and gas fields.

	Potentiel de capture cumulé sur la période 2000-2050 (GtCO ₂)	Potentiel de stockage cumulé sur la période 2000-2050 (GtCO ₂)
Régions excédentaires	89	564
Régions « incertaines »	70	90
Régions déficitaires	324	62

Le Moyen-Orient et la Russie sont les deux principales régions de stockage de CO₂ : à elles seules, elles couvrent 60% du potentiel mondial.

Au global ce potentiel suffirait à absorber les 483 GtCO₂ capturées entre 2020 et 2050.

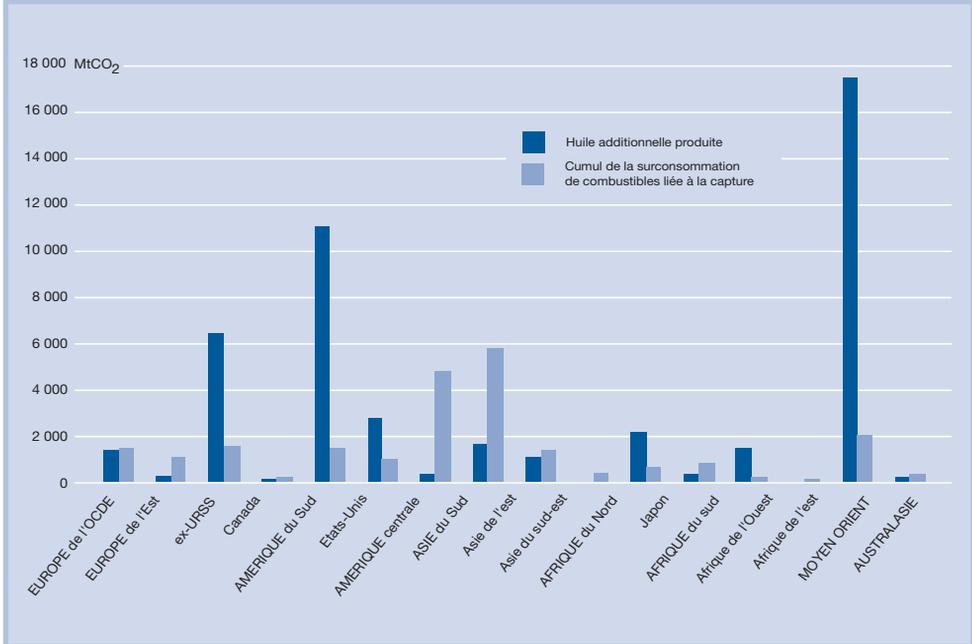
Cependant au niveau régional, ces bilans sont loin d'être tous positifs, comme le montre la figure 30. On peut ainsi distinguer :

- les régions excédentaires en terme de stockage par rapport aux émissions capturées (rapport stockage/capture supérieur à 1,5) : le Moyen-Orient, les pays de l'ex-Union Soviétique, l'Amérique du Sud, l'Afrique du Nord, l'Afrique de l'Ouest et l'Océanie. Ces régions ne devraient pas avoir de difficultés pour stocker leurs émissions de CO₂ jusqu'en 2050 et au-delà. Mais le potentiel cumulé de capture de CO₂ de ces régions ne représente que 18% du potentiel mondial d'ici à 2050, soit 89 GtCO₂.

- les régions dont le bilan net est incertain, où le potentiel de stockage est du même ordre de grandeur que les émissions capturées (rapport stockage/capture compris entre 0,5 et 1,5) : l'Europe de l'OCDE, le Canada, l'Asie du Sud Est et l'Amérique centrale. Au Canada, le potentiel de stockage est légèrement inférieur au potentiel de capture. Dans les autres régions, les potentiels de stockage couvrent juste les potentiels de capture. Compte tenu de l'incertitude globale qui existe sur les différents paramètres de l'étude, fixée ici à 30%, ces régions sont susceptibles de passer d'un état excédentaire à un état déficitaire, ou inversement dans le cas du Canada. Par ailleurs, l'introduction du stockage du CO₂ à partir de 2020 nécessiterait des investissements importants. En effet, plus de 80% du potentiel de stockage est situé en offshore, excepté pour l'Amérique Centrale où le pourcentage offshore s'élève à 34%. Du fait de leur taille relativement modeste, une grande partie de ces champs risque d'être en fin d'activité avant 2020. Préserver l'infrastructure d'une exploitation (pipeline, plate-forme...) afin de permettre le stockage ultérieur du CO₂ en offshore ne pourra être effectué sans coûts élevés de maintenance liés à un environnement marin hostile. L'étude du DTI³⁵ effectuée sur les champs de pétrole offshore du Royaume-Uni met en évidence cette problématique pour la mer du Nord (Figure 31) où la législation actuelle exige un démantèlement complet de la plate-forme après la fin de vie d'un champ. Selon cette étude et dans ce contexte législatif, les potentiels actuels de stockage de CO₂ par le biais de la récupération améliorée de pétrole déclineraient fortement dès 2010 pour être quasi inexistantes en 2020, si aucun investissement de reconstruction de plate-forme n'était effectué. Au total, ces quatre régions représentent 15% du potentiel mondial de capture de CO₂ cumulé à l'horizon 2050, soit 70 GtCO₂.

- Les régions déficitaires en terme de stockage dans les gisements de pétrole et de gaz (rapport stockage/capture inférieur à 0,5) : Europe de l'Est, États-Unis, Asie du Sud (dont l'Inde), Asie de l'Est (dont la Chine), le Japon, l'Afrique du Sud et l'Afrique de l'Est. Ces régions qui jouent un rôle majeur dans le potentiel de réduction mondiale des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité sont paradoxalement les plus démunies en terme de potentiel de stockage de CO₂ dans les gisements de pétrole et de gaz : elles représentent 67% du potentiel de capture (324 GtCO₂) contre 8,5% du potentiel de stockage (62 GtCO₂).

Figure 32 : Bilan énergétique mondial de la capture et du stockage. *World energy balance of carbon capture and sequestration.*



Le Tableau 7 récapitule le poids des différents types de régions en terme de potentiel de capture et de stockage.

Si chaque projet d'injection de CO₂ permettait une récupération améliorée du pétrole, le pétrole additionnel produit s'élèverait au total à 46 Gtep. Ce bilan compenserait donc largement les pertes énergétiques liées à la capture qui s'élèvent à 26 Gtep sur la période 2000-2050. Cependant, par analogie avec le bilan CO₂, les régions qui bénéficieraient le plus d'une récupération améliorée du pétrole ne sont pas celles où le potentiel de capture et donc les pertes énergétiques liées à cette capture sont les plus élevées (Figure 32). Les pertes énergétiques restent donc majoritairement des pertes sèches au niveau régional.

Bilan national capture / stockage de CO₂ dans les gisements de pétrole et de gaz pour les pays les plus représentatifs en terme de capture de CO₂

En tout, 18 pays représentent 80% du potentiel de capture de CO₂ issu des centrales électriques, soit de l'ordre de 385 GtCO₂. Les trois premiers pays, Chine, Inde et États-unis, représentent à eux seuls une part de 52%.

En prenant en compte une distance maximum entre la source d'émissions et les différents si-

tes de stockage d'environ 1000 km, ces 18 pays ne pourraient en fait stocker que 34% de leur potentiel de capture. Ils éviteraient ainsi 16% de leurs émissions cumulées d'origine électrique de 2000 à 2050, soit 106 GtCO₂ (figures 33 et 34). En moyenne annuelle sur cinquante ans, le potentiel de capture et de stockage de CO₂ pour ces 18 pays est donc de l'ordre de 2 GtCO₂.

Les trois premiers pays pourraient stocker 28% de leur potentiel de capture et éviter 13% des émissions cumulées des centrales électriques d'ici à 2050 (soit 58 GtCO₂).

Bilan régional capture / stockage de CO₂ dans les gisements de pétrole et de gaz et les autres stockages géologiques

Contrairement aux gisements de pétrole et de gaz, les autres sites géologiques envisagés pour le stockage du CO₂, tels que les aquifères salins et les veines de charbon inexploitable, sont très mal connus. Les estimations des quantités de CO₂ qu'il est possible de stocker dans ces sites sont par conséquent très approximatives et incertaines. Ces capacités de stockage restent encore à étudier de manière plus approfondie (réduction de l'incertitude sur le potentiel de stockage et leur stabilité à long terme, approfondissement des problèmes d'injection liés à la faible porosité

Figure 33 : Potentiel de stockage réel des pays les plus émetteurs. *Real storage potential for the most emitting countries.*

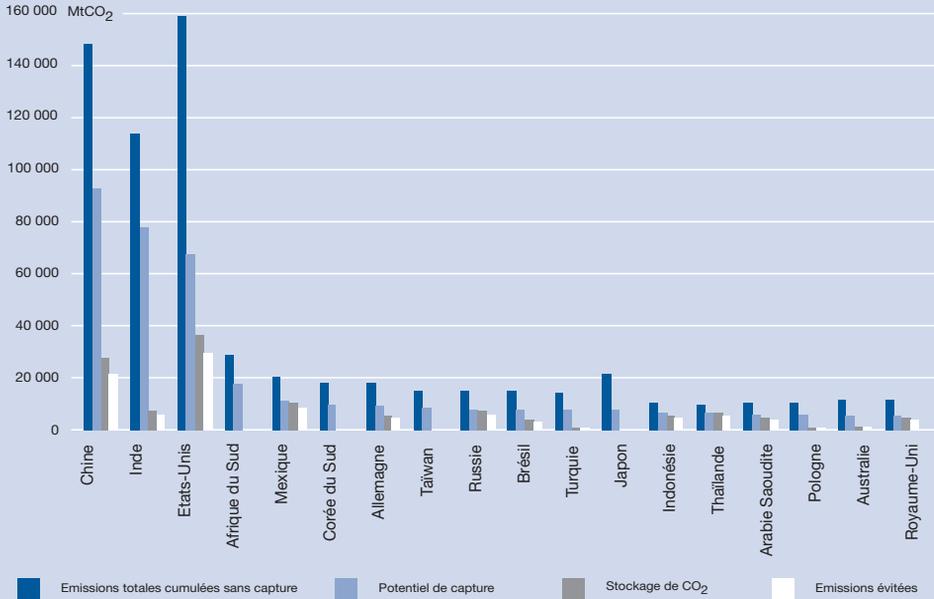


Figure 34 – Emissions évitées grâce au stockage géologique des pays les plus émetteurs. *Avoided emissions from carbon storage for the most emitting countries.*

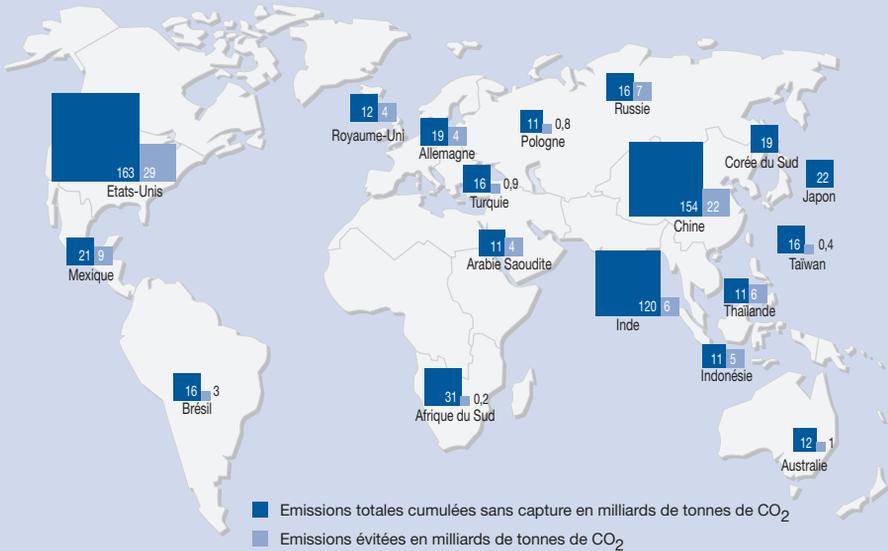
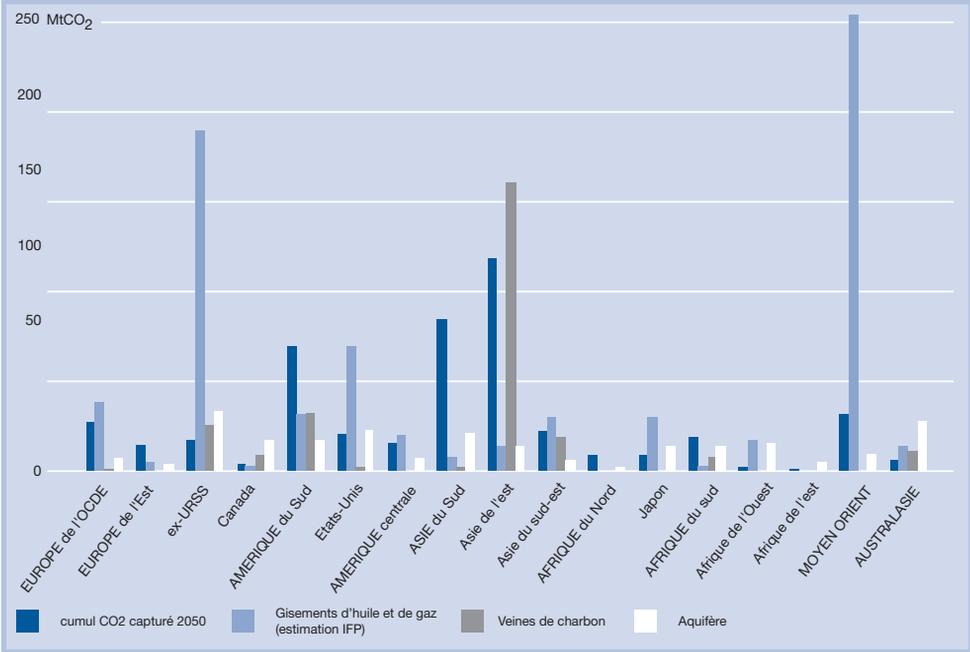


Figure 35 : Potentiels de stockage géologique par rapport au cumul des émissions de CO₂ capturées sur 2000-2050. *Geological storage potential vs. cumulated captured CO₂ emissions between 2000 and 2050.*



des veines de charbon et amélioration des technologies d'injection).

Parmi les estimations disponibles dans la littérature, celles de l'étude ECOFYS ont été retenues. Les estimations de cette étude sont données pour chaque région. Elles se basent sur des hypothèses conservatrices correspondant aux niveaux d'incertitude élevés :

- 10% de la surface totale des bassins houillers est exploitable pour l'injection du CO₂
- 1% des aquifères sont des aquifères fermés, permettant de garantir le stockage du CO₂ en espace confiné. De ces 1%, une part de 2% remplissent les conditions idéales d'injection de CO₂ (eau salée, impropre à la consommation, caractéristiques réservoir...).

Le potentiel de stockage dans les veines de charbon et dans les aquifères salins serait ainsi respectivement de 267 GtCO₂ et 237 GtCO₂ au niveau mondial (le potentiel retenu pour les aquifères étant plutôt dans la fourchette basse des estimations). Les résultats d'estimation de stockages additionnels sont illustrés par la figure 35.

Avec ces nouvelles estimations de potentiels de stockage de CO₂, le bilan s'améliore nettement au niveau mondial (1220 GtCO₂) et régional. Les régions excédentaires (rapport stockage/capture

> 1,2) sont plus nombreuses, elles représentent 58 % du potentiel mondial de capture de CO₂, soit environ 270 GtCO₂. Cependant, ces régions excédentaires montrent une grande hétérogénéité quant au rapport stockage/capture : il va de 1,2 à 3 pour l'Europe de l'OCDE, l'Amérique Centrale, l'Asie de l'Est, l'Asie du Sud-Est et l'Australasie, à 14,4 pour l'Afrique de l'Ouest par exemple.

Les régions à bilan net incertain (rapport stockage/capture compris entre 0,8 et 1,2) sont cette fois beaucoup moins nombreuses : elles se limitent aux États-Unis et à l'Afrique du Sud et représentent 19% du potentiel de stockage mondial (soit près de 90 GtCO₂).

Enfin, les régions déficitaires en terme de stockage représentent près de 23% du potentiel mondial de capture. Ces régions sont l'Asie du Sud (dont l'Inde), le Japon et l'Europe de l'Est. Pour ces régions, notamment l'Inde et le Japon, le stockage géologique du CO₂ ne peut présenter une solution de réduction sensible des émissions de CO₂ issues des centrales électriques.

Conclusion

Cette première analyse des enjeux de la séquestration géologique du gaz carbonique ne considère que la capture des émissions de CO₂ de la production d'électricité d'origine fossile. Les possibilités de capture de CO₂ à partir des grands sites de l'industrie lourde n'ont pas été prises en compte. Concernant les sites de stockage, nous avons uniquement retenus les gisements de pétrole et de gaz naturel. Des capacités beaucoup plus importantes d'injection existent théoriquement dans des aquifères salins en grande profondeur, mais les techniques en sont moins connues, les conditions d'application plus variables et aucune cartographie des potentiels présentant des garanties satisfaisantes de confinement du CO₂ n'a encore été réalisée au plan international.

En concordance avec l'étude sur la séquestration biologique présentée ensuite, le scénario B1 du GIEC a été retenu comme scénario de référence pour la demande d'énergie primaire mondiale. Celle-ci évolue relativement modérément, elle passe de 9,5 Gtep en 2000 à près de 19 Gtep en 2050. Dans ce contexte, la production d'électricité serait multipliée par quatre sur la période pour atteindre 60 000 TWh en 2050.

En supposant que les capacités de stockage soient suffisantes et situées près des sources d'émissions, l'introduction de la capture du CO₂ à l'issue des centrales électriques à partir de 2020 pourrait permettre d'éviter 45 % des émissions cumulées entre 2000 et 2050, soit 395 Gt de CO₂. La surconsommation d'énergie induite par la mise en œuvre de la capture et du stockage de CO₂ se traduirait par des émissions supplémentaires s'élevant à 88 Gt de CO₂ sur la même période. Les quantités totales à stocker seraient donc de 483 Gt de CO₂. Un tel stockage permettrait d'atteindre en 2050, au niveau mondial, le niveau d'émissions du secteur électrique de 2000.

Ce résultat est à la fois important et modeste. Il est important en masse mais couvre moins de la moitié des émissions du secteur électrique. Deux explications à cela. D'abord, la capture du CO₂ est consommatrice d'énergie et génère un recours accru aux combustibles fossiles et donc des émissions supplémentaires. Le recours à cette

technique est particulièrement pénalisé par une application aux centrales charbon anciennes avec des cycles vapeur à bas rendement.

En dehors des aspects économiques, ce potentiel important de capture peut être atteint si les deux conditions suivantes sont réunies :

- Une division par deux des consommations énergétiques des procédés de capture en post-combustion (adaptés aux centrales existantes), telle que prévue dans les objectifs du projet de recherche et développement Européen CASTOR. Le parc de centrales électriques déjà installées à l'horizon 2020 représente en effet une part importante du potentiel de réduction des émissions de CO₂ par la capture. Si aucune amélioration n'était apportée, l'équipement à partir de 2020 de postes de capture sur les centrales existantes, notamment dans les régions les plus émettrices de CO₂, entraînerait des consommations énergétiques et une capture de CO₂ additionnelles si démesurées d'un point de vue environnemental qu'elles ne pourraient être justifiées dans un contexte de politique d'économie d'énergie.

- Le renouvellement et l'extension du parc de centrales au charbon par l'installation systématique à partir de 2020 de centrales IGCC, mieux adaptées à la capture.

En considérant comme sites de stockage potentiels les seuls gisements de pétrole et de gaz, les plus connus et maîtrisés à l'heure actuelle en terme de réservoir, les capacités de stockage s'élèvent à 715 Gt de CO₂ avec une plage de variation possible comprise entre 560 à 1170 Gt de CO₂. **À l'échelle mondiale, ce potentiel suffirait à absorber les 483 Gt de CO₂ pouvant être capturées entre 2000 et 2050.**

Mais au niveau régional ces bilans sont loin d'être équilibrés. Ainsi, trois grands types de régions peuvent être distingués :

- **Les régions excédentaires** en terme de stockage ne représentent qu'une faible part du potentiel mondial de capture (18%). Le Moyen-Orient et la Russie sont les deux principales régions de stockage de CO₂ : à elles seules, elles couvrent 60% du potentiel mondial de stockage, mais ne représentent que 10% du potentiel de capture de CO₂ cumulé.

• **Les régions dont le bilan net est incertain.** Dans certaines zones, les potentiels de stockage sont juste inférieurs à ceux de la capture, ou à l'inverse couvrent juste ceux de la capture. Dans ces zones, l'incertitude sur les différents paramètres de l'étude est susceptible de faire passer chaque région de l'état déficitaire à l'état excédentaire ou inversement. C'est le cas notamment en Europe de l'OCDE, où les capacités de stockage, de taille relativement modeste, sont principalement situées en offshore. **Le stockage dans les gisements de pétrole et de gaz ne présente alors plus les avantages économiques souvent avancés pour la filière.** Dans cette région, la pénétration de la filière de la capture et du stockage à l'horizon 2020 risque d'induire de façon quasi-systématique des investissements dans la reconstruction totale des infrastructures (plate-forme, canalisations...), du fait notamment de la réglementation actuelle.

• Ce sont finalement les régions déficitaires en terme de stockage (8,5% du mondial) qui représentent la part la plus importante (67%) du potentiel de capture de CO₂ mondial.

La prise en compte d'une distance seuil entre la source d'émissions et les différents sites de stockage d'environ 1000 km réduit de façon sensible le potentiel de la filière de capture et de stockage :

• les 18 principaux pays couvrant 80% du potentiel de capture ne pourraient stocker que 126 Gt de CO₂, ou éviter 16% de leurs émissions cumulées d'origine électrique de 2000 à 2050.

• Les trois principaux pays, la Chine, l'Inde et les États-Unis, qui couvrent à eux seuls 53% du potentiel mondial de capture, ne pourraient stocker que 72 Gt de CO₂, ou 14 % de leurs émissions cumulées d'origine électrique d'ici à 2050.

Concernant les autres capacités de stockage, mieux réparties géographiquement mais moins connues, telles que les **veines de charbon et les aquifères profonds salins, elles permettraient d'améliorer sensiblement, d'un point de vue régional, le potentiel de capture et de stockage de CO₂.** En Chine et aux États-Unis, ces nouvelles voies de stockage, évaluées de manière très conservatrice, permettraient d'absorber l'ensemble du CO₂ qu'il est possible de capturer d'ici à 2050. Cependant, l'incertitude sur les quantités stockables de CO₂, les problèmes d'injectivité liés à une faible porosité du charbon, l'immaturité des technologies d'injection dans ces types de gisement sont autant de freins majeurs à une exploitation optimale de la capture et de la séquestration du CO₂ à l'horizon 2050 et au-delà. En outre,

il n'existe pas à ce jour d'inventaire mondial précis des capacités de stockage dans les aquifères salins. Il est très probable que leur géographie présente aussi des disparités de potentiel entre grandes régions.

Le Japon, l'Inde, et dans une moindre mesure l'Europe de l'Est, ne possèdent que très peu de possibilités de stockage. Pour ces pays, qui représentent au total près de 20% des émissions mondiales de CO₂ du secteur électrique en 2050, le développement de la filière avec stockage géologique ne peut représenter une solution majeure dans la réduction d'émissions du secteur.

Or, d'après les scénarios prospectifs de production d'électricité, les 2/3 des centrales à charbon qui vont être construites dans les décennies à venir se situent dans des zones où les possibilités de stockage du CO₂ sont faibles.

Ainsi, dans les conditions actuelles des connaissances, le développement de la filière de capture et de séquestration ne peut avoir un impact environnemental sensible sans investissements importants :

• dès aujourd'hui en R&D :

- au niveau de la capture : une réduction importante de la consommation d'énergie liée à la capture en post-combustion présente un enjeu clé pour la filière.

- au niveau des sites de stockage : il est important d'approfondir la connaissance des sites géologiques de stockage, tels que les veines de charbon inexploitable et les aquifères salins profonds, sans lesquels le potentiel de la filière serait limité.

- sur les aspects de gestion de sécurité lors du transport et du stockage du CO₂.

- sur les aspects réglementaires tant sur le transport que sur la capture et le stockage du CO₂.

• afin de permettre dès 2020 une diffusion des technologies de capture et stockage :

- Installation de centrales électriques IGCC pour le charbon, mieux adaptées à la capture que les centrales à charbon classiques.

- Concernant le transport, planification d'une infrastructure importante de distribution du CO₂ de la source d'émissions au lieu de stockage. Les distances nécessaires pourraient aller jusqu'à 1000 km, voire plus suivant les objectifs de réduction fixés. En 2050, le potentiel maximum de capture de CO₂ évalué correspondrait à une gestion de volumes annuels à transporter environ 5 fois plus élevés que ceux du gaz naturel transportés à l'heure actuelle.

- Pour le stockage dans les veines de charbon et les aquifères salins : au-delà des installations, des investissements de caractérisation des sites devront s'ajouter. De plus, les problèmes d'injection liées à la faible porosité du charbon devraient nécessiter un nombre important de puits injecteurs.

On doit donc tirer de ce qui précède les conclusions suivantes :

- Le recours à la séquestration du dioxyde de carbone contribue à limiter les émissions de CO₂ des sources très concentrées, mais ne peut constituer la seule stratégie de lutte contre le changement climatique, car les capacités de stockage sont limitées et les potentiels géographiquement très inégaux.
- Les problèmes de localisation différente entre les sources d'émissions de CO₂ et les lieux de stockage réduisent fortement les potentiels de séquestration, notamment pour les pays émergents. En effet, le recours aux techniques de séquestration apparaît nécessaire pour les pays qui continueront d'utiliser massivement des combustibles fossiles pour leur production électrique en base. C'est le cas en particulier de la Chine, l'Inde et l'Afrique du Sud ; cependant ces pays ont des capacités de stockage limitées au regard de leurs émissions.
- L'amélioration des technologies et la réduction des coûts de capture accroîtront la compétitivité du charbon par rapport aux hydrocarbures.

Le développement d'une telle filière dans le secteur de l'électricité impose donc de relever de nombreux défis d'ici à 2020 tant sur le plan économique que technologique. Son potentiel de réduction d'émissions de CO₂ dépend également étroitement des capacités réelles de stockage des aquifères salins et des veines de charbon inexploitable, encore méconnues de nos jours. Compte-tenu du rythme de déploiement de cette filière et des nombreuses incertitudes qui pèsent sur elle, elle ne peut être qu'une solution partielle et de long terme. Les politiques de maîtrise de la demande d'électricité et l'utilisation d'alternatives plus maîtrisées telles que les énergies renouvelables ou la cogénération, restent primordiales.

Notes

- ¹ Chris Hendriks, Wina Graus, Global carbon dioxide storage potential and costs, Ecofys in cooperation with TNO, 2004.
- ² AIE « CO₂ Emissions from Fuel Combustion », édition 2002
- ³ « Building the Cost Curves for CO₂ storage. Part 1 : Sources of CO₂ », report number PH4/9, IEA GHG R&D program
- ⁴ le CO₂ séparé lors de la production de gaz naturel (dans le cas d'un gaz naturel à teneur en CO₂ élevée) peut également être assimilé à une source de CO₂ concentrée.
- ⁵ Herzog, Drake, and Adams 1997; Turkenburg and Hendriks 1999; David and Herzog 2000
- ⁶ David and Herzog 2000
- ⁷ La production d'H₂ pour des applications industrielles est principalement issue du gaz naturel, par reformage à la vapeur (CH₄ + H₂O @ CO + H₂ et CO + H₂O @ CO₂ + H₂), puis séparation CO₂/H₂ par adsorption. Le surcoût engendré alors par la séquestration du CO₂ est réduit, puisque plus lié à la capture, mais seulement aux éventuels traitements et à la compression (environ 10% du coût de production), ainsi qu'au transport et au stockage. Les estimations de ce surcoût varient entre 13 \$/tCO₂ (Blok et al., 1997) et 20 \$/tCO₂ (Anderson and Newell - Resources for the Future, Washington Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies, janvier 2003); e.g. il a été estimé à 19 \$/tCO₂ pour la production d'ammoniac dans l'industrie des engrais aux Pays-Bas (Farla, Hendriks and Blok, 1995).
- ⁸ David and Herzog 2000
- ⁹ David and Herzog 2000. Selon les technologies et les sources, l'estimation de ce coût varie de 20 à 90 \$/tCO₂
- ¹⁰ David and Herzog 2000
- ¹¹ la consommation d'énergie de l'apport en oxygène pur pour une centrale à charbon de 500 MW fonctionnant 8000 heures par an représenterait 15 % de sa production électrique annuelle
- ¹² Tobias MATTISSON, Anders LINGFELT (Chalmers University of Technology) *Capture of CO₂ using chemical-looping combustion, First Biennial Meeting of the Scandinavian-Nordic Section of the Combustion Institute, Göteborg, Suède (18-20 avril 2001)*
- ¹³ H. UNDRUM (Statoil) ; O. BOLLAND, E. AARENROT (Norwegian University of Science and Technology), *Economical assessment of natural gas fired combined cycle power plant with CO₂ capture and sequestration*
- ¹⁴ Le projet européen CASTOR a pour objectif de diviser par 2 la consommation énergétique de la capture post-combustion, afin d'arriver à 2 GJ par tonne de CO₂, soit 0,55 kWh/kg de CO₂.
- ¹⁵ Le transport du CO₂ peut également se faire à l'état solide, à une température inférieure à -78 °C. Il peut alors être transporté par camion ou voie ferroviaire. Le CO₂ sous cette forme présente l'avantage d'être à pression atmosphérique, ce qui favorise considérablement sa gestion. Mais les coûts opérationnels de ces types de transport sont élevés. Cette solution est adaptée aux faibles quantités, ce qui exclut son utilisation dans le cas de la séquestration du CO₂.
- ¹⁶ Pour une canalisation de diamètre intérieur 500 mm, on a une perte de charge de l'ordre de 30 kPa/km, valeur diminuant quand le diamètre augmente (Fox, 2002)
- ¹⁷ 278 km pour le Central Basin Pipeline ; 656 km pour le Sheep Mountain Pipeline
- ¹⁸ G. Allinson, V. Nguyen *The economics of CO₂ sequestration in Australia*
- ¹⁹ Depuis 1989, Hydro Gas and Chemicals en Norvège utilise 4 navires approvisionnant 10 terminaux de manière régulière à partir de sites de production de CO₂ (principalement des usines de production d'ammoniac)
- ²⁰ Ormerod et al, 2002 ; « Transportation Systems for CO₂ – Application to Carbon Sequestration » (M. Odenberger, R. Svensson, Université de Chalmers, 2003)
- ²¹ « The Economics of CO₂ Storage » (Gemma Heddle, Howard Herzog, Michael Klett, MIT, 2003)
- ²² estimation à partir de données du document « Transportation Systems for CO₂ – Application to Carbon Sequestration » (M. Odenberger, R. Svensson, Chalmers University of Technology - Göteborg, Sweden, 2003)
- ²³ Plate-forme gazière de Mer du Nord opérée par Statoil, à 240 kilomètres des côtes norvégiennes
- ²⁴ Il existe bien une réglementation aux Etats-Unis (où du CO₂ est transporté vers des champs de pétrole pour en améliorer la récupération). Toutefois, cette réglementation n'est pas directement transposable à la séquestration du CO₂. En effet, aux Etats-Unis, le CO₂ est principalement issu de gisements naturels et ne peut donc pas être considéré comme un déchet. De plus, les canalisations de transport traversent des régions peu peuplées; la traversée de régions à plus forte densité de population ne se ferait sans doute pas dans les mêmes conditions réglementaires.
- ²⁵ IMAGE team, 2001 : The IMAGE 2.2 implementation of the SRES scenarios: A comprehensive analysis of emissions, climate change and impacts in the 21st century, National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands, RIVM CD-ROM publication.
- ²⁶ IPCC «Special Report on Emissions Scenarios», Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

- ²⁷ IEA GHG R&D Programm "Building the cost curves for CO₂ storage, part 1: sources of CO₂" Report Number PH4/9 July 2002
- ²⁸ « Carbon sequestration – Technology Road Map and Program Plan »- U.S. DOE Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory ; march 12, 2003
- ²⁹ EC, «Position Paper on Research and Development for CO₂ Capture and Storage» Preliminary Draft for Discussion 16 January 2004
- ³⁰ IEA2010
- ³¹ IEA2020
- ³² 1 Tcf = 1 Trillion Cubic Feet (équivalent à environ $1 \cdot 10^{12}$ m³)
- ³³ Matthew Goodfield, Claire Woods, "Potential UKCS CO₂ retention capacity from IOR projects", AEA Technology, DTI's Improved Oil Recovery Research Dissimination Seminar, 25 juin 2002
- ³⁴ Goodyear S., Hawkyard I., Masters J., and Woods C., "Subsurface Issues for CO₂ Flooding of UKCS Reservoirs", DTI n° Improved Oil Recovery Research Dissimination Seminar, London, 2002.
- ³⁵ Matthew Goodfield, Claire Woods, "Potential UKCS CO₂ retention capacity from IOR projects", AEA Technology, DTI's Improved Oil Recovery Research Dissimination Seminar, 25 juin 2002

Les réductions potentielles d'émissions de CO₂ par des plantations forestières sur des terres agricoles dans le monde à l'horizon 2050

World CO₂ emission reduction by forest plantations on agricultural land up to 2050

Résumé

Cette étude a pour but d'évaluer en ordre de grandeur les réductions d'émissions de CO₂ qu'il serait possible d'obtenir d'ici 2050 en boisant les espaces agricoles susceptibles de devenir vacants dans le monde jusqu'à cette date. Les réductions d'émissions ont été calculées en tenant compte des augmentations de stocks de carbone dans ces boisements (biomasses et sols) et des possibilités d'utilisation du bois récolté pour remplacer des combustibles fossiles ou des matériaux comme l'acier, l'aluminium ou le béton. L'augmentation des stocks de carbone dans les matériaux bois dans la construction, et leur valorisation énergétique en fin de vie en substitution à des énergies fossiles, ont également été comptabilisées.

Quatre types de plantations sont étudiés alternativement :

- des plantations à forte densité et à courtes rotations (de 8 ans sous les tropiques humides à 30 ans en zones boréales) dont la vocation est de fournir du bois pour satisfaire les besoins énergétiques locaux (thermiques et électriques,

mais non en biocarburants) en vue de remplacer des énergies fossiles ;

- des plantations à fortes densités et à courtes rotations analogues aux précédentes, mais dont la vocation est de fournir du bois matériau ;
- des plantations plus classiques à rotations longues (80 ans), éclaircies tous les 10 ans, dont la vocation principale est également de produire du bois matériau ;
- des plantations n'étant jamais exploitées, dont le seul but est d'accroître les stocks de carbone dans les biomasses et dans les sols des boisements ainsi effectués.

Les plantations du dernier type sont effectuées au fur et à mesure de la disponibilité des terres agricoles, alors que les autres plantations sont réalisées en tenant également compte des perspectives d'augmentation des débouchés locaux en énergie et en bois matériau. Nous avons considéré que le taux de pénétration supplémentaire du bois énergie est de 15% à 25% de l'énergie finale consommée selon les secteurs. Le taux de pénétration supplémentaire pour le bois d'œu-

vre, utilisé dans les constructions, est limité à 20% des surfaces nouvellement construites.

Les superficies de terres agricoles devenant théoriquement disponibles pour de telles plantations forestières dépendent essentiellement des scénarios de développement considérés. A cette fin, nous nous sommes basés sur deux scénarios extrêmes du GIEC relatifs à des types de développement possibles au 21^{ème} siècle (A2 et B1) et sur la modélisation du RIVM qui permet de localiser les terres devenant disponibles dans le monde. Dans le scénario A2, connaissant une forte croissance démographique et une ouverture faible sur le monde, l'adoption des progrès technologiques est lente. En revanche dans le scénario B1, à plus faible croissance démographique, à préoccupations écologiques et sociales plus fortes, très ouvert sur le monde, les progrès technologiques diffusent bien ; d'où une plus grande efficacité énergétique, une meilleure utilisation des terres par augmentation des productions annuelles par hectare (des rendements et du nombre de cultures par an) ainsi qu'un moindre recours à l'élevage pour satisfaire les besoins alimentaires qu'en A2.

Le niveau de réductions cumulées de gaz à effet de serre dépend évidemment de la disponibilité en terres agricoles devenant vacantes d'ici 2050 ainsi que des débouchés. Sous le scénario A2, seulement 140 millions d'hectares de terres agricoles deviennent disponibles d'ici en 2050, contre 950 millions d'hectares (principalement en Amérique du sud, en Afrique et en Chine) sous le scénario B1.

Avec les plantations à courtes rotations pour des usages énergétiques locaux, il est possible de réaliser, lorsque l'on tient compte des débouchés, des plantations sur 118 millions d'hectares (sur 84% des terres devenant disponibles) sous le scénario A2 et sur 420 millions d'hectares (sur 45% des terres devenant disponibles) sous le scénario B1. Cela se traduit par des réductions cumulées d'émissions d'ici 2050 atteignant respectivement 7,3 GtC (soit 1% des émissions totales cumulées attendues sous le scénario A2 d'ici 2050) et 27,8 GtC (soit 5% des émissions totales cumulées attendues d'ici 2050 sous le scénario B1). Dans ce dernier cas, en Amérique latine par exemple, seulement 15% des terres disponibles suffisent pour saturer les besoins en énergie, hors biocarburant, en 2050. La valorisation sous forme de biocarburant des biomasses susceptibles d'être produites permettrait d'améliorer ce bilan en assurant de nouveaux débouchés, particulièrement sous B1 présentant de fortes disponibilités des terres agricoles. Dans cette hypothèse, de l'ordre de 10% des émissions totales cumulées pourraient être évitées

grâce aux divers modes de valorisation énergétique du bois issu de nouvelles plantations. L'usage des biomasses sous forme de carburant n'a cependant pas été étudié en détail dans cette étude.

Selon nos hypothèses, les débouchés supplémentaires pour le bois-matériau sont limités ; ils progresseraient de 25 % en 2050 par rapport à la consommation mondiale de bois-matériau en 2000. Ainsi, bien que la substitution de bois matériau à des produits tels que l'acier ou le ciment forts consommateurs d'énergies fossiles offre de très bons résultats en terme d'émissions évitées, les réductions d'émissions dans le cadre des scénarios de plantations forestières dédiées à la production de bois matériau sont faibles du fait du manque de débouchés. Dans le cas de rotations longues, les réductions cumulées des émissions d'ici 2050 atteignent 2,1 GtC sous A2 et 5,4 GtC sous B1. Avec des plantations à courtes rotations, les réductions diminuent respectivement de 5% et 18%. Une faible partie des terres disponibles est alors utilisée : 6% des 140 millions d'hectares devenant disponibles sous A2 et seulement 2% des 940 millions d'hectares devenant disponibles sous B1. Dans la stratégie d'exploitation à rotations longues, elle est respectivement de 37% et 9%.

Si nous comparons les stratégies d'exploitation entre elles, et si on tient compte des débouchés potentiels, il apparaît que ce sont, soit les boisements à courtes rotations effectués pour satisfaire des besoins locaux en énergie qui offrent les perspectives de réduction des émissions cumulées de gaz à effet de serre d'ici 2050 les plus importantes (28 GtC en 2050), soit les boisements sans exploitation dans le cas de fortes disponibilités en terres agricoles vacantes ; la première stratégie utilisant dans ce cas deux fois moins de terres que la seconde. Les boisements pour la production de bois-énergie dominent nettement toutes les autres stratégies lorsque peu de surfaces agricoles sont vacantes. Cela pourrait être également le cas, sous le scénario B1, si toutes les biomasses susceptibles d'être produites d'ici 2050 sur les terres devenant vacantes pouvaient trouver un débouché énergétique, notamment sous forme de biocarburant.

Par contre, dans le cas de stratégies hybrides mêlant différents modes d'exploitation, pour maximiser les réductions d'émissions de CO₂ cumulées d'ici 2050, il est souhaitable de recourir en premier lieu à des plantations pour la production de bois matériau, dans la limite des débouchés existants, puisqu'elles offrent globalement les plus fortes réductions d'émissions à l'hectare planté. Des plantations à courtes rotations à vocation énergétique doivent en-

suite être mise en œuvre, conduisant à de nouveaux débouchés. C'est seulement en dernier ressort que l'on doit envisager le recours à des plantations dont le seul but serait d'augmenter les stocks de carbone en forêt, dans l'objectif unique considéré ici de maximiser les réductions d'émissions de CO₂.

La stratégie de plantations forestières sans exploitation soulève par ailleurs deux questions : la permanence des réductions d'émissions et l'héritage laissé aux générations futures. En effet, avec des plantations sans exploitation, des tempêtes, des incendies ou des changements climatiques pourraient rendre les gains réversibles. Alors que dans les scénarios avec des courtes rotations, la majeure partie des réductions (75 et 85% en 2050 avec les productions de bois énergie) proviennent des substitutions d'énergies fossiles, elles sont donc définitives. Concernant « l'héritage laissé », si la stratégie de plantations sans exploitation peut parfois avoir d'autres intérêts que les réductions d'émissions de gaz carbonique, par exemple pour préserver les sols et les eaux, elle « gèle » en revanche l'usage des terres pour un temps indéfini et laisse aux générations futures la responsabilité de la préservation. Les scénarios avec exploitation forestière présentent par contre l'avantage de mettre en place des filières économiques autour des produits du bois pouvant plus probablement faciliter la préservation à long terme des boisements ainsi mis en place.

Nous devons enfin souligner que les réductions d'émissions de CO₂ liées à des plantations forestières sur des terres agricoles conduisent à des résultats significatifs selon les scénarios qu'au-delà de 2030 ou 2050, voir plus pour les longues rotations, pour lesquelles 100 ans est un ordre de grandeur moyen pour observer l'ensemble des phénomènes en jeu. Par conséquent, une politique de plantations forestières sur des terres agricoles dans le cadre de la lutte contre le changement climatique (sauf dans le cas de plantations permettant d'éviter des déboisements) est clairement une stratégie de long terme. Elle ne peut être considérée comme un moyen de « gagner du temps » par rapport aux politiques de réduction d'émissions de CO₂, c'est-à-dire permettre des gains de carbone significatifs en attendant que les politiques de réductions d'émissions de CO₂ se déploient.

Abstract

The main objective of this study was to determine the possible contribution on CO₂ emission reductions of new forest plantations on agricultural land which may become available in the world from now to 2050. Emission reductions have been calculated by taking into account potential changes in carbon stocks on afforested land (in biomass and soil) and replacement with biomass of fossil fuel and material such as steel, aluminium or concrete. Increase of carbon stocks in wood as building material and final conversion of wood recycled from buildings into energy to replace fossil fuel have also been taken into account.

Four types of plantations have been considered:

- short rotation plantations (from 8 years rotations under moist tropical conditions up to 30 years rotations under boreal climate), with high densities, to meet local energy needs (thermal and electrical needs, but excluding liquid biofuel consumption for transportation) and to replace fossil fuel;
- short rotation plantations, with high densities, similar to the previous option, but producing only wood for use as material;
- more conventional plantations, with long rotations (80 years), thinned every ten years, producing also mainly wood for building;
- plantations that are not harvested but meant to sequester carbon in biomass and soil organic matter in the afforested land.

The last kind of plantation is taking place whenever agricultural land becomes available whereas other plantations are made according to the increase in local demand of wood for energy or for material. It has been considered that penetration of wood for energy ranged from 15 % to 25% of the final energy consumption, depending on the sector considered. It was also considered that the supplementary consumption of wood material in new buildings was limited at 20% of the new area built.

Agricultural land becoming theoretically available for such plantations depends mainly on the developmental pathways which are considered. Two opposite and extreme scenarios (A2 and B1) out of the four scenarios developed by IPCC for the 21st century have therefore been considered. Scenarios produced by RIVM, indicating where future agricultural land is becoming available under A2 and B1 have been used for this analysis. Under Scenario A2, with a high population growth (11.3 billion inhabitants in 2050), not largely open to the world, technological improvements are slow.

On the opposite, under scenario B1 with a lower population growth (only 8.7 billion inhabitants in 2050), more open to the world, more ecologically and socially driven, technological improvements take place faster; energy efficiency and land use efficiency (increase in annual production per hectare both through higher crop yields and more crops per year on the same land) are therefore higher and livestock requirement to satisfy human nutrition are lower than under A2.

Greenhouse gas emission reductions depend on the agricultural land which becomes available by 2050 as well as wood demand. Until 2050 only 140 million hectares become available under Scenario A2, whereas 950 million hectares are available under B1, mainly in South America, in Africa and in China.

With short rotation energy plantations, respectively 118 million hectares (84% of the land becoming available under Scenario A2) and 420 million hectares (but only 45% of the land becoming available under Scenario B1) may be afforested to meet local energy demand for these scenarios. Cumulated emission reductions until 2050 could reach respectively 7.3 GtC (1% of total cumulated emissions until 2050 under Scenario A2) and 27.8 GtC (5% of total cumulated emissions under Scenario B1). As an illustration, in the latter case only 15% of the land available in Latin America would be sufficient to meet the local energy demand (not including liquid biofuel) in 2050. This situation would improve with the possibility to convert wood into liquid biofuel which would offer new markets and increase climate change mitigation; in particular under Scenario B1 with high land availability. Under the latter Scenario, with all possible uses of wood from the new plantations, about 10% of the CO₂ cumulated emissions until 2050 could be avoided. This option has however not been studied specifically.

Under the above-mentioned assumptions, the demand for wood products remains limited. The world demand of that category of products may increase by about 25% only, between 2000 and 2050. In spite of the fact that the substitution with wood products of fossil fuel intensive products (such as steel or concrete), is an efficient means to reduce CO₂ emissions, total emission reductions with plantations dedicated to material production remain low, as demand for such products remains low. With long rotations, cumulated emission reductions until 2050 reach 2.1 GtC under A2 and 5.4 GtC under B1. With short rotations, emission reductions are respectively 5% and 18% lower than with long rotations. Only a small fraction of the land becoming available is then

utilized; 6% of the 140 million hectares under A2 and only 2% of the 940 million hectares under B1. With long rotations more land is needed: respectively 37% and 9% of the land becoming available.

When we compare the different strategies of land use studied in detail, taking into account potential demands for wood products, short rotation plantations to meet local energy demand appear to be the best option to reduce emissions until 2050. Under B1 with much land becoming available, plantations which are never exploited could offer the same potential of emission reductions but would need twice as much land. When not much land is becoming available short rotation plantations is by far the best option to reduce emissions. When combining options to maximize CO₂ emission reductions until 2050, it is advisable to first use short rotations to produce wood for material, according to the demand, as this is the most efficient option on a per-km² basis. Short rotation for energy is the next best option. Plantations of forests not to be harvested, made only to increase carbon stocks in living trees and soil organic matter, is the last option to be considered.

The latter option raises also two questions; the permanence of emission reductions and the burden for future generations. Up to 75 and 85% of emissions reductions through substitution of fossil fuel with wood for energy from short rotation plantations are permanent in 2050, whereas carbon storage in plantations made to sequester carbon may be reversible and be destroyed later on by storms, fires, pests or future climate change. Although such plantations may sometimes offer other benefits, such as soil and water conservation, they freeze the land indefinitely and leave the responsibility to protect forests to future generations. However, options with harvesting of wood present economic benefits which will probably help to maintain such plantations in the future.

Finally we must emphasize that CO₂ emission reductions (or carbon benefits) from afforested agricultural land become significant only after 2030 or 2050, and even at a later stage with long rotations. In the case of the latter, about 100 years are needed to get the full benefits. Forest plantations can therefore only be considered as long term options. And except when such plantations on agricultural land allow to avoid deforestation, can therefore not be considered as options to "buy time" while waiting for other GHG mitigation policies to deliver reductions.

Introduction

L'utilisation des biomasses à la place de combustibles fossiles est une solution largement admise pour réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂). La réduction de ces émissions par une augmentation des stocks de carbone dans les écosystèmes – ce qui est parfois résumé par la notion de « puits de carbone » – a été largement débattue lors des récentes négociations internationales sur le changement climatique. Les écosystèmes terrestres peuvent contribuer de diverses manières à ces réductions d'émissions :

- Il est possible d'une part d'augmenter les stocks de carbone dans les biomasses et dans les sols ; c'est ce qui se passe lorsque l'on boise une terre cultivée.

- On peut d'autre part récolter des biomasses utilisables à diverses fins dans les forêts, dans les prairies et sur les terres cultivées soit pour remplacer des énergies fossiles (ce qui permet de réduire plus ou moins les émissions nettes de CO₂ selon les énergies substituées), soit pour utiliser les biomasses à la place d'autres matériaux, ce qui permet en général d'économiser de l'énergie et parfois aussi d'augmenter le stocks de carbone hors forêt ou hors champs, dans le cas des produits à longue durée de vie, par exemple dans les constructions.

Selon le rapport du GIEC de mars 2001, l'impact global d'une meilleure utilisation des terres et des forêts, par une meilleure utilisation des biomasses et par une augmentation des stocks de carbone dans les écosystèmes terrestres -, pourrait se traduire par une diminution de 10 à 20% des émissions de CO₂ d'ici à 2050.

Dans ce cadre, parmi les multiples usages possibles de la biomasse, quelle pourrait être la contribution des plantations forestières nouvelles sur des terres agricoles abandonnées ? Quels sont les ordres de grandeur des séquestrations possibles et de l'usage de biomasses en substitution à des

énergies fossiles ? Dans quelles régions du monde se situent les principaux potentiels ? Quels sont les délais pour parvenir à des contributions significatives et sur quelle durée ?

L'objectif de cette étude est d'évaluer, en ordre de grandeur, les capacités de prélèvement de CO₂ de l'atmosphère par de nouvelles plantations forestières, et les réductions potentielles d'émissions de CO₂ issus de la substitution de produits bois à des énergies fossiles ou à d'autres produits. Les principaux facteurs intervenant sur ces bilans carbone sont mis en évidence. Les potentiels de stockage du carbone et de substitution sont évalués pour les différentes régions du monde à l'horizon 2050 et 2100.

Le potentiel de plantation de telles forêts dépend évidemment en premier lieu des surfaces disponibles à cette fin. C'est ce que nous examinons en premier lieu. Il découle de nombreux facteurs, géoclimatiques, économiques, sociaux, ou technologiques, qui diffèrent selon les régions du monde et dans le temps. Les surfaces nécessaires à l'agriculture pour satisfaire les besoins alimentaires s'avèrent déterminantes et dépendent fortement de l'évolution des productions annuelles de ces terres par hectare au cours de ce siècle (par augmentation des rendements et du nombre de cultures par an sur une même parcelle).

Puis, nous évaluerons les émissions de CO₂ évitées grâce à l'usage des produits bois issus des plantations en remplacement d'autres produits : soit d'énergies fossiles (substitution directe), soit de matériaux dont la production nécessite l'usage d'énergies fossiles (substitution indirecte). Les incertitudes liées à l'ensemble des étapes dans l'évaluation des données quantitatives sont mises en évidence. Les ordres de grandeur des quantités de produits issus de ces plantations nouvelles sont comparés aux débouchés potentiels par région pour ces produits à l'horizon 2050.

Un premier enjeu : les surfaces disponibles pour de nouvelles plantations

Champ de l'étude

La biomasse est le réservoir qui échange le plus de carbone avec l'atmosphère. La photosynthèse permet aux plantes de « capter » chaque année, à l'échelle mondiale, de l'ordre de 120 GtC. Près de 110 GtC sont réémis par le jeu de la respiration des tissus et de la respiration des sols, et de l'ordre de 9 GtC le sont du fait des récoltes, feux, etc¹. Le bilan net d'absorptions par les écosystèmes terrestres est alors estimé à $0,7 \pm 1,0$ GtC, à mettre en face des émissions anthropiques de carbone fossile qui sont, elles, de l'ordre de $6,3 \pm 0,6$ GtC/an en 2000. A titre de comparaison, les océans échangent de l'ordre de 90 GtC/an avec l'atmosphère, pour une absorption nette finale de $2,3 \pm 0,8$ GtC/an. L'absorption nette des océans est supérieure à celui des écosystèmes terrestres. Cependant, l'homme interagit peu avec les échanges marins, alors qu'il exerce une action directe sur les écosystèmes terrestres.

On peut distinguer différentes productions de biomasses ; les biomasses alimentaires et des biomasses non alimentaires, ces dernières pouvant rester dans les écosystèmes ou être utilisées pour faire des bioproduits ou des bioénergies

Biomasses alimentaires : Celles-ci peuvent provenir de divers écosystèmes, mais à l'heure actuelle, elles proviennent essentiellement des terres agricoles (terres cultivées ou prairies sur lesquelles on fait pâturer des animaux) et plus rarement des forêts. Elles influencent directement le cycle de CO₂ par les quantités de carbone stockées dans les plantes (en moyenne assez faibles) et dans le sol. Les modifications des pratiques agricoles peuvent modifier les stocks de carbone des sols. Le potentiel d'action sur les stocks de carbone des plantes annuelles est en revanche très faible.

Les intrants agricoles (engrais, carburant pour les travaux agricoles etc.) augmentent d'une part les émissions de gaz à effet de serre (GES). Mais d'autre part cela augmente les productions de biomasses alimentaires. Il faut donc alors moins

de surfaces labourées pour produire les mêmes quantités de nourriture, ce qui laisse de la place disponible pour des productions de biomasses non alimentaires. En général les augmentations d'émissions de GES résultant de l'utilisation de ces intrants sont inférieures aux gains qui en résultent par ailleurs.

Enfin, les résidus peuvent venir modifier les bilans ; ils peuvent être utilisés pour la production d'énergie et/ou de biomatériaux, améliorer les sols en augmentant leur teneur en matière organique, ou ne pas être valorisés.

Biomasses agricoles pour la production d'énergie : Les mêmes éléments sont encore en jeu mais dominés par les effets de substitution directe de combustibles fossiles.

Biomasses agricoles pour la production de matériaux (papier, textile, isolation, etc) : Outre les mêmes effets que ci-dessus, s'ajoute le stockage prolongé de carbone dans les produits et le remplacement de produits plus émetteurs de CO₂ fossile.

Biomasse des forêts existantes : Les implications dans le cycle du CO₂ sont nombreuses et significatives. Les stocks de carbone dans la végétation et dans le sol sont importants. Les débouchés des produits sont variés et peuvent augmenter les stocks de carbone hors forêt ; les effets de substitution directe ou indirecte peuvent être importants. Il y a moyen d'agir à de nombreux niveaux, ce qui permet d'influencer chacun de ces aspects : on peut modifier les stocks sur pied, les types d'exploitation, avec des effets tant sur les sols, sur les biomasses que sur les types de produits obtenus, les durées de vie des produits, ou le type de valorisation des produits.

Biomasses forestières issues de plantations nouvelles sur des terres agricoles : les mêmes réservoirs sont en jeu, les mêmes leviers, avec en plus le fait qu'il y a des changements d'occupation des terres, ce qui augmente les stocks de carbone dans les biomasses et peut également les augmenter dans les sols, principalement lorsque l'on boise des terres cultivées.

La méthodologie mise en oeuvre dans l'étude présentée ici pourrait s'appliquer à tous types d'écosystèmes et de biomasses gérées par l'homme. N'ayant pas la possibilité de traiter, dans le cadre de cette étude, l'ensemble de ces situations, nous avons choisi de nous restreindre aux plantations forestières nouvelles sur des terres agricoles abandonnées.

Afin d'évaluer l'impact des modes d'exploitation sur le bilan carbone, nous avons retenu, de façon schématique, trois types de plantations ligneuses possibles, avec des modes d'exploitation différents :

- **Des rotations courtes** (correspondant à 20 ans en Europe ou 8 ans en Afrique, par exemple), destinées à produire de l'énergie ou alimenter l'industrie de la trituration (papiers, cartons, panneaux). Aucune intervention sylvicole n'est réalisée entre les récoltes. Les durées de rotation détaillées selon les régions sont présentées en annexe I.

- **Des plantations à rotations longues** (de l'ordre de 80 ans en Europe par exemple), destinées à produire du bois d'oeuvre (en particulier des sciages). Des éclaircies sont réalisées tous les 10 ans, au cours desquelles on prélève 10% de la biomasse aérienne.

- **Des plantations sans exploitation** pour lesquelles l'objectif n'est pas de récolter des produits. Aucune intervention sylvicole et aucune récolte n'y sont prévues.

Une fois plantée selon l'un de ces trois modes, une parcelle reste définitivement gérée de la même manière. De plus, à partir de 2050, on considère qu'aucune surface agricole nouvelle n'est mise en plantation, ceci afin d'appréhender les effets à plus long terme des actions menées jusqu'en 2050.

Perspectives d'occupations des terres par l'agriculture

Situation actuelle

La carte proposée *figure 1* indique la répartition actuelle des terres dans le monde. Trois grandes catégories y sont représentées : les terres agricoles (correspondant aux terres cultivées ainsi qu'aux prairies pâturées), les surfaces en herbe non pâturées et les surfaces boisées. S'ajoute une catégorie « autres » comprenant les déserts, les surfaces glacées, etc. Les surfaces mixtes (par exemple les savanes) comprenant des arbres et des zones en herbes sont comptabilisées en prairies pour la partie en herbe et en forêts pour le reste.

Selon les catégories définies dans le modèle Image pour le GIEC (voir description en page 54), les surfaces boisées en 2000 représentent 35% des terres, et les terres agricoles, 25%.

Facteurs déterminant les occupations des terres

Terres cultivables

La pression sur les terres est avant tout le résultat d'une pression agricole. Le facteur déterminant dans l'occupation d'une terre est donc en premier lieu l'aptitude de celle-ci à recevoir ou non des cultures. Pour 1,4 milliard d'hectares de terres mises en culture actuellement (soit 11 % de la surface des terres sur la planète), la FAO estime qu'il reste encore 2,8 milliards d'hectares qui seraient plus ou moins aptes physiquement à la mise en culture pluviale. Toutefois, 45 % de celles-ci sont actuellement couvertes de forêts, 12 % sont des zones protégées, et 3 % occupées par l'homme. Bien entendu, ces terres-ci ne peuvent être classées comme *a priori* « disponibles », même si la pratique peut conduire à les voir colonisées par l'agriculture. D'autre part, la répartition géographique des terres classées cultivables est une source importante de variabilité entre les régions (voir figure 2).

Figure 2 : Superficies de terres cultivées et aptes à la culture, par grandes régions - Area of cultivated and arable land in the main regions

Source : FAO, 2002.

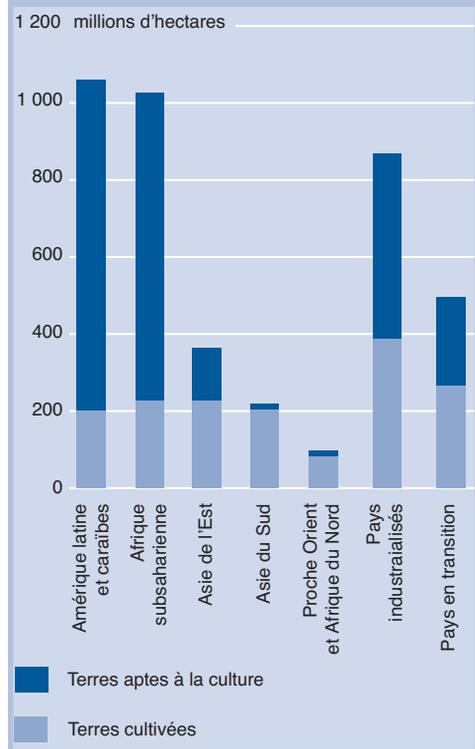


Figure 1 : Répartition des terres dans le monde en 2000 - World land use in 2000 - Source : IMAGE

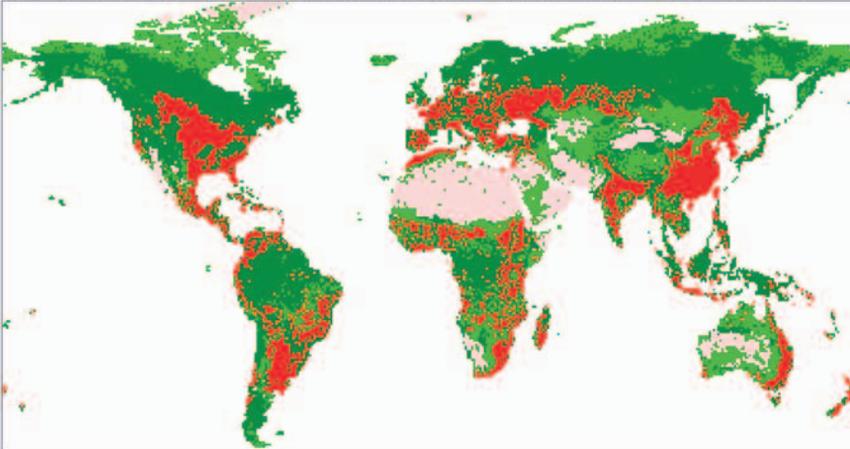


Figure 10 : Carte des usages des terres en 2050 sous le scénario A2 (faibles disponibilités en terres)
Map of land use in 2050 under scenario A2 (low land availability)

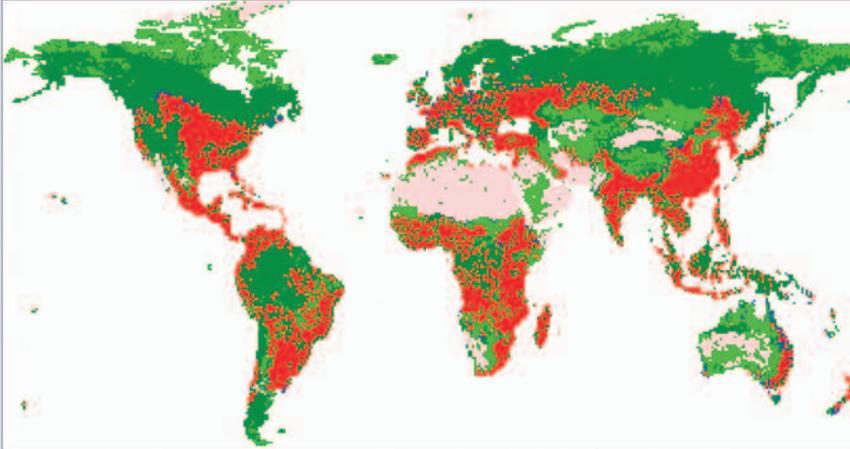
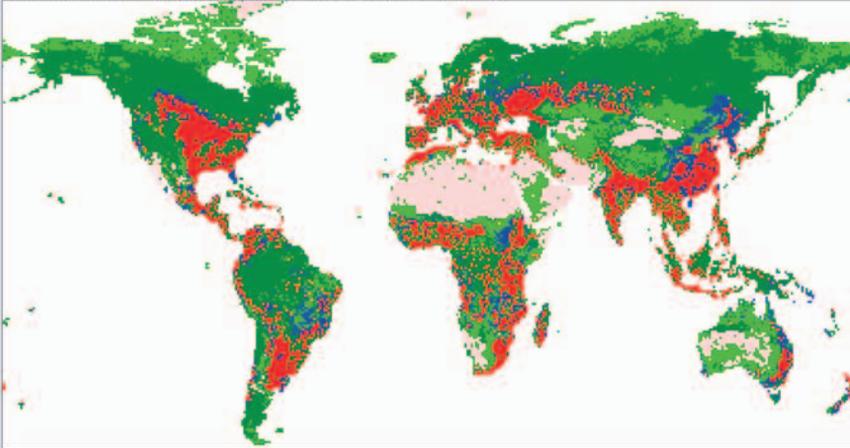


Figure 11 : Carte des usages des terres en 2050 sous le scénario B1 (fortes disponibilités en terres)
Map of land use in 2050 under scenario B1 (high land availability)



■ Terres cultivées ou pâturages ■ Surfaces en herbe (hors pâtures) ■ Autres
■ Plantations forestières ■ Surfaces boisées

Cette variabilité est encore plus explicite lorsque l'on sait que plus de la moitié des réserves de terres « cultivables », non mises en culture sont réparties dans seulement sept pays (l'Angola, l'Argentine, la Bolivie, le Brésil, la Colombie, la République démocratique du Congo, et le Soudan) et qu'à l'autre extrême, certains pays n'ont plus de terres disponibles (voire ont déjà des cultures sur des terres classées inaptes à l'agriculture pluviale, grâce à l'irrigation ou la confection de terrasses par exemple). Dans les régions où les terres sont les plus disponibles, l'incitation pour augmenter les productions par hectare est moins forte. Lorsque les terres sont plus rares, l'augmentation de ces productions agricoles et la croissance démographique jouent alors un rôle très important sur les tensions éventuelles à venir. Le moment de la transition démographique influera également sur la disponibilité à venir de terres agricoles pour des usages non alimentaires.

Croissance de la demande alimentaire

La croissance de la demande mondiale en produits végétaux pour l'alimentation humaine ou animale est le résultat de la combinaison de plusieurs éléments².

- **La démographie** est évidemment déterminante. Les tendances observées et attendues sont une baisse générale, mais inégale, de la mortalité, et une baisse observée ou attendue de la fécondité. Les taux d'accroissement annuels des populations qui en découlent sont des courbes en cloche. Le maximum de ces courbes a pu être atteint dans les années 50 ou avant (Amérique du Nord, Europe, Océanie), dans les années 60 (Amérique latine), 70 (Asie), ou 80 (Afrique). En moyenne, la transition démographique mon-

diale a eu lieu vers les années 1970. Toutefois elle n'est pas encore atteinte partout. De plus, compte tenu de la jeunesse des populations les plus fécondes, les effets de la transition démographique mettront du temps à se faire sentir en certains lieux. La baisse de la mortalité observée risque d'être fortement remise en questions par la pandémie de SIDA, dans les pays d'Afrique australe. À l'horizon 2050, les chiffres moyens proposés par les Nations Unies donnent un accroissement de 4,7 milliards d'habitants (dont la moitié inévitable, c'est à dire inscrite dans la pyramide des âges actuelle).

- D'autre part, une **concentration des populations** dans des mégapoles est à attendre, même si la croissance des populations rurales des pays les moins développés semble devoir se poursuivre encore jusque vers 2015.

- **Les besoins énergétiques alimentaires** de chaque individu varient en fonction des caractères physiques de ceux-ci. Ainsi, à l'échelle d'une population, ils sont conditionnés par la répartition en classes d'âges, l'évolution de la corpulence moyenne, ou l'activité (elle-même fonction du taux d'urbanisation). L'exemple du vieillissement des populations est intéressant pour illustrer les facteurs influençant les besoins énergétiques moyens d'une population. Ce vieillissement est dû à l'augmentation de l'espérance de vie et à la diminution du nombre d'enfants par femme. Ces deux facteurs ont des effets opposés sur les besoins énergétiques moyens de ces populations : les enfants ayant des besoins moins importants, la diminution de la proportion d'enfants entraîne une augmentation du besoin moyen par tête. À l'inverse, les personnes âgées ont elles aussi des besoins moins importants. L'augmentation de leur nombre va tendre à diminuer les besoins moyens de la population.

- La part de l'alimentation carnée dans le bol alimentaire d'un individu est aussi très importante, puisqu'une calorie consommée par l'homme sous forme de viande a nécessité entre 3 et 7 calories avant de parvenir dans son assiette. Ce qui par ailleurs se traduit par des besoins en terres pour la production alimentaire d'autant plus importants que l'alimentation sera plus carnée.

- Enfin, la demande alimentaire qui s'en suit est en plus influencée par des **aspects culturels, économiques ou sociaux**.

L'ensemble de ces paramètres permet d'établir des estimations de l'accroissement des besoins en énergie d'origine végétale. Le tableau 1 illustre une des estimations de l'évolution des

Tableau 1 :

Augmentation des besoins alimentaires en calories animales et végétales entre 1995 et 2050 (exprimés en énergie d'origine végétale) - Increase in food demand (in calories from vegetables and livestock) between 1995 and 2050

Région du monde	Besoins estimés en 2050 par rapport à ceux de 1995
Afrique	514 %
Asie	234 %
Europe	91 %
Amérique Latine et Caraïbes	192 %
Amérique du Nord	131 %
Océanie	161 %

besoins alimentaires en énergie (en calories d'origine végétale et animale) 1995 et 2050². Ces chiffres, déjà très différents selon les régions peuvent aussi varier énormément au sein d'une même région. En Afrique, notamment, plusieurs pays pourraient, avec les hypothèses retenues, avoir des besoins en 2050 plus de 10 fois supérieurs aux besoins de 1995 !

Surface, rendement, intensité culturale

Une fois l'augmentation des besoins quantifiée, il est possible d'évaluer l'augmentation de la production agricole qui en découle. Celle-ci peut avoir lieu selon trois modalités non exclusives : par l'augmentation des surfaces, des rendements et du nombre de récolte par an sur une même surface (intensité culturale). Depuis les années 1960, les augmentations de récoltes proviennent essentiellement de l'amélioration des rendements (pour 78 %). Les surfaces supplémentaires n'en expliqueraient, elles, que 15%³. Toutefois cela varie beaucoup suivant les diverses régions du monde. Ainsi, l'accroissement des surfaces expliquerait 46 % des augmentations de récoltes en Amérique latine, mais moins de 10 % dans les pays industrialisés. Elle est généralement plus importante dans les régions où plus de terres arables sont disponibles, puisqu'il y a alors moins d'incitations pour augmenter les rendements, ainsi que dans les pays n'ayant pas de politiques agricoles susceptibles de favoriser l'augmentation de ces rendements.

Certains analystes, notamment la FAO, prévoient que les tendances dans les pays en développement devraient se poursuivre. L'expansion des terres agricoles compterait pour 20 % dans l'augmentation des récoltes futures. Cette contribution peut être très variable. Dans les régions ayant beaucoup de terres disponibles (Afrique subsaharienne et Amérique latine), les nouvelles terres agricoles devraient y contribuer plus fortement. Ces évolutions sont considérées comme optimistes par certains. Ceux-ci mettent l'accent sur les limites actuelles et à venir des possibilités d'accès aux intrants (engrais, semences améliorées, motorisation pour les travaux et l'irrigation etc.). Ils insistent aussi sur les problèmes de solvabilité des agriculteurs et des États dans lesquels les tensions seront les plus fortes. D'autres enfin pointent la difficulté de mettre en place des politiques agricoles adéquates, ce qui se traduit par de fortes limitations de l'augmentation des rendements agricoles. Certains analystes pensent également que la disparition ou la réduction des aides à l'agriculture pourrait conduire à l'abandon

des terres les moins productives et donc peut-être à l'augmentation des rendements moyens du pays considéré.

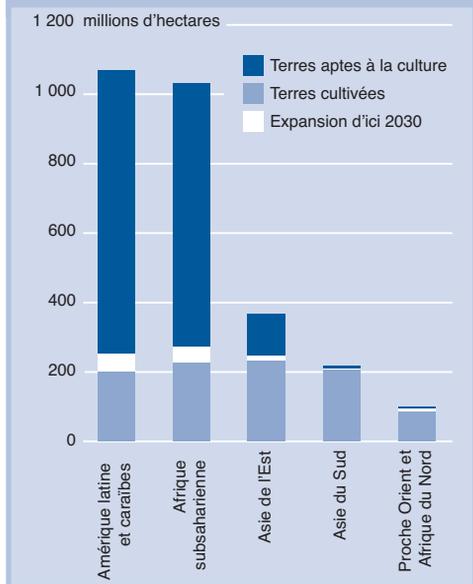
Scénarios prospectifs d'occupation des terres

Accroissement prévu des surfaces cultivées

L'accroissement des surfaces cultivées dépend donc fortement de l'évolution des rendements par hectare des diverses cultures. Les prévisions dans ce domaine sont très variables selon les sources. La FAO⁴ propose une vision assez volontariste de la diffusion des progrès à venir. Pour satisfaire la demande solvable dans les 30 prochaines années, il suffirait d'un accroissement des terres cultivées de seulement 120 millions d'hectares, soit 13 % de la surface cultivée dans les pays en développement (les tensions locales qui perdureront seront plutôt dues à des problèmes locaux ou socio-économiques qu'à un manque global de terres). Plus de 80 % de cet accroissement de surfaces cultivées se produirait en Afrique subsaharienne et en Amérique latine. Dans les autres régions en développement, la marge de manoeuvre est beaucoup plus réduite et la tension plus forte (figure 3).

Figure 3 :
Superficies agricoles actuelles et superficies supplémentaires pouvant être mises en culture d'ici 2030 dans les pays en développement -

Present areas of agricultural land and supplementary areas which could be cultivated up to 2030 in developing countries



Ces augmentations de surfaces s'ajouteront à des réductions des durées des jachères et des augmentations du nombre de cultures par an. Certains sols pourraient cependant se dégrader en l'absence d'accompagnement de pratiques culturales bénéfiques pour les sols (engrais, zéro-labour, irrigation, introduction de légumineuses,...). Là encore, une vision plus réservée consiste à mettre l'accent sur les difficultés actuellement rencontrées dans ces régions. L'accès aux engrais n'est pas toujours facile, de même que l'accès aux techniques, aux matériels, par exemple ; du fait de la pauvreté, des prix plus élevés qu'ailleurs des intrants, d'instabilités politiques presque structurelles ou encore d'absence de politiques agricoles adéquates. Il s'en suit une difficulté à améliorer les rendements et donc une pression plus forte sur les terres, ce qui accroît la demande en nouvelles terres agricoles donc les défrichements, réduisant ainsi les stocks de carbone dans les biomasses et dans les sols.

Les pays industrialisés, dont la croissance démographique sera faible, et dont la demande calorique par habitant est déjà élevée et fortement assurée par la viande, verront leurs besoins alimentaires peu augmenter, voire diminuer. Étant donnés les coûts de production importants, leurs surfaces agricoles devraient stagner voire diminuer, grâce à une légère amélioration des rendements et aux importations de produits. Un régime moins carné permettrait également de réduire les surfaces nécessaires pour satisfaire les besoins alimentaires. Les pays de l'Europe centrale, du fait de leur récente ou prochaine adhésion à l'Union Européenne, devraient en revanche voir leurs rendements augmenter très significativement. De ce fait, même s'ils sont amenés à exporter plus, leurs surfaces de terres agricoles pourraient diminuer.

Les autres pressions sur les terres

Outre l'accroissement de la demande de terres agricoles décrit ci-dessus, il existe d'autres mécanismes qui accentuent ou réduisent les pressions sur les terres cultivables. L'expansion démographique s'accompagne d'une expansion de la demande en surfaces à usage non agricole. D'ici 2030, ce sont 100 millions d'hectares de terres agricoles qui pourraient être occupées par l'homme à des fins non agricoles⁵. Les zones d'urbanisation étant historiquement situées sur des terres fertiles (plaines côtières, vallées fluviales, ...), ce sont de bonnes terres agricoles qui sont retirées de la production. Ce phénomène est amplifié par l'exode rural.

Celui-ci libère des terres agricoles, mais ce sont les terres les moins fertiles qui sont abandonnées en premier. L'intensification probable de l'élevage pourrait quant à elle relâcher la demande en pâturages, au profit de mises en culture. Enfin, les conditions socio-économiques locales seront déterminantes. Ainsi, les techniques disponibles et leurs adoptions, les marchés, les aides, et la formation détermineront l'évolution des rendements obtenus et permettront éventuellement de préserver les sols ou de freiner leur dégradation.

Les scénarios prospectifs existants

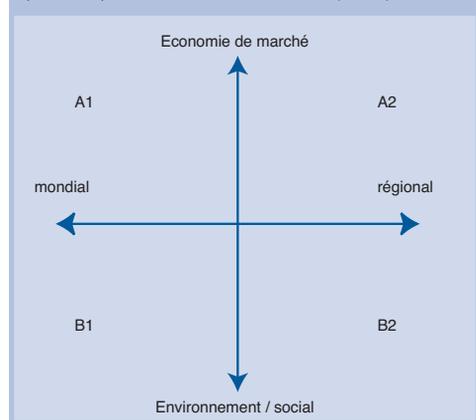
Dans les diverses études prospectives déjà menées, les disponibilités en terres nouvelles et les rendements des productions ligneuses varient énormément,

Cette question, Hoogwijk se l'est posée récemment en cherchant à analyser jusqu'à quel point les productions de bioénergies pourraient satisfaire les besoins énergétiques futurs⁶. Tout dépendra des modes de développement qui seront adoptés. Ses travaux se basent sur les quatre types de scénarios de développement envisagés récemment par le GIEC (Figure 4) détaillés ci-dessous.

Les quatre familles de scénarios proposées (A1, A2, B1 et B2) ont des caractéristiques bien contrastées. Le GIEC a proposé de les situer les uns par rapport aux autres en les plaçant sur deux axes.

L'axe horizontal correspond au degré de mondialisation ou de régionalisation. Les scénarios 1 sont à tendance « mondialisation », les phénomènes en jeu touchant l'ensemble de la planète et les divers pays convergeant fortement dans tous

Figure 4 : Les quatre familles de scénarios du SRES (GIEC) - The four main IPCC Scenarios of the Special Report on Emissions Scenarios (SRES)



les domaines. Les scénarios 2 proposent des évolutions plus régionales, avec une convergence mondiale beaucoup plus lente, et plus faible. L'autre axe correspond à une plus grande mise en valeur de préoccupations **économiques (A1 et B1)** ou de préoccupations plus tournées vers **l'environnement (A2 et B2)**.

Les deux scénarios A1 et B1 étant très ouverts sur le monde, les technologies (y compris agricoles) sont supposées progresser et se diffuser fortement, et les échanges internationaux de marchandises être élevés. La population y atteindrait 8,7 milliards d'habitants en 2050 puis diminuerait et atteindrait 7,1 milliards d'habitants en 2100. Mais dans A1 l'attention à l'environnement, donc aux économies d'énergies est faible, et la consommation de viande forte.

A l'opposé dans B1, les économies d'énergie sont fortes et la consommation de viande plus faible. Dans les scénarios, A2 et B2, les différences entre A et B sont du même type que précédemment, mais les ouvertures sur le monde sont beaucoup plus faibles ; les progrès technologiques diffusent moins bien et les croissances démographiques sont supposées plus élevées (9,4 pour B2 et 11,3 milliards d'habitants en 2050 pour A2). Les croissances des richesses, mesurées par l'évolution du PNB, sont supposées plus faibles que pour A1 et B1.

Selon Hoogwijk, dans le scénario B1, le plus favorable à la réduction des émissions de GES, les surfaces agricoles nécessaires à la satisfaction des besoins alimentaires diminuent et passent de 3,1 milliards d'hectares à 1,6 milliard d'hectares en 2100. Les biomasses pourraient y satisfaire 100% des besoins énergétiques à la fin du siècle.

En revanche dans le scénario A1, les besoins en terres pour la satisfaction des besoins alimentaires augmentent et passent de 3,1 milliards d'hectares à 4,2 milliards d'hectares. Les biomasses ne peuvent alors ; au mieux, satisfaire que 20% des besoins énergétiques. Il faudra en outre plus de terres qu'aujourd'hui pour satisfaire les besoins alimentaires, donc défricher des forêts ou labourer des prairies. Ce qui conduit à déstocker du carbone et va donc l'encontre du but recherché dans la lutte contre le changement climatique.

Dans les scénarios A2 et B2 les terres disponibles pour des cultures énergétiques seront moins importantes. La satisfaction des besoins énergétiques sera donc aussi plus difficile.

La description plus précise des familles de ces scénarios, en particulier de B1 et A2 sur lesquels s'appuie notre travail, figure en annexe II.

Précédemment Johansson et al.⁷ pensaient qu'il serait possible de consacrer 429 millions d'hectares de terres agricoles en 2050 pour la production de biomasses à des fins énergétiques afin de lutter contre le changement climatique. Les scénarios LESS (Low CO₂ Energy Supply System) publiés dans le second rapport du GIEC (1996) montrent que l'on pourrait stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère en procédant tout d'abord à un formidable effort d'accroissement de l'efficacité énergétique et d'économies d'énergie sans lesquels rien n'est possible. Quels que soient les scénarios – des contributions plus ou moins volontaristes en énergies renouvelables, en charbon ou en énergie nucléaire, et plus ou moins de stockage géologique de CO₂ – il faudra recourir massivement aux biomasses pour la production d'énergie.

En admettant un effort important de recherche pour accroître les productivités des plantes, les surfaces supplémentaires à consacrer aux productions de biomasses devraient atteindre de l'ordre de 83 millions d'hectares dès 2025, puis 572 millions d'hectares en 2100, c'est-à-dire de l'ordre de 12% des terres cultivées et des pâturages du globe. En 2050 il faudrait trouver entre 50 et 200 millions d'hectares en Amérique latine, quelques millions à 50 millions d'hectares en Afrique compte tenu d'une croissance plus faible de la demande énergétique (car le potentiel leur paraissait plus important), de quelques millions à 50 millions d'hectares d'une part en Asie et d'autre part en Amérique du Nord et enfin de l'ordre d'une dizaine de millions d'hectares en Europe. Notons aussi que pour simplifier le débat et ne pas interférer avec les politiques à mener pour préserver la biodiversité forestière ou les approvisionnements des industries du bois, les auteurs des scénarios LESS avaient fait le choix de ne produire de biomasses qu'en dehors des forêts existantes, ce qui supposait évidemment d'augmenter fortement les productivités des terres actuellement cultivées et les productivités des biomasses par hectare.

Fisher et al.⁸ vont jusqu'à estimer que plus de 2,3 milliards d'hectares pourraient être plantés en 2050, mais en prenant en compte la possibilité de boisements de terres très dégradées à faibles potentiels de production. Il n'est pas certain que l'on puisse qualifier ces terres de terres agricoles...

Les rendements moyens retenus varient beaucoup : de 3 ou 4 tonnes de matière sèche (tMS)

par hectare et par an⁹ pour les uns à 30 tMS/ha/an¹⁰. Ceux-ci dépendent évidemment des types de terres que l'on prend en considération et des potentiels de progrès des rendements des terres forestières, donc aussi de progrès dans la sylviculture qui peut s'accompagner en partie d'utilisation d'engrais comme au Brésil, en Scandinavie ou dans les Landes, ainsi que par des perspectives d'augmentation des rendements par de meilleurs choix de provenances, de croisements contrôlés etc.

Choix de scénarios prospectifs

Notre travail se basera sur le modèle Image proposés par le RIVM au Pays Bas¹¹ qui le seul à disposer de scénarios d'occupation des terres avec une spatialisation locale très précise pour l'ensemble du globe et basé sur les scénarios proposés par le GIEC (A1, A2, B1 et B2) mentionné dans le paragraphe précédent.

Le modèle IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment¹²) a pour objectif de proposer un cadre dynamique complet pour le changement global d'ici 2100. Des mises en oeuvre du modèle sont proposées, fondées sur les quatre scénarios du GIEC. Nous avons retenu les résultats du module d'usage des terres de ce modèle comme base quantitative de l'ensemble des données d'usage des terres que nous utilisons dans le cadre de cette étude. Cette base a été analysée et adaptée, comme décrit plus loin, lorsque les résultats semblaient en contradiction avec l'analyse des tendances attendues. A l'échelle mondiale, l'évolution des occupations des terres pour les scénarios A2 et B1 que nous avons retenus est indiquée *figure 5*.

Les occupations des terres agricoles des scénarios A2 et B1 présentent des évolutions très contrastées au travers du modèle IMAGE, c'est pourquoi nous les avons retenus. Ils traduisent bien les écarts d'occupations des terres entre les analyses qui prévoient une progression forte des rendements agricoles et celles qui sont plus réservées sur cette progression. La famille B1 correspond à un monde où les progrès dans les rendements sont les plus importants. L'augmentation des surfaces cultivées entre 2000 et 2030 des pays en développement qui en découle est estimée à 17,6 % (soit 0,5 % / an). C'est très proche de l'analyse « hauts rendements » présentée plus haut, qui avançait le chiffre de 13 % (soit 0,4 %/an). La famille A2, quant à elle, prévoit une augmentation des surfaces cultivées à l'horizon

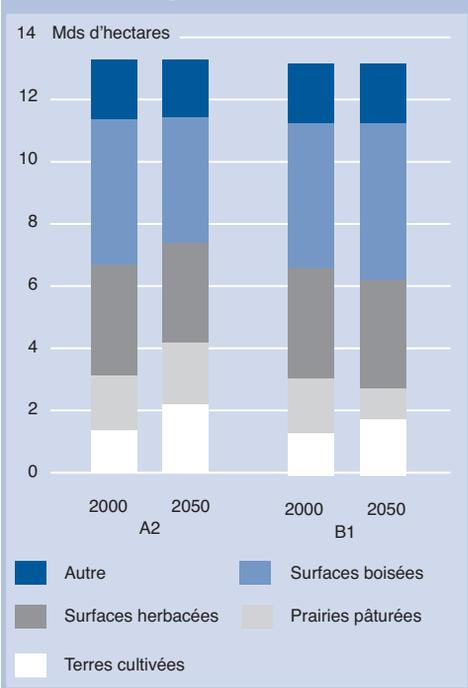
2030 de 35 % (soit 1 %/an). Il faut toutefois noter que cet écart est plus imputable, dans le modèle IMAGE, à la différence de population prévue par les deux scénarios (près de 30 % d'écart), qu'à la différence observée dans les rendements (techniques, engrais, etc). Les autres aspects (économie, énergie, ...) des deux scénarios placent le scénario B1 dans une moyenne « raisonnablement optimiste » par rapport à d'autres modèles, alors que le scénario A2 est beaucoup plus extrême.

Estimation des terres agricoles disponibles pour des plantations suivant deux scénarios

Terres disponibles pour des plantations forestières nouvelles

Dans la pratique, l'affectation de terres à des plantations dépend de nombreux facteurs socio-économiques, tendant à rapprocher l'offre de la demande. Compte tenu de la quantité de paramètres et d'incertitudes, l'établissement de courbes d'offre et de demande à l'échelle mondiale sur 50 ans n'est pas réaliste. Aussi, la plupart des études relatives à

Figure 5 :
Evolution des surfaces des divers biomes retenus, en fonction de deux scénarios A2 et B1, selon IMAGE - Changes of biome areas under IPCC scenario A2 and B1 according to IMAGE



la biomasse se focalisent-elles sur certains aspects de l'une ou l'autre de ces composantes (évaluation d'un potentiel physique de terres disponibles, évaluation de quantités de terres nécessaires en fonction de besoins, etc.)¹³.

L'approche retenue dans cette étude se situe du côté de l'offre. Elle s'effectue en deux temps : choix d'un scénario global d'occupation des terres et définition de celles qui sont déclarées « disponibles » pour être plantées. Le scénario d'occupation des terres donnera des éléments qui, sous certaines hypothèses, ou selon certains paramètres, pourront être considérés comme probables. Les plantations sont alors réalisées sur des terres « disponibles ». *Une terre agricole ne sera considérée comme disponible pour des plantations forestières que si elle n'entre pas en concurrence avec un autre usage de celle-ci par l'homme (essentiellement pour l'alimentation, ou pour des infrastructures)*. Les résultats obtenus sont mis en regard des scénarios énergétiques et de consommation, afin d'évaluer les ordres de grandeur en jeu, mais pas dans l'objectif d'équilibrer offre et demande. *A priori* deux types de terres peuvent satisfaire ce critère.

Les terres abandonnées par l'agriculture. L'usage agricole est pris ici au sens large : terres cultivées et prairies pâturées. Leur abandon peut avoir lieu, soit parce que la demande agricole (locale et pour l'exportation) est satisfaite avec les autres terres, soit parce que les terres n'offrent plus une fertilité suffisante pour un usage agricole. N'entrent pas dans ces surfaces celles abandonnées au profit de l'urbanisation.

Les surfaces herbacées non utilisées par l'agriculture. Elles sont très importantes (de l'ordre de 3 milliards d'hectares soit un peu moins de 25 % des terres, c'est à dire du même ordre que les terres cultivées plus les terres pâturées). Ces surfaces sont de loin les plus vastes. Plusieurs facteurs peuvent expliquer qu'elles ne soient pas utilisées par l'agriculture : l'infertilité (due à la terre, ou au climat), l'inexploitabilité, l'inaccessibilité, ou simplement la satisfaction des besoins locaux par ailleurs. La possibilité d'établir des plantations forestières sur ces terres dépend aussi dans une certaine mesure de ces facteurs, mais certains ne s'appliquent toutefois que de manière moins forte. L'inaccessibilité et les débouchés restent des obstacles pour des plantations que l'on souhaite exploiter. C'est moins le cas quand il s'agit de plantations à unique objectif de stockage de carbone sans exploitation.

La fertilité n'est pas vue de la même manière si l'on souhaite un très fort rendement rapidement (type bois-énergie) ou si l'on privilégie du bois d'oeuvre à croissance lente.

Terres agricoles retenues pour des plantations

Dans le cadre de cette étude, nous choisissons de ne considérer comme disponibles que les terres abandonnées par l'agriculture, que ce soient les anciennes terres cultivées ou les anciennes prairies pâturées. On sait en effet que ces terres sont accessibles à l'homme, dans des conditions d'exploitation qui ont déjà été éprouvées (mais pas forcément aptes à être mécanisées). Si l'on souhaitait prendre en compte d'autres terres, il faudrait évaluer les contraintes réelles de mise en exploitation selon des critères adéquats, ce que nous n'avons pas fait ici. Dans la pratique, il se peut effectivement que d'autres terres soient utilisées en priorité pour la plantation, par exemple des savanes peu parcourues, pour peu que l'on y mène une voie de chemin de fer, ou pour peu que la population vienne à s'en rapprocher. Notons aussi qu'au sein d'une région, il peut y avoir abandon de terre en même temps qu'augmentation de la surface agricole totale. C'est notamment le cas si des terres sont abandonnées pour cause de perte de fertilité.

Nous retiendrons les deux scénarios d'évolution du monde, B1 et A2 qui, modélisés par IMAGE, mènent à des libérations de terres par l'agriculture respectives de 938 et 142 millions d'hectares en 2050. L'amplitude entre les deux scénarios est très importante, avec un facteur multiplicatif de près de 7 ! Il s'agit donc là du premier enjeu majeur lié à la problématique de la séquestration et de la substitution : l'évolution des productions agricoles par hectare sera déterminante.

Si les mêmes mécanismes qui ont eu cours jusqu'à présent dans le cadre de la « révolution verte » se perpétuent et gagnent les zones les moins avancées, on peut espérer une libération importante de terres pour des plantations forestières. Si, à l'inverse, les progrès ne sont pas au rendez-vous, les disponibilités deviennent bien plus modestes.

Le modèle utilise un découpage du monde en 17 régions. Toutefois, afin de rendre les résultats plus synthétiques, plusieurs de ces régions seront souvent regroupées par la suite. Les cartes données *figures 6 et 7*, représentent les terres qui seront abandonnées d'ici 2050, selon les deux scénarios implémentés par IMAGE. Ces deux scénarios seront

appelés « fortes disponibilités » pour B1 et « faibles disponibilités » pour A2. Les dynamiques d'abandon de terres proposées par IMAGE ont été confrontées à une analyse qualitative par région afin de valider les ordres de grandeur obtenus. Les chiffres donnés

par IMAGE ont été retenus tels quels, sauf pour l'Europe de l'Ouest, pour laquelle il apparaissait que la tendance exportatrice était importante, ce qui amplifiait exagérément la pression sur les terres agricoles.

Figure 6 : Surfaces abandonnées par l'agriculture entre 2000 et 2050 selon IMAGE sous le Scénario B1 (fortes disponibilités en terres). Les surfaces abandonnées sont représentées par des points noirs.

Land abandoned by agriculture (black dots), between 2000 and 2050, under Scenario B1 (high land availability), according to IMAGE.

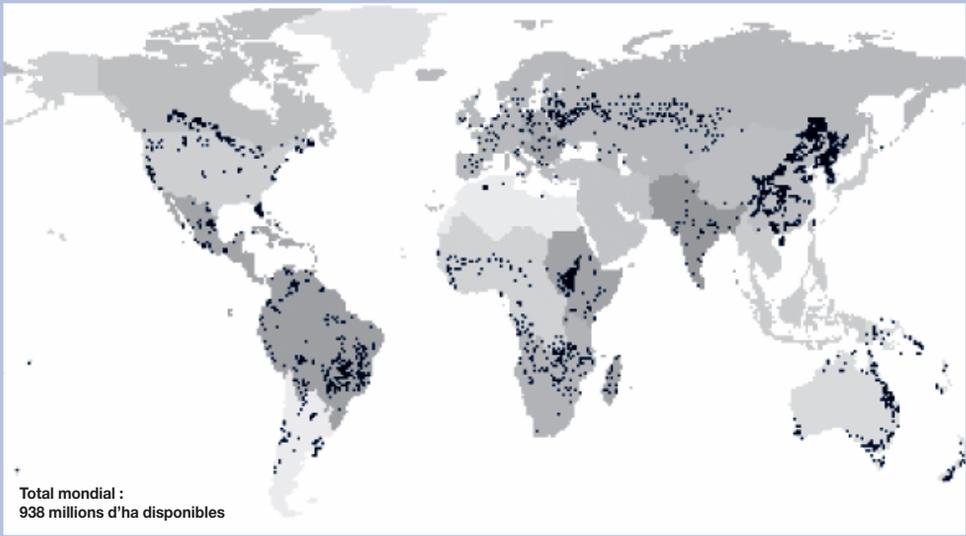


Figure 7 : Surfaces abandonnées par l'agriculture entre 2000 et 2050 selon IMAGE sous le Scénario A2 (faibles disponibilités en terres). Les surfaces abandonnées sont représentées par des points noirs.

Land abandoned by agriculture (black dots between 2000 and 2050 under Scenario A2 (low land availability), according to IMAGE



Dans le cas des fortes disponibilités en terres, la Chine, l'Afrique et l'Amérique du Sud sont les grandes régions au plus fort potentiel (totalisant les deux tiers du potentiel mondial en 2050, *figure 8*). L'Afrique ne vient rejoindre les deux autres régions que vers la fin de la période 2000-2050. La majorité des terres disponibles d'Amérique du Sud se trouve au Brésil. La Chine, quant à elle présente des disponibilités au Sud et à l'Est du pays. Le reste de l'Asie et l'Europe constituent, à l'inverse, les régions aux disponibilités les plus faibles. Les dynamiques de l'Amérique du nord et de l'Océanie et de l'ex-URSS sont moyennes. Les deux premières sont concentrées en début de période 2000-2050, la troisième en fin de période.

Dans le cas des faibles disponibilités en terres, les écarts relatifs entre régions sont moins importants (*figure 9*). Cela s'explique notamment par le fait que les régions au plus fort potentiel en cas de bons rendements sont celles pour lesquelles les incertitudes sur ces rendements sont les plus grandes. La région au plus fort potentiel est l'Océanie (principalement l'Australie) qui totalise près d'un tiers des surfaces disponibles en 2050. Le potentiel de l'Amérique du

Sud s'effondre. Dans ce scénario, en effet, non seulement les rendements agricoles n'atteignent pas les niveaux de l'autre scénario, mais cette région est appelée à produire plus de céréales pour l'exportation vers l'Asie notamment. Il en résulte une pression importante sur les terres agricoles et un taux de libération très faible. Les potentiels des autres régions (hormis pour l'Asie hors Chine qui demeure la plus basse) sont assez comparables entre eux vers 2050. Les dynamiques de libération de terres agricoles y sont à peu près réparties sur la période 2000-2050, sauf pour l'Afrique qui, une fois encore, ne rattrape les autres régions que vers la fin de la période 2000-2050.

Les *figures 10 et 11* (page 49) indiquent les situations d'occupation des terres en 2050 selon les deux scénarios d'évolution agricole. Les données par région sont présentées en page suivante.

Figure 8 : Evolution des libérations de terres agricoles entre 2000 et 2050 selon IMAGE, pour le scénario B1 (fortes disponibilités en terres)

Agricultural land becoming available, between 2000 and 2050, according to IMAGE, under Scenario B1 (high land availability).

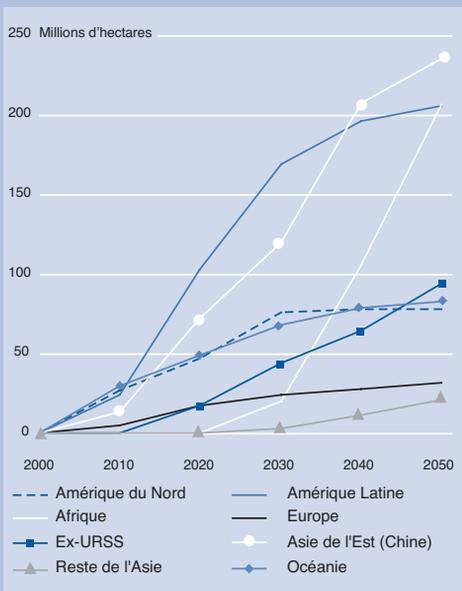
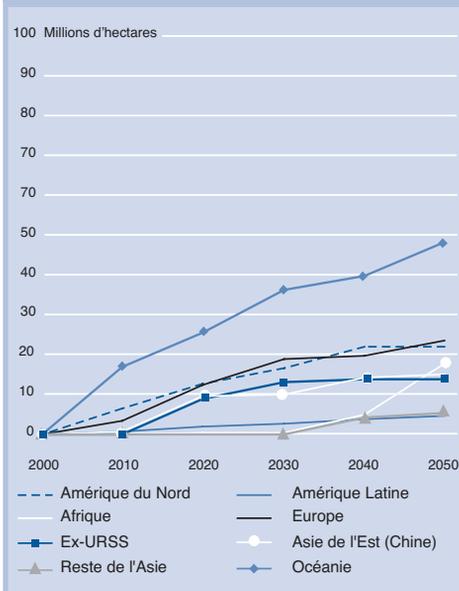
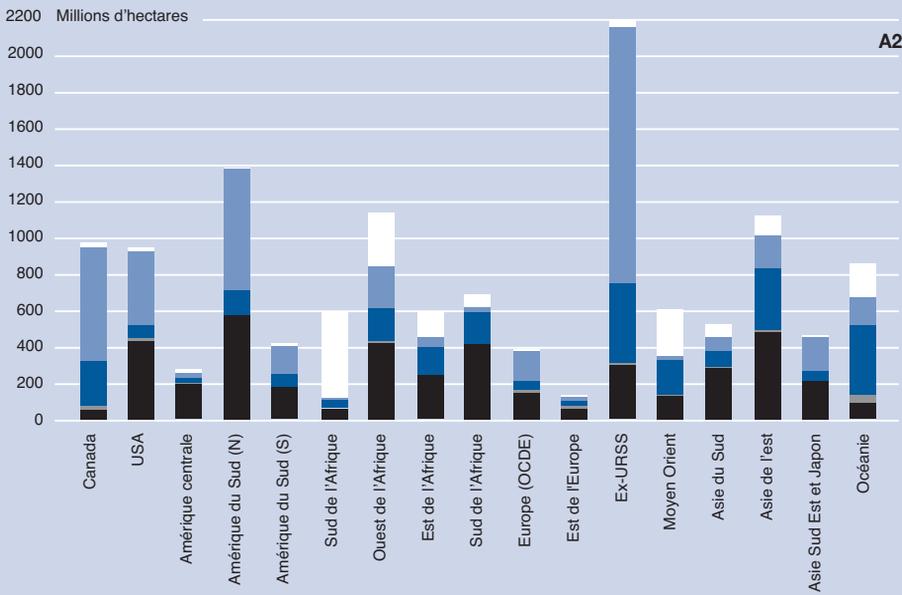
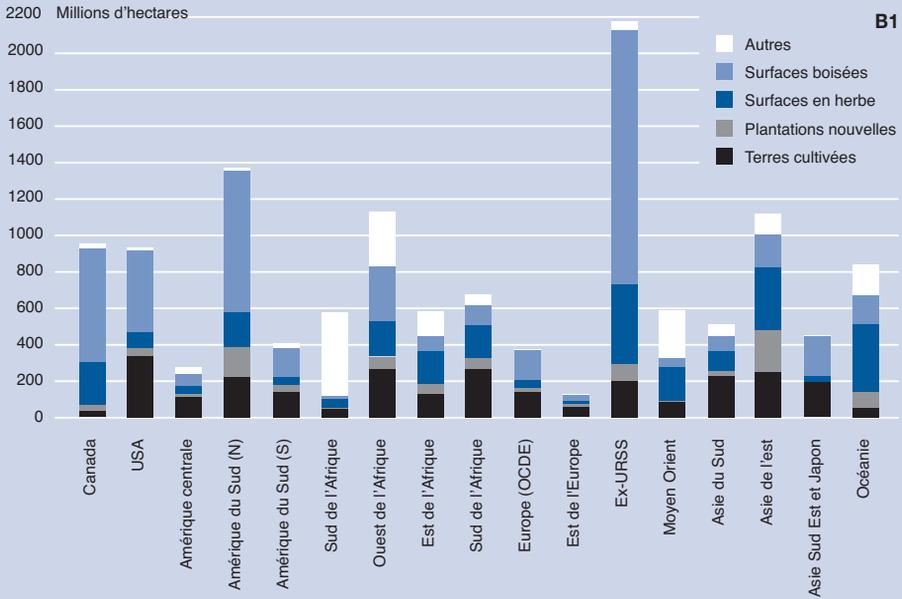


Figure 9 : Evolution des libérations de terres agricoles entre 2000 et 2050 selon IMAGE, pour le scénario A2 (faibles disponibilités en terres)

Agricultural land becoming available under scenario A2 (low land availability), between 2000 and 2050, according to IMAGE



Figures 10 et 11 bis : Usage des terres en 2050 pour les scénarios A2 et B1 - Land use in 2050



Augmentation du stock de carbone dans les plantations, selon les scénarios d'exploitation forestière

Une fois identifiées les terres disponibles pour la plantation forestière, il s'agit d'évaluer le potentiel de stockage de carbone correspondant. Trois modes de gestion différents sont retenus pour cette évaluation, basée sur un modèle simple du fonctionnement des écosystèmes. L'usage des produits de l'exploitation forestière n'est pas détaillé ici, mais fait l'objet de la partie suivante.

Fonctionnement simplifié des écosystèmes

Cycle du carbone

Le carbone est présent sur la planète dans trois réservoirs principaux : l'atmosphère, les océans et le réservoir terrestre. Dans l'**atmosphère**, le carbone est sous forme gazeuse, principalement du CO₂, responsable des deux tiers des impacts de l'ensemble des gaz à effet de serre sur le potentiel de réchauffement (excepté l'eau, les aérosols etc.). Dans les **océans**, le carbone est présent sous forme dissoute ainsi que dans la biomasse océanique (phytoplanctons). Enfin, dans le **réservoir terrestre**, le carbone se retrouve à la fois au dessus de la surface du sol, dans la biomasse vivante et morte, et sous la surface du sol, que ce soit dans la biomasse souterraine, dans les horizons superficiels du sol, et dans des divers niveaux de la croûte terrestre sous forme de gisements de carbone fossile (pétrole, gaz, charbon, roches etc.).

Du carbone est échangé entre ces différents réservoirs. Ces échanges peuvent modifier ou non l'état du carbone et s'accompagnent ou non de production d'énergie récupérable. Les principaux échanges font intervenir le réservoir atmosphérique. **Entre l'atmosphère et les océans**, le CO₂ peut être dissout, ou absorbé par la biomasse

océanique. Les processus en jeu sont complexes, non linéaires. Ils dépendent de la température, ainsi que de la concentration atmosphérique en CO₂. Ces transferts océan-atmosphère sont primordiaux dans la régulation des concentrations de CO₂, mais ne font pas l'objet de cette étude.

Entre l'atmosphère et les réservoirs terrestres, il n'existe actuellement qu'un seul flux de capture du carbone depuis l'atmosphère vers les réservoirs terrestres à une échelle de temps « humaine » : c'est l'absorption du CO₂ gazeux par la biomasse vivante par photosynthèse (les potentiels futurs de capture et de stockage géologique de CO₂ pourraient en constituer un second) Le carbone peut ensuite être transféré au sol ou/et être réémis vers l'atmosphère, directement ou indirectement, après un temps de stockage plus ou moins long. Sur les mêmes pas de temps, les flux d'émissions de carbone vers l'atmosphère sont plus variés. Tout d'abord, la *respiration autotrophe* des végétaux émet directement sous forme de CO₂ environ la moitié du carbone absorbé par photosynthèse. Puis un processus naturel de *décomposition des matières organiques* dans le sol et dans les zones humides a lieu. Il induit un dégagement de CO₂ (essentiellement des sols, c'est la *respiration hétérotrophe*) ou de CH₄, lors des décompositions anaérobies (essentiellement en zones humides, rizières, décharges et aussi du fait du rumen des ruminants). La combustion de la biomasse (incendies accidentels ou combustion par l'homme pour la production d'énergie) représente une oxydation plus rapide du carbone qui dégage également du CO₂.

Les émissions issues de la biomasse font partie d'un cycle relativement court, de l'ordre de l'année ou du siècle. L'exploitation du carbone fossile (exploitation et combustion de pétrole, gaz, char-

bon, fabrication de ciment...) met en jeu un cycle beaucoup plus long, puisque ces réserves se sont constituées sur des pas de temps géologiques. Le carbone est alors émis principalement sous forme de CO₂, mais aussi sous forme d'autres gaz à effet de serre en quantités plus faibles, mais au potentiel de réchauffement global¹⁴ supérieur à celui du CO₂. Il s'agit d'émissions exclusivement anthropiques, sur des durées très courtes relativement au cycle complet. Un dernier type d'émissions non anthropiques, irrégulier et parfois significatif est celui dû à l'activité volcanique.

Schématisation des échanges spécifiques à la biomasse

L'écosystème seul est constitué de deux grands réservoirs, la **biomasse vivante** et le **carbone souterrain** (incluant la biomasse aérienne morte mais excluant les racines vivantes). Trois flux de carbone en définissent le fonctionnement :

- un flux net de l'atmosphère vers la biomasse vivante, bilan de la photosynthèse moins la respiration autotrophe, c'est la *production primaire nette* (PPN).
- un flux de la biomasse vivante vers le réservoir souterrain, correspondant à la *mortalité* de la biomasse.
- un dernier flux dirigé vers l'atmosphère, qui correspond à la *décomposition* de la matière organique en gaz. Il est composé d'un flux de carbone souterrain vers l'atmosphère (la *respiration hétérotrophe*, Rh), auquel s'ajoute un flux de la biomasse vers l'atmosphère dû aux incendies.

Dans la pratique, la variation de stock de carbone, donc les émissions nettes, de ce système résulte de la production primaire nette (PPN) moins la

décomposition. Cette valeur est appelée *production nette de l'écosystème* (PNE). A l'équilibre, sans intervention de l'homme donc, cette production nette de l'écosystème est nulle. A très long terme elle pourrait cependant se traduire par de très faibles augmentations dans les sols de stocks de carbone récalcitrant à la décomposition. Nous n'en tenons pas compte ici. Ce fonctionnement est illustré par la partie (a) de la *figure 12*.

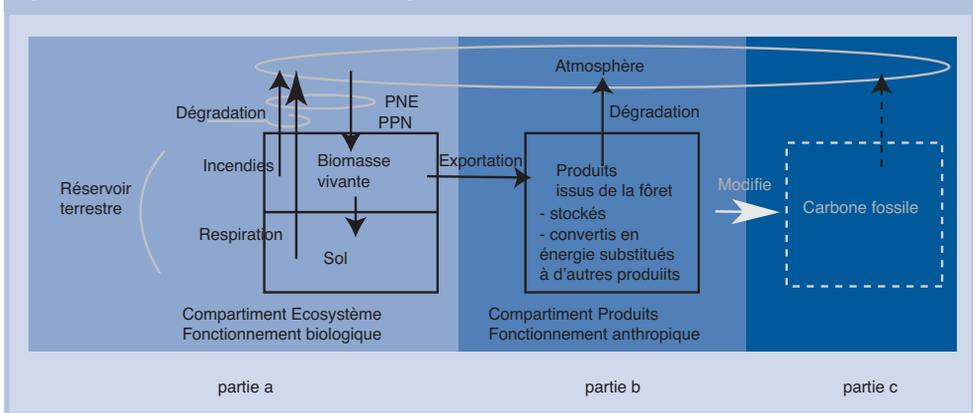
En revanche si des produits ligneux sont récoltés, un flux supplémentaire de carbone issu de la biomasse vient alimenter un nouveau compartiment, le compartiment « produits » (partie (b) de la *figure 12*). Si un régime d'équilibre s'installait alors, la production nette de l'écosystème ne serait plus nulle mais égale à la quantité moyenne de produits exportés.

Le système complet doit donc prendre en compte la dynamique du compartiment produits, qui est étudiée dans le chapitre suivant. L'écosystème, dont le fonctionnement est principalement biologique, correspond donc à la « pompe » à CO₂, alors que les produits, au fonctionnement uniquement anthropique, permettent une émission différée dans l'atmosphère du carbone capté par l'écosystème et peuvent influencer les émissions de carbone d'origine fossile par ailleurs. In fine le gain net pour l'atmosphère dépend en outre de l'utilisation des produits issus de la forêt ; ceux-ci peuvent permettre d'économiser et /ou de remplacer différents types de combustibles fossiles, ou encore être mis en décharge.

Principes du modèle utilisé

Il convient de tenir compte à la fois du stockage de carbone dans la biomasse aérienne, et dans

Figure 12 : Schéma des flux de carbone - Diagram of carbon fluxes



le sol, que ce soit dans la biomasse (racines) ou dans le sol lui-même. Or, si la végétation aérienne est assez facilement mesurable, la partie souterraine est plus délicate à étudier, étant donnée son accessibilité peu aisée¹⁵. De plus, les incertitudes sur le fonctionnement du sol sont grandes, la variabilité spatiale étant très forte à l'échelle même de la parcelle. En moyenne, les couches superficielles varient plus vite que les couches profondes, mais les dynamiques d'échange, parfois très importantes, sont encore mal connues, et dépendent beaucoup de la forme du carbone. C'est donc une modélisation très simplifiée qui est retenue ici, mais qui rend compte toutefois de beaucoup des phénomènes observés.

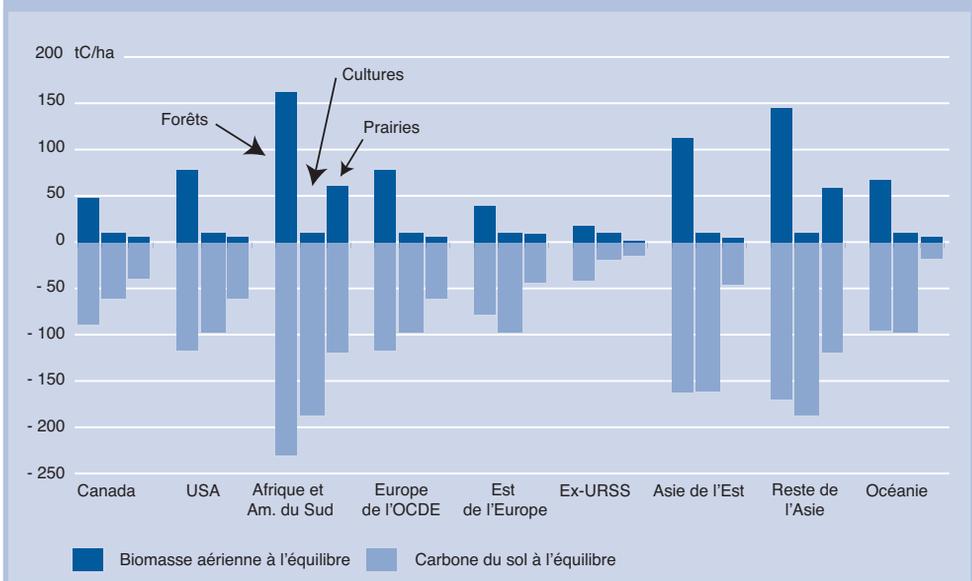
Le modèle LUCY¹⁶ a été adapté pour cette étude. Il utilise 4 biomes (surface boisée, herbacée, cultivée, et surfaces de plantations forestières) et travaille sur les changements d'occupation des terres proposées par le modèle IMAGE. Il intègre des éléments complémentaires¹⁷ sur la période 1700-1990, pour mieux simuler la constitution du réservoir du sol. Les valeurs moyennes de PPN en 1990, de mortalité et de taux de respiration hétérotrophe sont extraites, pour chaque biome et chaque région, du modèle spatialisé de biosphère CASA-SLAVE¹⁸. Les divers flux et stocks de carbone sont alors calculés année après année.

Ordres de grandeur de divers paramètres selon les régions

A l'équilibre, en l'absence d'intervention de l'homme, la quantité de biomasse tend vers une constante, de même que le carbone du sol : la production primaire nette (PPN) s'annule. Si des exportations régulières de produits ont lieu, les valeurs à l'équilibre sont alors plus faibles pour la biomasse et le carbone du sol, alors que la production nette de l'écosystème (PNE) tend vers la moyenne des exportations. La figure 13 indique quelques valeurs de stock de carbone dans la biomasse et dans le sol à l'équilibre dans diverses régions considérées, en fonction des paramètres de PPN, de taux de respiration hétérotrophe, et de taux de mortalité retenus pour le modèle. Il faut noter qu'il s'agit de la biomasse totale, comprenant la biomasse aérienne vivante et les racines vivantes. Soulignons aussi, comme cela a été rappelé dans le troisième rapport du GIEC, qu'il y a de grandes différences pour ces valeurs moyennes suivant les latitudes et les auteurs (GIEC 2001).

De plus pour un biome donné, la variabilité régionale des productions est grande. Les prairies les plus productives le sont près de 10 fois plus que les moins productives. Pour les forêts les différences peuvent également être du même ordre de grandeur. Le différentiel de production entre

Figure 13 : Ordres de grandeur théoriques des stocks de carbone à l'équilibre dans la biomasse (y compris dans les racines) et dans le sol pour des écosystèmes non perturbés - Some approximate theoretical values, at equilibrium, of carbon stocks in biomass (including in roots) and in soils of non disturbed ecosystems



prairies et forêts est lui aussi très variable selon les régions avec un facteur 4 entre les extrêmes. Il en va de même pour les taux de mortalité.

Pour les valeurs de PPN de l'agriculture on a pris des valeurs moyennes par régions. En effet, plus de 80 % (en surface) des cultures ont une production nette qui varie de moins de 10 % par rapport à leur moyenne. Les extrêmes sont les cultures sucrières (dont la PPN atteint 8 tC/ha/an ou plus sous les tropiques) et les légumineuses (PPN 1,8 tC/ha/an)¹⁹. Si les cultures énergétiques étaient prises en compte, il faudrait considérer la valeur élevée de PPN des espèces sucrières.

Variation des stocks et des flux lors de changements d'usage des terres

Approche théorique

Les valeurs à l'équilibre indiquées ici ne peuvent être que théoriques, car les durées nécessaires pour les atteindre sont bien trop longues pour qu'aucun changement n'ait lieu dans l'environnement des parcelles considérées. La situation « normale » est donc dominée par les perturbations. Un changement d'usage des sols comme des plantations sur terres agricoles abandonnées représente évidemment une perturbation importante. L'évolution des réservoirs biomasse et sol est alors la suivante : la biomasse issue de l'occupation précédente est en partie exportée (récolte de bois, des cultures, brûlis...), le reste étant laissé sur place. La biomasse morte augmente alors le stock de carbone du sol. Le stock de biomasse croît dès lors annuellement au rythme de sa production primaire nette diminuée de la mortalité naturelle.

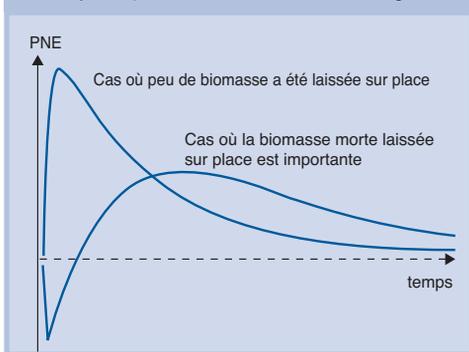
Il en va différemment du carbone du sol. Le premier phénomène important, *non pris en compte*

actuellement par le modèle, est relatif au travail du sol. Un travail modéré aère le sol et stimule l'activité des micro-organismes, accélérant l'oxydation du carbone dans les premières années et induisant donc un pic dans la respiration hétérotrophe. Mais un travail du sol trop important transporte les horizons minéraux profonds en surface, donc ceux dans lesquels les micro-organismes sont les moins nombreux, d'où un ralentissement de l'activité de minéralisation du carbone. Ce ralentissement ne se traduit pas forcément par un creux visible dans la respiration hétérotrophe car il s'accompagne d'une augmentation brutale du stock de carbone dans le sol, facteur d'augmentation de la respiration. Le carbone peut aussi être enfoui trop profondément pour que la dynamique de dégradation soit forte. Enfin, il faut noter que la destruction de l'horizon superficiel est un facteur d'accélération de la dégradation du sol et du lessivage des éléments minéraux, potentiellement néfaste à terme.

L'autre phénomène important, *pris en compte par le modèle*, concerne les effets retard des émissions, qui ont lieu quel que soit le travail du sol. Comme indiqué plus haut, l'abandon de biomasse morte vient augmenter le stock de carbone du sol. L'activité des micro-organismes s'accélère et les rejets de CO₂ s'intensifient dès l'année qui suit le changement d'occupation. La dynamique des stocks de carbone du sol est donc modifiée par cet apport supplémentaire important de carbone.

La dynamique de la production nette de l'écosystème lors de tels changements d'usages de la terre présente divers aspects. Les émissions différées, si elles sont plus importantes que la PPN du nouveau biome, se traduisent par une PNE négative les premières années. L'écosystème émet plus de CO₂ qu'il n'en absorbe. Ce phénomène s'inverse au bout d'un certain nombre d'années (sauf dans des cas très anecdotiques, si une prairie boréale faisait suite à une forêt, après une tempête laissant beaucoup de résidus sur place par exemple). S'il y a peu de biomasse morte laissée sur place, l'effet des émissions additionnelles des premières années n'est pas visible. Les courbes *figure 14* indiquent alors l'évolution de la PNE dans les deux cas, en supposant que par la suite, le système n'est plus perturbé.

Figure 14 : Production nette de l'écosystème suite à un changement d'usage des terres - Changes in net ecosystem production after a land use change



Évolution en fonction du nouvel écosystème mis en place

Les effets d'émissions différées sont à attribuer à l'histoire passée de la parcelle. À l'inverse, la nouvelle production nette dépend directement des caractéristiques du nouvel écosystème, de

même que la mortalité et l'évolution du stock de carbone du sol. Dans le cadre de cette étude, trois types de plantations forestières sont envisagés. Elles diffèrent d'abord par les périodicités de récolte et les quantités de produits prélevés.

Pour les courtes rotations, nous avons retenu une gestion par nouvelle plantation après chaque exploitation et non pas une gestion en taillis. Dans le cas d'une gestion en taillis les nouvelles tiges se forment sur les souches ; les systèmes racinaires restent ainsi en grande partie vivants. En revanche dans le cas retenu ici, les racines meurent après exploitation. Les bilans des flux sont alors différents.

Ainsi, dans le cas des courtes rotations, à chaque récolte, toute la biomasse est en grande partie exportée ; elle est sinon laissée sur place en résidus d'exploitation, constituant un apport de carbone dans le réservoir sol. Dans le cas des rotations longues, tous les dix ans une éclaircie est réalisée, d'où une exportation de produits et un apport de biomasse morte supplémentaire correspondant aux résidus d'exploitation. À la fin de la période de rotation, l'ensemble de la biomasse est soit exportée, soit abandonnée sur place sous forme de résidus. Enfin, dans le cas de plantations non exploitées, l'évolution après plantation est celle que suivrait une forêt naturelle s'installant spontanément sur une terre devenant vacante. Les plantations considérées diffèrent aussi par leur productivité, puisque nous avons retenu une productivité plus forte pour les courtes rotations, traduisant une priorité donnée à des essences à croissance forte. L'aspect des courbes d'évolution des divers stocks est donné figures 15. Pour la comparaison, les courbes correspondant à une prairie sont aussi indiquées.

La biomasse visible, c'est à dire aérienne, ne constitue qu'une petite partie du stock total de carbone, de l'ordre du quart ou du tiers. Le reste est constitué de la biomasse racinaire, et surtout du carbone du sol sous toutes ses formes. Une approche par les flux, qui permet notamment d'évaluer les prélèvements de CO₂ de l'atmosphère, conduit à observer la production nette de ces écosystèmes, donnée figure 16. Les plantations de courte rotation ont les dynamiques les plus fortes. La décroissance générale s'explique par le fait qu'au fur et à mesure que les stocks de carbone du sol se constituent, la respiration augmente, venant contrebalancer la PPN. Lorsque des produits sont exportés, les courbes moyennes tendent vers les quantités de bois exportées.

Figure 15 : Exemples de l'aspect de l'évolution théorique des stocks de carbone dans la biomasse, le sol et du stock total après diverses évolutions quand la terre cesse d'être cultivée
- Examples of theoretical evolutions of carbon stocks in biomass, in soils and of total carbon stocks on land no longer cultivated with different evolutions

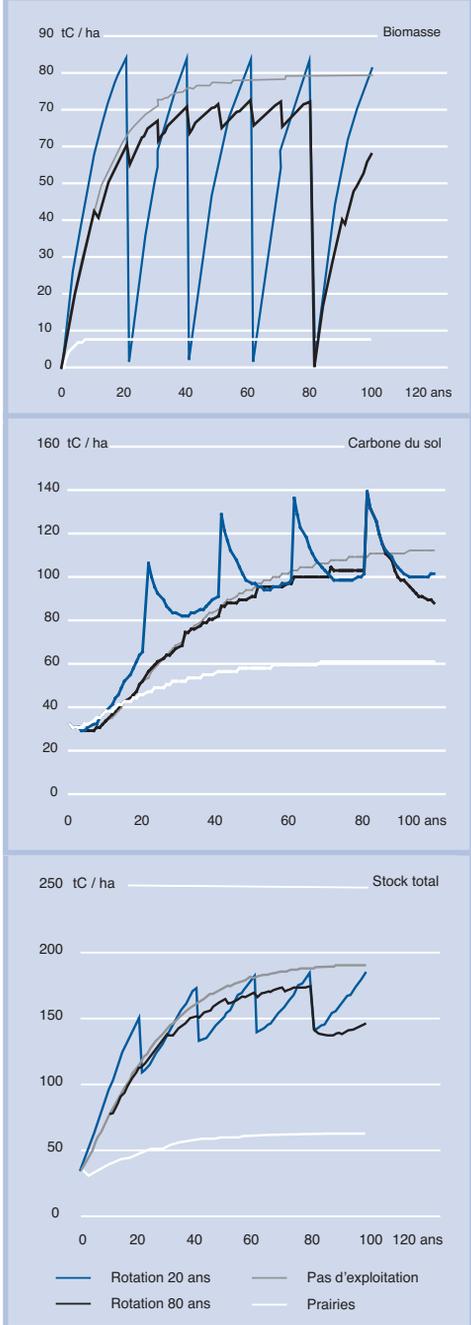
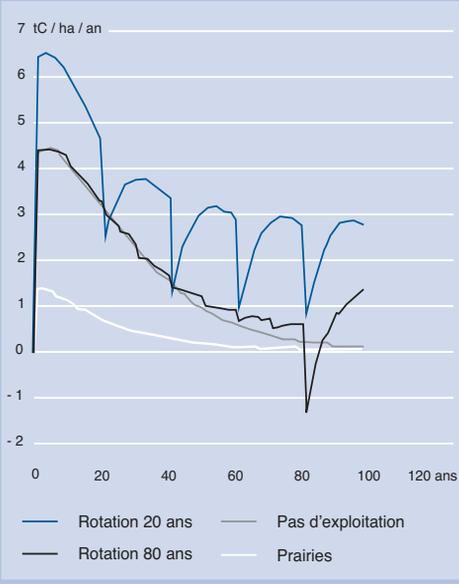


Figure 16 : Exemples d'évolution des productions nettes annuelles des écosystèmes - Examples of changes of net annual production of ecosystems



Valeurs observables à l'hectare

Les courbes réelles observables localement dans les diverses régions du monde dépendent de l'ensemble des paramètres évoqués jusqu'ici : valeur initiale des stocks, type de plantation et productivité, taux de mortalité, taux de respiration caractérisant les plantations de la région. *Par ailleurs, les valeurs à considérer ne sont pas les valeurs absolues des stocks et flux, mais bien les gains (ou les pertes) observables par rapport à une situation de référence dans laquelle aucune plantation n'aurait été mise en place.* En effet, dans ce cas, après abandon de la terre agricole par l'homme, la parcelle évoluerait vers une surface en herbe, une forêt, ou un état intermédiaire, qui aurait aussi un rôle de prélèvement net de carbone dans l'atmosphère, de stockage dans la biomasse ou le sol, d'émission différée, etc. *Les gains effectifs sont donc obtenus en considérant la différence entre les résultats avec plantations et sans plantation en laissant dans ce dernier cas évoluer naturellement les surfaces abandonnées par l'agriculture.* Afin d'appréhender les phénomènes locaux, les figures suivantes donnent quelques éléments en fonctions des régions considérées.

Les figures 17 et 18 présentent les différences nettes de stocks de carbone théoriques (dans la biomasse et le sol) à l'équilibre, entre une situa-

tion avec plantations forestières (courte rotation, longue rotation ou pas d'exploitation) et deux situations d'évolutions spontanées extrêmes de parcelles abandonnées par l'agriculture, évoluant soit vers une prairie soit vers une forêt.

Cette approche « variation de stocks dans l'écosystème » est complétée par une approche centrée sur les flux, intégrant le fait que des produits ont été exportés des écosystèmes. Cela permet de rendre compte complètement du potentiel réel de ces écosystèmes. Les flux nets sont traduits par la PNE. La figure 19 indique le cumul de production nette entre 2000 et 2100. Il s'agit encore évidemment du différentiel entre des scénarios avec plantations et des scénarios d'évolutions naturelles sans plantations. Cette production nette des écosystèmes résulte des variations de stocks in situ et de la production de bois exporté des écosystèmes (traitée dans la partie suivante).

Comme le montrent les diverses figures, les dynamiques nettes des écosystèmes sont très variées selon les régions, y compris sur le signe du bilan des stocks de carbone. Les plantations sur des sols qui auraient évolué spontanément vers de la forêt conduisent toujours à un bilan négatif pour les stocks lorsque l'on ne considère que les écosystèmes. Il n'en est plus ainsi lorsque l'on considère également la production nette cumulée, c'est à dire lorsque l'on prend en compte les produits récoltés dans le bilan. Lorsque des terres abandonnées évoluent spontanément vers de la prairie naturelle, le bilan au niveau des écosystèmes est généralement positif quand les plantations sont à rotation longue ou sans exploitation. Dans les pays chauds, le bilan peut cependant être négatif (en stock de carbone dans la biomasse, et même parfois en stock total de carbone total de l'écosystème). Cela est dû au fait que l'on récolte et exporte plus de biomasse et plus souvent, alors que la prairie a, comparativement, une plus forte dynamique qu'ailleurs. Là encore, l'intégration du compartiment produits peut modifier le bilan.

La plage de variation des bilans est très étendue. C'est dans les pays chauds (Afrique ou Amérique du Sud) que les différences sont les plus sensibles : de l'ordre de -200 tC/ha sur 100 ans au sein de l'écosystème pour des plantations de courte rotation sur des terres qui se seraient reboisées spontanément et de l'ordre de +200 tC/ha sur 100 ans (en Asie), pour des plantations non exploitées, sur des terres qui auraient évolué vers de la prairie.

Les vitesses des phénomènes sont aussi très variables. Dans certains cas quelques années suffisent à s'approcher de l'état d'équilibre. Pour la biomasse,

c'est principalement le cas lorsque le bilan est positif et pour des plantations à courte rotation, aux dynamiques les plus rapides. Les stocks de

Figure 17 : Différences entre les stocks totaux de carbone par hectare dans les biomasses, à l'équilibre théorique - Differences in total carbon stocks per ha of biomass at theoretical equilibrium

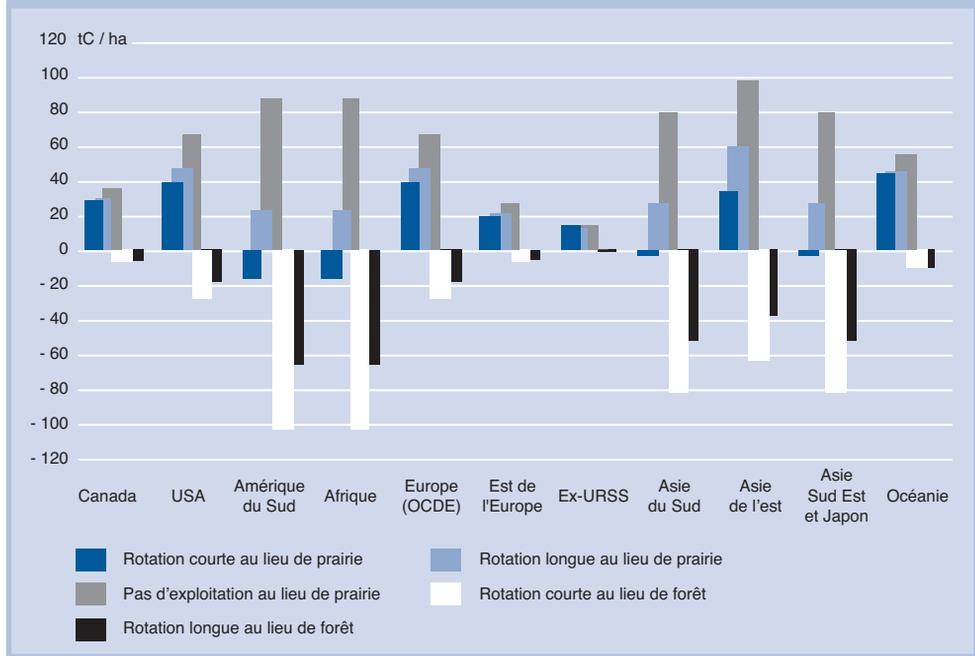
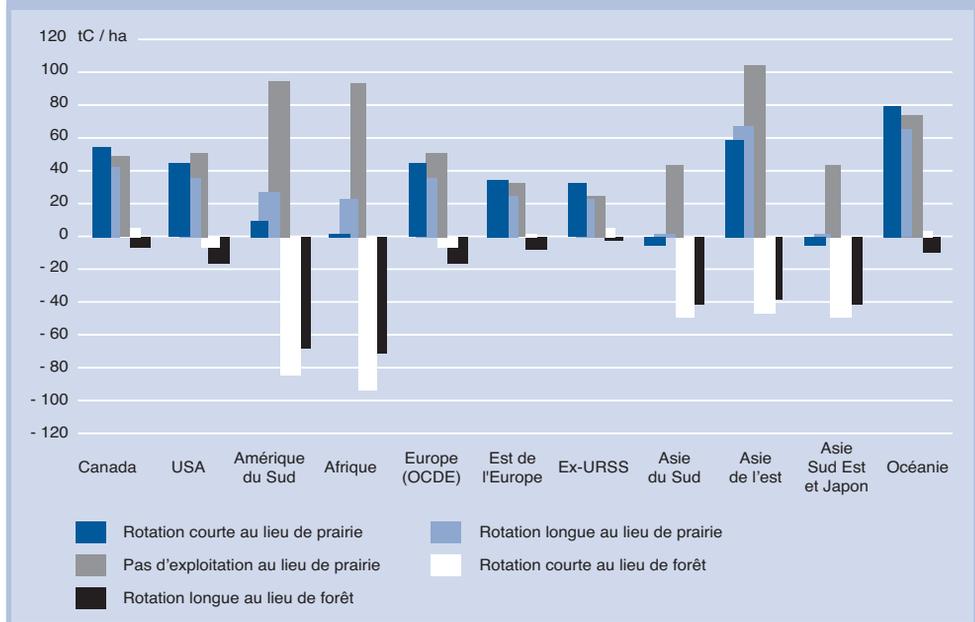


Figure 18 : Différences entre les stocks de carbone des sols à l'équilibre théorique - Differences in soil carbon stocks per ha at theoretical equilibrium



carbone du sol, eux, évoluent la plupart du temps plus lentement, sauf bien sûr quand le stock à l'équilibre est déjà proche du stock initial. Les temps typiques d'évolution des niveaux de carbone dans le sol atteignent facilement quelques siècles. Ceux de l'évolution de la biomasse dépassent rarement 100 à 150 ans. Les délais plus longs dans les cas de bilans négatifs sont principalement dus au fait que les dynamiques sont alors plus influencées par les dynamiques naturelles (plus lentes), que par les dynamiques des plantations mises en places. Si la terre agricole abandonnée est constituée de prairies pâturées, les différences de délai d'établissement des équilibres observables sont le fruit d'un stock initial de carbone du sol différent. Les différences les plus grandes par rapport aux terres cultivées sont dans les pays chauds, où les différences de stock initial sont importantes.

Les flux, traduisant la puissance avec laquelle le carbone est capté, montrent de meilleures performances dans les zones tropicales, pour des plantations à rotation courte sur des terres qui auraient évolué vers des prairies (après 100 ans, le cumul de production nette peut être de près de 800 tC/ha supérieur à celui de l'évolution spontanées vers une prairie cf. figure 19). Les différentiels de production les moins bons sont obtenus dans les forêts boréales, pour des plantations à rotation longue. Dans tous les cas, l'écosystème fonctionne à peine différemment du

fonctionnement naturel (le gain peut quand même être significatif, selon l'utilisation des produits).

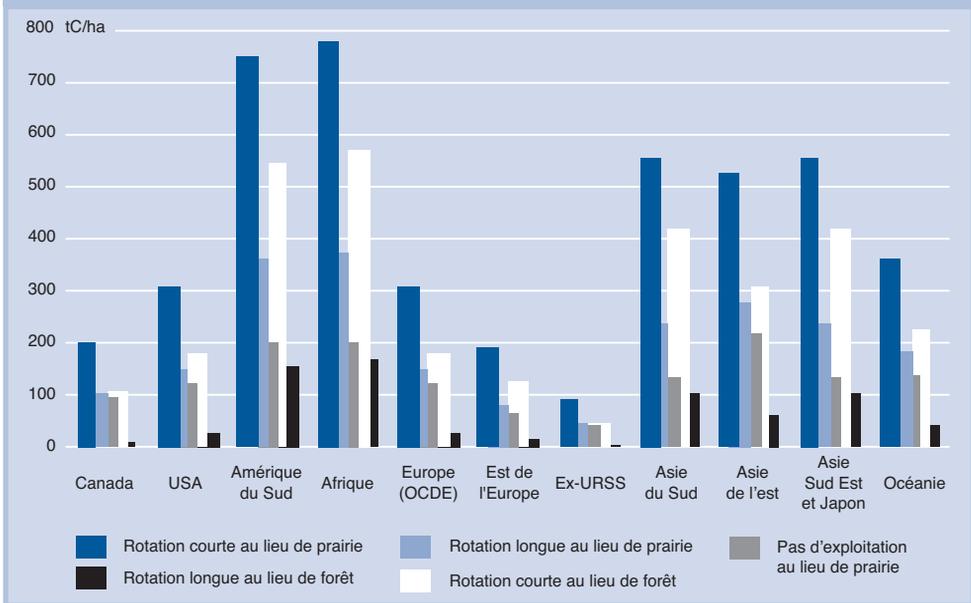
Potentiels totaux de stockage supplémentaire de carbone par les plantations dans les diverses régions du monde

Les résultats précédents, à l'échelle de la parcelle en 2000, donnent un aperçu du fonctionnement du système et des potentiels biologiques dans les divers cas envisagés. Les ordres de grandeurs et dynamiques peuvent alors être évalués à l'échelle des grandes régions retenues. Ceux-ci intègrent la dynamique de libération de terres agricoles sous les divers climats, les types de terres libérées, les caractères bio-climatiques locaux et la dynamique de croissance des nouvelles plantations. Là encore les résultats sont présentés en deux temps : d'une part le différentiel de stock de carbone potentiellement atteint dans les écosystèmes selon les divers scénarios de plantations (approche stocks), et d'autre part le potentiel de prélèvement de carbone de l'atmosphère de ces mêmes écosystèmes (approche flux).

Variations de stocks de carbone dans les écosystèmes

La figure 20 présente le bilan des stockages potentiels supplémentaires en 2050. Le différentiel de carbone mondial maximal est obtenu pour les scénarios sans

Figure 19 : Différences entre les cumuls des productions nettes par ha des divers écosystèmes, entre 2000 et 2100 - Differences, between 2000 and 2100, of cumulated net production per ha of different ecosystems



exploitation des forêts. Dans le scénario de fortes disponibilités en terre, en 2050 il est de 30,8 GtC cumulées. Pour de faibles disponibilités en terres, il chute à 3,7 GtC cumulées. De plus, une répartition différente des poids des diverses régions du monde concernant les surfaces disponibles dans les deux scénarios, combinée à des rendements différents des plantations peuvent inverser le classement des deuxième et troisième scénarios sylvicoles.

L'analyse par région fait apparaître d'autres éléments. Dans le cas des fortes disponibilités en terres, les régions au plus fort potentiel sont l'Amérique du Sud et l'Afrique, suivies par la Chine. Lorsque l'évolution naturelle des terres en l'absence de plantations est une recolonisation rapide par la forêt, on observe une diminution du stock de carbone dans les écosystèmes pour certains scénarios de plantations. En effet, pour des plantations à rotation courte, le stock moyen de carbone n'est jamais au plus haut du potentiel de la parcelle, même si les essences sont à croissance forte. L'exportation de produits est trop massive. Si le scénario de référence est une colonisation rapide par de la forêt non exploitée, celle-ci atteint des stocks de carbone plus importants. C'est pourquoi le différentiel stock avec plantations moins stock scénario de référence peut être négatif. Dans une moindre mesure, cette situation est possible avec des plantations à rotation longue. La Chine et l'Amérique latine sont particulièrement concernées par le phénomène.

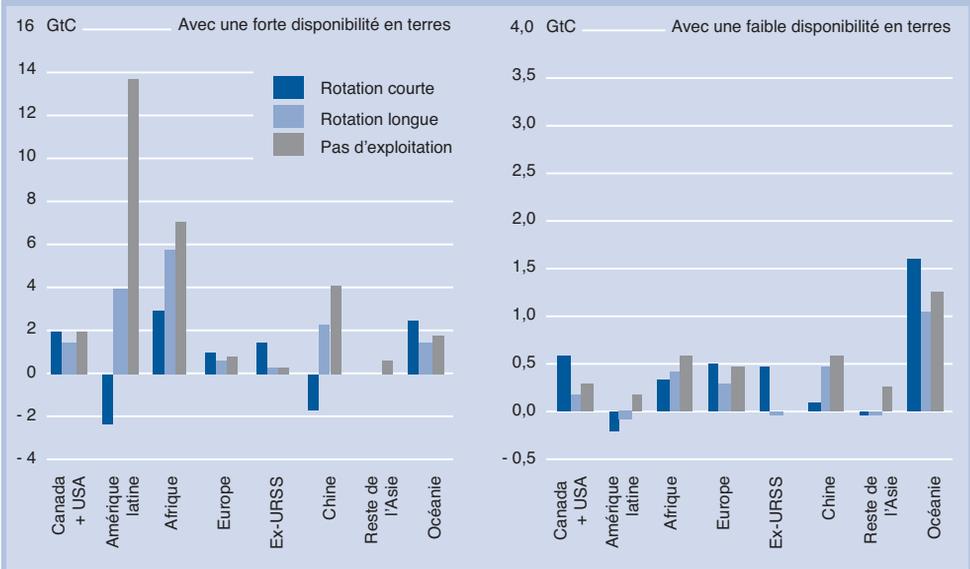
Dans le cas des faibles disponibilités en terres, une région prédomine en 2050, l'Océanie. La répartition des potentiels est toutefois bien plus homogène que pour l'autre scénario. Les écarts comparatifs entre scénarios de rotation courte, rotation longue ou sans exploitation sont les mêmes que précédemment. Dans certaines régions, comme l'Océanie, les dynamiques entre les trois régimes de plantations forestières et d'exportation de produits sont moins éloignées. Il en résulte que les plantations à rotation courtes, plus productives, mais plus exportatrices de produits bois, peuvent rattraper voire dépasser les plantations sans exploitation.

Les capacités cumulées de prélèvement de carbone par les plantations

Les cumuls des prélèvements de carbone (du gaz carbonique de l'air) par les plantations au cours de ce siècle (stockage en forêt et récoltes) représentent la capacité maximale de prélèvement des écosystèmes sans présager du devenir des produits exportés. Les résultats, donnés figure 21, indiquent un prélèvement maximal cumulé de 83 GtC en 2050 pour le scénario à fortes disponibilités en terres et seulement 12,5 GtC dans le cas du scénario à faibles disponibilités en terres.

Ces valeurs sont à mettre en regard des 560 GtC d'émissions cumulées d'origine anthropique avancées par le scénario de base du GIEC d'ici 2050. Ain-

Figure 20 : Stockages supplémentaires de carbone cumulés en 2050 par région - Supplementary storage of cumulated carbon in 2050 by region



si, à l'échelle mondiale, si de gros progrès dans les rendements agricoles sont constatés, une politique de plantations sur des terres agricoles abandonnées permettrait aux écosystèmes d'absorber **environ 15 % des émissions d'origine anthropiques**. Ce bilan sera complété en tenant compte de la réémission de carbone par les produits bois arrivés en fin de vie et des effets de substitution possibles grâce à ces mêmes produits.

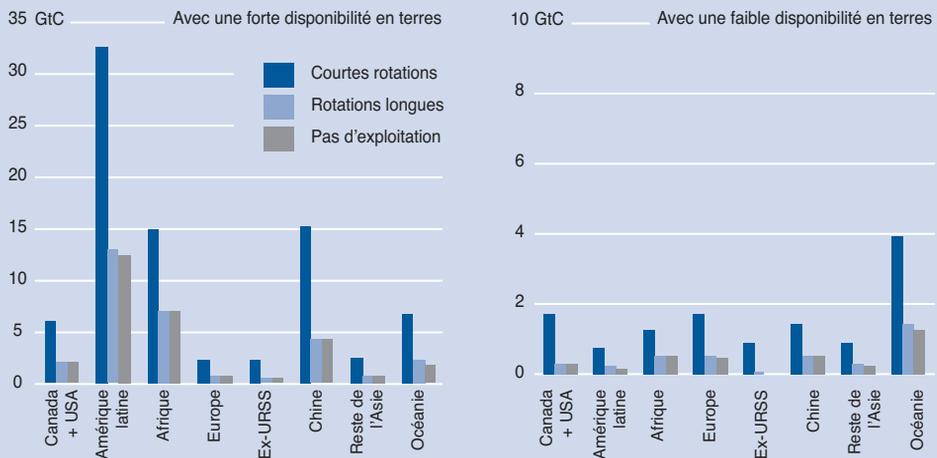
Si aucun progrès n'est effectué dans les rendements agricoles à l'hectare, une politique de plantations forestières sur des terres agricoles abandonnées ne permettrait au mieux que de prélever **environ 2% des émissions à venir d'ici 2050**. Les évolutions à venir des rendements agricoles constituent donc bien un enjeu majeur pour les potentialités de prélèvement de carbone par les plantations. Toutefois, en moyenne, le maximum de l'accroissement de la production nette annuelle a lieu vers 2090, puisque d'une part les terres ne se libèrent que progressivement, et d'autre part, la montée en puissance des dispositifs mis en place n'est pas immédiate (la période d'étude et d'action est 2000-2050 ; il n'y a plus de nouvelles plantations après 2050. Au delà de 2050, seules les conséquences des actions menées jusque là sont observées). Ainsi, les productions cumulées en 2100 des plantations réalisées avant 2050 sont en général plus que triplées, ce qui ne devrait pas être le cas des émissions anthropiques de CO₂.

Au delà de ces premiers constats, plusieurs éléments peuvent être relevés. Pour de fortes disponibilités en terres comme pour de faibles disponibilités, les types de plantations aux plus fortes capacités

d'ici 2100 sont les plantations à courte rotation, qui prélèvent trois à quatre fois plus de carbone que les autres. Par ailleurs, les plantations à rotation longue présentent des résultats assez proches de ceux sans exploitation (de l'ordre de 25% d'écart) à l'échelle du siècle, puisque les premiers stades de croissance de ces deux types de biomes sont très proches (même si des éclaircies sont réalisées périodiquement dans les plantations à rotations longues). Les comparaisons entre régions mènent à des conclusions différentes selon le scénario de disponibilités en terres, à l'exception de la Chine, qui présente un potentiel parmi les meilleurs dans les deux cas.

Dans le cas de fortes disponibilités en terres, l'Amérique du Sud a la plus forte production nette cumulée en 2050, près d'un tiers du potentiel de production nette cumulée mondiale. Elle est rattrapée par l'Afrique en 2100, les deux comptant alors pour les 2/3 de la production nette cumulée mondiale. En Afrique, effectivement, les libérations de terres agricoles n'ont lieu qu'assez tard. Les maxima de production nette sont atteints après 2070 sauf en Europe de l'Est (vers 2030) et en ex-URSS (vers 2050). Dans le cas des faibles disponibilités en terres, ce sont les écosystèmes d'Océanie et de Chine qui présentent les potentiels les plus forts en 2050, l'Afrique s'en approchant en 2100.

Figure 21 : Augmentation nette cumulée de carbone dans le bois des différents types de plantations en 2050 - Net cumulated increase of carbon stocks in 2050 in wood from different types of plantations



Impacts sur le bilan CO₂ de l'usage du bois : le stockage dans les produits récoltés et les substitutions

Les effets du « compartiment produits » (cf figure 12 page 60) sont de trois ordres :

- un effet de retardement des émissions par constitution d'un stock supplémentaire de carbone,
 - un effet de substitution directe lorsque le bois est utilisé pour produire de l'énergie à la place d'énergies fossiles carbonées,
 - un effet de substitution indirecte lorsque le bois est utilisé comme matériau, en remplacement de matières dont la fabrication consomme plus d'énergie, et donc émet plus de carbone.
- Chacun de ces effets est étudié successivement dans le présent chapitre.

Évolution des stocks de produits

Description des dynamiques du compartiment produits

Diverses approches existent dans la littérature pour modéliser le compartiment produits : certains considèrent plusieurs réservoirs²⁰, d'autres un taux annuel de diminution d'un unique réservoir produits²¹. Le modèle retenu ici considère trois catégories théoriques de produits : des produits oxydés très rapidement (durée de vie de l'ordre de l'année), pour la production d'énergie, ainsi que les papiers et cartons,

Figure 22 : Destination des diverses catégories de produits après exploitation d'une forêt - Use of the different categories of wood products after harvesting of a forest

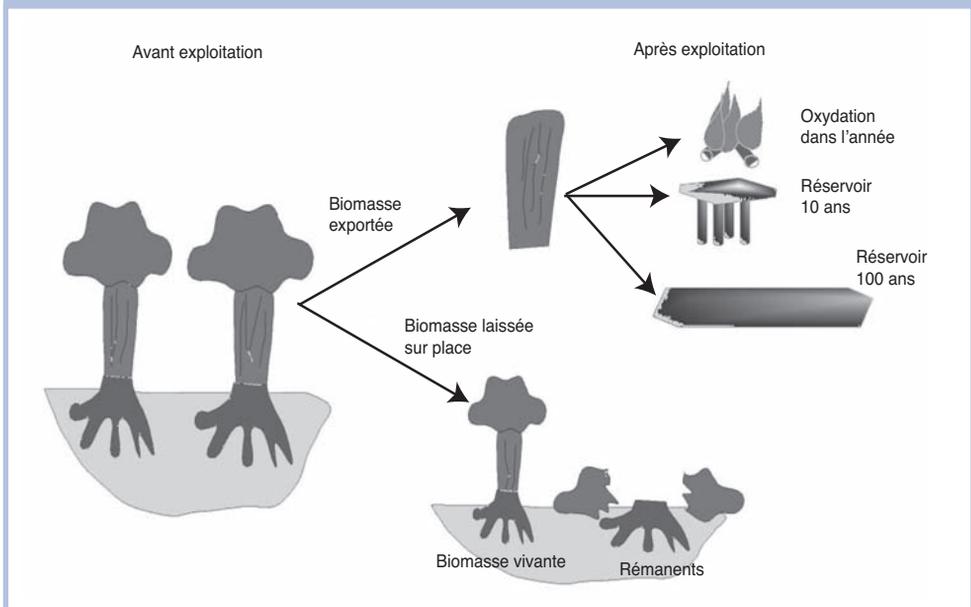
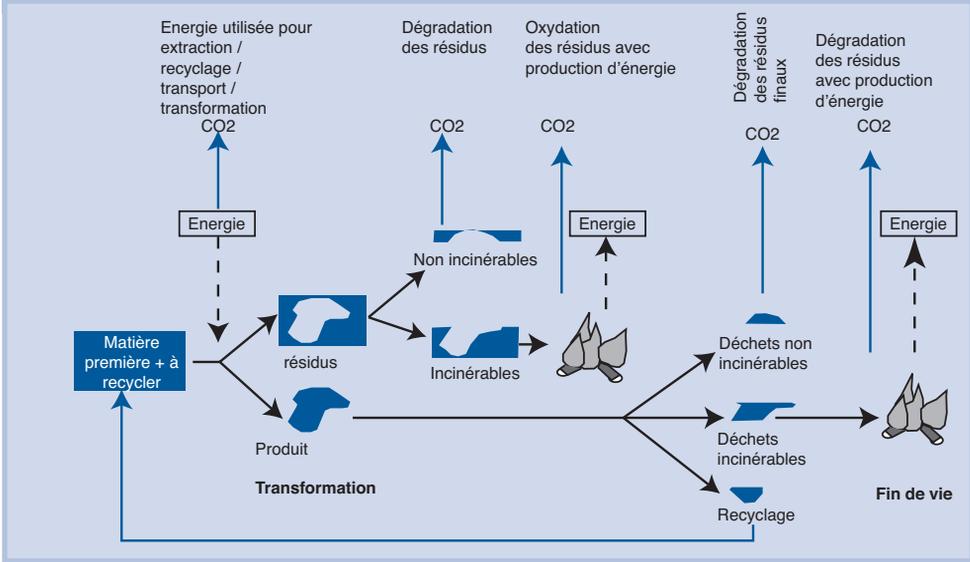


Figure 23 : Cycle de vie d'un produit avec émissions de CO₂ et production ou consommation d'énergie - Life cycle of wood products, with CO₂ emissions, energy production and energy consumption



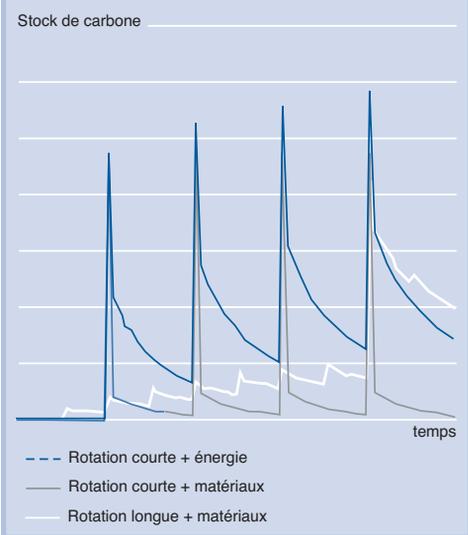
des produits de durée de vie moyenne de 10 ans et des produits de durée de vie moyenne de 100 ans (figure 22).

On aurait aussi pu retenir un réservoir d'une durée bien supérieure, correspondant au carbone reminéralisé, sous forme de charbon de bois ; lors des brûlis réalisés sur les exploitations de forêt. En effet, une fois dans le sol, ce carbone a une durée de stockage très longue. Les très faibles flux entrants de carbone dans cette catégorie sont contre-balançés par une durée de vie très longue, ce qui peut mener à un stock total non négligeable²². La production mondiale en 2000 des diverses catégories de produits bois ainsi que les estimations de leurs durées de vie moyennes figurent en annexe III.

Le fonctionnement du compartiment « produits » peut être représenté de manière simplifiée comme indiqué figure 23. Cette schématisation s'applique quel que soit l'usage du produit : usage « matériel » (sciages, papier, etc), ou production directe d'énergie. On peut considérer que le carbone des produits exportés des plantations finit toujours par être réémis dans l'atmosphère, mais même dans ce cas, l'utilisation du bois constitue un stockage temporaire du carbone intéressant. Le retardement des émissions de carbone correspond alors à la durée de vie du produit entre la récolte et la dégradation finale. Il génère un stock permanent (stock circulant) de carbone hors forêt. Ce stock

s'ajoute aux autres réservoirs de carbone. Pour calculer le stock hors forêt, la connaissance de la durée de vie des produits ne suffit pas, il faut aussi connaître un flux auquel s'applique cette durée

Figure 24 : Évolution au cours du temps et suivant les usages du bois, des stocks de carbone dans le bois récolté par hectare de forêt plantée - Evolution, with time and according to the use of wood, of carbon stocks in harvested wood per hectare of planted forest



de vie (flux de carbone exporté de la forêt sous forme de produits, qui est aisément mesurable, ou flux de carbone en fin de vie des produits, qui lui, n'est pas mesurable individuellement puisqu'il est beaucoup plus diffus). La détermination des stocks moyens de produits bois ou des durées de vie moyennes de ceux-ci n'est pas très documentée dans la littérature. Les flux industriels de production sont les seuls éléments facilement accessibles.

Prise en compte des produits dans les bilans de carbone des plantations nouvelles

Les scénarios sylvicoles considérés sont des plantations forestières. Dans la mesure où ces peuplements sont plantés dans l'optique d'une récolte, la destination des produits est connue dès l'établissement des plantations. Il en résulte que d'une part la répartition du bois dans les diverses catégories des produits est choisie et ne correspond pas à la moyenne mondiale de l'ensemble des forêts en 2000 et que d'autre part, compte tenu de l'effort particulier porté sur les plantations, les taux de récupération de produits peuvent être plus importants que dans une forêt naturelle ou gérée. De plus, a priori, les récoltes issues des nouvelles plantations ne sont intéressantes que si elles s'ajoutent au reste de la production habituelle. On parle alors d'additionnalité. Si des marchés comme le bois énergie ou les matériaux peuvent dans une certaine mesure croître avec l'augmentation des plantations, il n'en va pas de même pour le marché du papier carton, pour lequel la demande dépend peu des surfaces disponibles.

Des trois scénarios sylvicoles retenus (rotations courtes, longues ou absence d'exploitation), seuls les deux premiers impliquent une exportation de produits de l'écosystème. Nous leurs associons divers types d'utilisation des produits récoltés :

- des rotations courtes pour production de bois énergie (chaleur et électricité),
- des rotations courtes pour production principale de produits à durée de vie moyenne (essentiellement des panneaux de particules),
- des rotations longues pour production de produits à durée de vie moyenne ou longue.

La forme des courbes d'évolution des stocks totaux de carbone par hectare de plantation dans le réservoir produits est donnée figure 24. La fin de vie des produits est un paramètre important dans le bilan CO₂ complet, selon le taux de ré-

cupération pour la production d'énergie. Deux niveaux de durée de vie moyenne des produits (haut et bas) sont considérés, pour tenir des incertitudes élevées sur ces paramètres.

Si l'augmentation de stock de carbone dans les nouvelles plantations nécessite essentiellement une grande disponibilité en terres, l'augmentation de stock de carbone dans les produits bois, nécessite quant à elle des débouchés suffisants pour les produits. Le tableau 2 compare les flux d'exportation de bois des plantations nouvelles, aux flux du marché dans son ensemble proposé par le modèle IMAGE en 2050 et 2100. *Même si des prévisions de demande à l'échéance 2100 sont délicates, ces chiffres permettent toutefois de relever de probables difficultés à venir pour écouler la totalité du stock de produits bois qui pourrait résulter des scénarios d'augmentation des surfaces de plantations.*

Sur le marché du bois matériau, d'abord, les plantations nouvelles à l'échelle de la planète permettraient, sans même tenir compte des productions des forêts existantes, une production mondiale très importante dépassant largement, le volume de la demande totale envisagé par IMAGE dans le cas des fortes disponibilités en terres. Seules les plantations de l'Amérique du nord, de l'Europe, de l'ex-URSS et des régions d'Asie, où les terres sont les moins disponibles, ne sont en mesure de produire que quelques pourcents de la demande locale dans le cas des rotations longues et de l'ordre de 30 à 40 % dans le cas des rotations courtes.

Dans le cas du scénario de faibles disponibilités en terres, les excédents sont moins forts : ces plantations pourraient satisfaire de l'ordre de 8 à 23 % de la demande mondiale en 2050 et 2100 avec des plantations à rotation longue et de l'ordre de 50 % avec des plantations à rotation courte. En Océanie, en absence d'exportation, la quantité de bois supplémentaire produite par les plantations serait supérieure à la demande locale dans le cas des rotations courtes et de l'ordre de la moitié de celle-ci dans le cas de rotations longues. Dans une moindre mesure, l'Afrique et la Chine seraient aussi concernées. **Au delà des disponibilités en terres, ces chiffres soulignent d'ores et déjà les enjeux de la nécessaire pénétration supplémentaire de produits bois dans les marchés, ainsi que des échanges entre régions.**

Le marché du bois énergie (principalement pour la production de chaleur) présente des ordres de grandeurs encore plus importants. Les plantations

Tableau 2 : Potentiel de production des plantations sur terres agricoles en 2050 et 2100 en comparaison des demandes mondiales de bois prévues par Image - Potential production of wood from plantations on agricultural land and world demands of wood, according to Image, in 2050 and 2100

Matériaux (en GtMS/an)	faibles disponibilités en terres		fortes disponibilités en terres	
	2050	2100	2050	2100
Rotation courte + matériaux	0,8	1,2	7,5	10,2
Rotation longue + matériaux	0,1	0,6	1,4	5,1
Demande totale de matériaux bois selon IMAGE	1,7	2,6	1,4	1,8
<i>Production mondiale en 2000 : 1,2 GtMS</i>				
Bois-énergie (en GtMS/an et en Gtep/an d'énergie primaire)	faibles disponibilités en terres		fortes disponibilités en terres	
	2050	2100	2050	2100
Rotation courte + énergie	0,9	1,3	7,9	10,6
	0,4	0,5	3,2	4,3
Rotation courte + matériaux	0,3	0,5	2,3	4,0
	0,1	0,2	0,9	1,7
Rotation longue + matériaux	0,1	0,2	0,7	2,4
	0,0	0,1	0,3	1,0
Demande totale de bois énergie selon IMAGE	1,5	1,4	1,0	0,6
	0,6	0,6	0,4	0,2
<i>Production mondiale en 2000 : 1,3 GtMS, soit 0,54 Gtep</i>				

à rotation courte pour la production de bois énergie sont à même de produire huit fois plus de bois que la demande totale mondiale prévue par IMAGE en 2050 et près de dix-huit fois plus en 2100 pour le scénario de fortes disponibilités en terres. Toutes les régions, à part l'Asie du Sud et du Sud Est dépassent alors la demande locale. Dans le cas des scénarios de faibles disponibilités en terre, la production mondiale serait de l'ordre de 60 à 90 % de la demande prévue. Dans ce cas-là, seules l'Océanie, l'Europe et l'Amérique du Nord ont un potentiel de production supérieur à la demande prévue par IMAGE. Toutefois, les choses ne sont pas forcément comparables avec la situation des bois matériaux, puisque le marché des matériaux ne se comporte pas de la même manière que celui de l'énergie. Les substitutions sont *a priori* plus aisées dans le second que dans le premier. De plus la demande indiquée par IMAGE est le résultat de la modélisation de la demande en bois-énergie. La demande en énergie totale est, elle, bien plus forte, ce qui laisse de la place à la substitution. On peut noter enfin que même les

scénarios sylvicoles à vocation de production de matériaux concourent également à la production de bois-énergie (résidus d'exploitation, déchets de bois et usage en fin de vie des produits) de manière non négligeable.

Effets de substitution : remplacement de produits divers par des produits à base de bois

Les considérations précédentes rendent compte des masses de carbone circulant dans l'ensemble des compartiments. Les aspects de substitution qui sont abordés maintenant considèrent les variations de consommation énergétique et d'émissions de CO₂ dans la chaîne industrielle lors du remplacement d'un type de produit par un autre à base de bois. Le terme de substitution, utilisé dans le présent contexte correspond au remplacement, pour l'obtention d'un même service, d'une filière quelconque par une filière fondée sur la biomasse, en s'intéressant aux conséquences sur les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Lorsque l'objectif est la production d'énergie, c'est directement l'oxydation

du carbone (et donc l'émission de CO₂), qui est à l'origine du service attendu. On parle alors de **substitution directe**. Lorsque ce service est d'un autre ordre (par exemple la réalisation d'une structure portante pour la couverture d'une habitation qui peut se faire par des charpentes métalliques, en bois, par des dalles autoportées en béton armé, etc), l'oxydation de carbone ou les émissions de CO₂ ne sont que des conséquences indirectes, qui ont lieu au long du processus de fabrication. En remplaçant une filière par une autre on parle alors de **substitution indirecte**. Afin d'évaluer un bilan moyen global de substitution, il importe de connaître le taux pénétration possible des technologies bois dans un secteur donné. Ce taux dépend de facteurs socio-économiques, techniques et politiques. Nous considérons que les substitutions aux meilleurs bilans seront alors celles qui seront réalisées en premier, de sorte que le gain moyen de substitution décroît avec les quantités substituées. Dans la pratique, plusieurs critères peuvent déterminer quels types de substitution ont lieu en premier : les types d'incitation, le prix de la tonne de carbone, le coût des diverses substitutions, les habitudes sociales, etc.

Substitution énergie

Contexte de la substitution

Lorsque la biomasse est utilisée dans le but de produire de l'énergie, il faut d'abord déterminer s'il s'agit effectivement de substitution. En effet, si l'énergie produite vient simplement s'ajouter à celle qui était produite jusqu'alors, il n'y a aucune substitution. Cet élément est difficile à établir, car la demande en énergie finale, dans la pratique, n'est pas un facteur complètement exogène et dépend du type d'offre, des prix de l'énergie, des politiques en jeu. Dans cette étude, la demande est considérée comme exogène, et il est supposé qu'il y a bien substitution. La technologie utilisée pour la conversion du bois revêt alors beaucoup d'importance, puisque les rendements de conversion peuvent varier énormément, et dépendent beaucoup du type

d'énergie finale. Enfin, les énergies effectivement remplacées constituent le dernier point essentiel du bilan. Il est clair que, du point de vue du CO₂, le gain obtenu par la substitution d'énergie nucléaire ou de l'hydroélectricité par de la biomasse n'a rien à voir avec celui obtenu en remplaçant du charbon utilisé dans de vieilles centrales. Ces analyses sont à effectuer dans les divers secteurs d'utilisation possible de l'énergie (habitat individuel, collectif, tertiaire, industrie, production d'électricité, ou éventuellement les transports).

Soulignons que dans cette étude, nous n'avons pas évalué les capacités de production de biocarburants à partir des bois. Ce qui ne signifie pas que cela ne soit pas un enjeu très important. Mais cela devrait faire l'objet d'une autre étude.

Les technologies disponibles pour la production de chaleur et d'électricité sont très variées. Elles ont été étudiées dans le cadre d'un des cahiers du CLIP²³. Elles peuvent utiliser la ressource sous sa forme la plus simple (bûches de bois), ou sous une forme transformée (plaquettes ou granulés), directement à partir des produits forestiers, ou à partir des déchets d'industrie, ou encore à partir des produits bois arrivés en fin de vie. Enfin, des formes plus évoluées encore peuvent être utilisées, il s'agit de produits de la gazéification du bois. Les rendements actuels, et envisageables dans l'avenir, ainsi que les conditions de pénétration des technologies dépendent évidemment du secteur d'utilisation. Ils sont développés dans l'étude du CLIP citée ci-dessus. Ils peuvent varier de 15 %, pour les foyers ouverts individuels à 90 % pour les centrales en cogénération.

Taux de pénétration

Les taux de pénétration maximaux retenus sont donnés dans le *tableau 3*. Ils ont été pris identiques dans toutes les régions. Ces taux expriment la quantité d'énergie finale qui peut être remplacée par de l'énergie provenant du bois. Il s'agit dans ce cas uniquement de nouveaux débouchés pour le bois énergie.

Tableau 3 : Hypothèses relatives aux taux de pénétration supplémentaire maximale de bois-énergie par secteur (hors transport) - Assumptions regarding maximum supplementary penetration of wood for energy in different sectors (except in transport)

	Habitat	Tertiaire	Industrie		Réseaux de chaleur		Électricité seule
			Chaleur	Cogén.	Chaleur	Cogén.	
Taux de pénétration maximale	25 %	15 %	15 %	15 %	20 %	20 %	15 %

Bilans de substitution retenus

Lorsque de la biomasse est utilisée pour la production d'énergie à la place d'une autre source d'énergie, le bilan de la substitution est établi en comparant les émissions totales de CO₂ dans les deux filières, pour la production d'une même quantité d'énergie finale. Ces émissions totales comprennent le CO₂ émis pour le conditionnement, l'approvisionnement et la combustion du combustible. Ce bilan est exprimé en indiquant la quantité totale de CO₂ qui n'a pas été émise (en tonnes de carbone), pour une tonne de matière sèche de biomasse utilisée dans le cadre d'une substitution. Ce bilan varie dans le temps, mais en première approximation, les mêmes taux de substitution sont conservés dans l'avenir, en faisant l'hypothèse que les progrès réalisés se feront à la même vitesse pour les technologies de conversions du bois et celles des combustibles fossiles. Des divers secteurs et combustibles retenus, le bilan le plus favorable est obtenu pour la houille, pour laquelle le taux de substitution de carbone émis est presque toujours compris entre 0,5 et 0,8 tC/tMS. Le tableau 4 reprend les valeurs moyennes retenues par secteur, et par type de combustible.

Les secteurs pour lesquels les gains lors de la substitution sont les plus forts sont ceux de la production de chaleur. À l'inverse, l'électricité présente des réductions d'émissions plus faibles, ramenés à la tonne de matière sèche de bois utilisé en substitution. Lorsque la surface disponible pour les plantations nouvelles est limitée, la disponibilité annuelle en combustibles se trouve elle aussi limitée. La valorisation optimale de chaque tonne sortie de la forêt passe alors par le remplacement en priorité des filières à plus fort taux de substitution, et ce même si le taux de conversion énergétique de ces filières était déjà bon. Les premières substitutions qui auront lieu pourront se faire avec des gains nets

de 0,8 tonne de carbone non émis par tonne de matière sèche de bois énergie utilisé. Au fil des substitutions le bilan moyen global diminue.

Substitution matériau

La source principale d'émissions de CO₂ dans les filières pour lesquelles la substitution indirecte est possible est en général la consommation énergétique. Toutefois, pour le ciment, de grandes quantités de CO₂ sont aussi émises lors de la transformation chimique du matériau. L'ordre de grandeur est équivalent aux émissions dues à la consommation énergétique nécessaire à la fabrication²⁴. Ces émissions s'annulent sur le long terme (de 100 à 2000 ans pour un mur de 20 cm), car un processus de re-carbonatation a lieu dans le béton en recombinant le CO₂ autour du calcium. Toutefois, la re-carbonatation est lente, dépend de nombreux facteurs et n'est techniquement pas souhaitée par les utilisateurs de ciment. Dans la période de temps envisagée par cette étude le CO₂ est considéré comme étant émis définitivement. Deux grandes catégories de service final représentent l'essentiel des services pour lesquels la substitution indirecte est significative : le secteur du bâtiment et celui des infrastructures extérieures.

Taux de pénétration

Dans le cas des substitutions indirectes, un taux de pénétration de 20 % des surfaces construites a été considéré dans l'ensemble des filières du bâtiment. En évaluant les demandes énergétiques à venir grâce au modèle IMAGE, ainsi que les surfaces à construire, il est possible d'évaluer les quantités annuelles de bois supplémentaires que le secteur du bâtiment pourra absorber selon les hypothèses retenues. Les potentiels du secteur des infrastructures extérieures sont indexés sur ces valeurs.

Tableau 4 : Réduction d'émissions de carbone par tonne de bois substituée aux énergies fossiles en fonction des secteurs - Carbon emission reductions per ton of wood substituted to fossil fuels in different sectors

Unité : tC / tMS	Habitat	Tertiaire	Industrie		Réseaux de chaleur		Électricité seule
			Chaleur	Cogén.	Chaleur	Cogén.	
Gaz naturel	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3	0,2
Houille	0,7	0,8	0,7	0,6	0,8	0,6	0,5
Pétrole	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3

Tableau 5 : Consommation énergétique pour la fabrication de divers types de bâtiments et quantité de bois stockée par m² (1996) - Energy consumption for the production of various types of buildings and quantity of wood per m² (1996)

Bâtiment	Technique	Energie consommée (en GJ/m ²)	CO ₂ émis (en kgC/m ²)	Bois utilisé (kgC/m ²)	Proportion de la surface construite (*)
Hôtels	Béton	3,7		10	7 %
	Bois	2,7		31	
Bureaux	Béton	5,6		5	15 %
	Acier	6,6		5	
	Bois	3,7		35	
Industrie	Acier	3,2		2	28 %
	Bois	1,8		11	
Maisons	Forte énergie	5,9		9	50 %
	Faible Coût	4,2		19	
	Bois	2,5		37	
	Immeuble 1	1,8			
	Immeuble 2	2,1			
	Immeuble bois	1,1			
	Briques		150		
	Bois 1		140		
Bois 2		115			

Source : Buchanan et Levine, Börjesson et Gustavsson, Lauer
 (*) Valeurs correspondant à la Nouvelle Zélande

Secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment peut être un consommateur important de matériaux bois dans le monde. Mais c'est aussi un secteur très lié aux habitudes locales, aux caractéristiques très variables selon les régions. Ainsi, si les bâtiments anciens ou nouveaux au Moyen Orient utilisent très peu de bois, en Nouvelle Zélande, 56 % des sciages sont destinés à la construction de nouvelles maisons, nouveaux locaux industriels ou commerciaux et à l'aménagement intérieur²⁵. La littérature n'est pas très abondante en ce qui concerne les émissions de CO₂ du secteur. Les études portent souvent sur des cas individuels, d'où des marges d'erreurs importantes par extrapolation. De plus, les valeurs ne sont pas forcément homogènes entre les études, ce qui nécessite des facteurs de conversion, et de nouvelles marges d'erreurs. Une synthèse des valeurs de ces diverses études est donnée *tableau 5*. Compte tenu de la quantité plus importante de données homogènes fournie par l'étude de Buchanan et Levine par rapport aux autres, et du fait que ces études ne semblent pas

incohérentes entre elles, les éléments quantitatifs de Buchanan et Levine sont retenus pour le corps des données utilisées, les autres études venant corriger des éléments si besoin est. Quand une technique « béton » ou « acier » est remplacée par une technique à base de bois, le gain énergétique pour un m² neuf est situé entre 1 et 3,4 GJ, pour une utilisation de 3 à 30 kg de carbone supplémentaire sous forme de bois. Les émissions de carbone évitées lors de la substitution dépendent alors fortement du type d'énergie qui aurait été utilisée, chaleur ou électricité, ainsi que de son mode de production. En effet, en prenant des cas extrêmes, l'utilisation d'électricité produite par une centrale à charbon de rendement 30 % mènerait à des émissions de CO₂ de l'ordre de 80 kgC/GJ, alors que de la chaleur produite par du gaz naturel avec un rendement de 90 % n'émettrait que 16 kgC/GJ. À cela s'ajoutent les émissions de CO₂ évitées lors du processus chimique de fabrication de ciment, pour les techniques à base de béton. Le bilan de substitution exprime alors le gain d'émissions de CO₂, en tC, pour une quantité de bois supplémen-

taire utilisée en substitution, en tonne de matière sèche. Ce gain est réalisé lors de la construction de la maison. Le bois utilisé reste alors stocké pendant toute la durée de vie de celle-ci et peut être recyclé en fin de vie ou utilisé en partie pour produire de l'énergie. Cette dernière utilisation n'est pas prise en compte à ce niveau des bilans, mais vient augmenter les quantités de bois disponibles pour la production d'énergie.

La surface totale construite est supposée indépendante du type de technique utilisée. De plus, comme indiqué plus haut, la technologie à base de bois est supposée venir remplacer en priorité des bâtiments pour lesquels le bilan de la substitution est le meilleur pour une même quantité de bois supplémentaire utilisée. Le bilan final moyen en 1996, en tenant compte des hypothèses de calculs retenues, notamment sur les taux de pénétration maximaux des marchés, varie alors de 8,2 à 13 tonnes de carbone émis sous forme de CO₂ par tonne de matière sèche (tMS) supplémentaire de produits bois utilisés. Les gains les meilleurs atteignent 15 tC/tMS de bois supplémentaire utilisé pour remplacer d'autres matériaux. Une fois encore, les incertitudes sur l'ensemble de ces valeurs sont très nombreuses.

Secteur infrastructures d'extérieur

L'autre grande catégorie de produits concerne essentiellement le bois utilisé en extérieur. Les chiffres que nous retiendrons s'appuient sur une analyse de cycle de vie réalisée pour des poteaux électriques²⁶. Ces ordres de grandeurs sont supposés représentatifs du secteur. Le remplacement de techniques à base de métal par des techniques à base de bois se traduit par une réduction d'émissions par tonne matière sèche de bois utilisée à la place d'autres matériaux, de l'ordre de une à quatre tonnes de carbone en moyenne, selon les régions du monde. Cette réduction d'émission passe à une ou deux tonnes de carbone fossile en moyenne si l'on remplace des techniques à base de béton, en tenant compte du fait qu'il s'agit la plupart du temps de béton armé. Les ordres de grandeur sont plus faibles que pour le secteur du bâtiment. En effet, les chaînes de fabrication sont plus courtes, et les produits moins transformés. Là encore l'énergie contenue dans les poteaux bois n'est pas prise en compte dans le bilan final des substitutions indirectes.

Rappel : Scénarios d'utilisation des terres et utilisations du bois retenues

Seules les terres abandonnées par l'agriculture sont considérées dans cette étude, c'est-à-dire soit les anciennes terres cultivées soit les anciennes prairies pâturées. Deux niveaux de disponibilité en terre sont définis, selon le scénario d'évolution envisagé, B1 ou A2 dans le modèle IMAGE : ces niveaux définissent une forte disponibilité en terres (938 Mha en 2050) et une faible disponibilité en terres (143 Mha en 2050). S'ajoute à ces disponibilités en surface plusieurs scénarios de récolte et d'utilisation des plantations forestières. Ainsi, trois types d'exploitation ont été pris en compte :

- des rotations courtes (20 ans en Europe ou 8 ans en Afrique par exemple), destinées à produire du bois énergie ou de trituration, sur lesquelles aucune intervention n'a lieu entre les récoltes,
- des rotations (80 ans en Europe), produisant des sciages et sur lesquelles sont pratiquées des éclaircies tous les 10 ans, correspondant à un prélèvement de 10% de la biomasse,
- des plantations sans exploitation, sur lesquelles aucune intervention sylvicole n'a lieu.

Seuls les deux premiers scénarios sylvicoles impliquent une exportation de produits. Dès lors, trois types d'association régime sylvicole - produits sont retenus :

- rotation courte avec production de bois énergie,
- rotation courte avec produits de durée de vie moyenne (panneaux de particules essentiellement),
- rotation longue avec produits de durée de vie moyenne ou longue.

Les durées de vie sont fixées à 1 an pour les produits oxydés très rapidement, 10 ans pour les produits à durée de vie moyenne et 100 ans pour les produits à longue durée de vie.

Enfin, le rôle de substitution des produits doit également être pris en compte. Dans le cas de l'utilisation énergétique du bois, le bilan de la substitution varie en fonction du type d'énergie produite et du combustible substitué (tableau 4 page 76). Dans le cas de l'utilisation matériau du bois, le secteur du bâtiment a été distingué des infrastructures extérieures (traverses, poteaux...).

Bilan CO₂ intégrant le stockage biologique du CO₂ et les substitutions

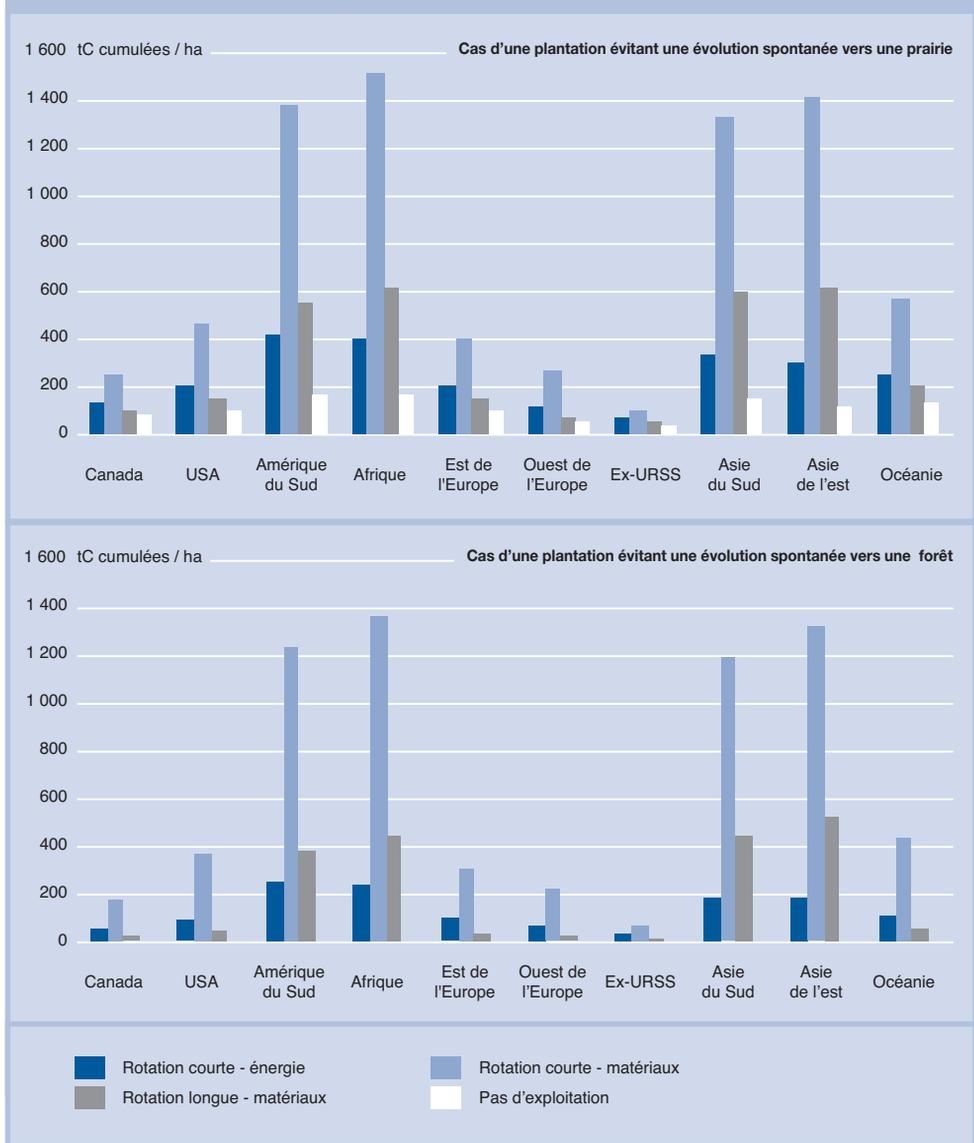
Bilan carbone au niveau de la parcelle

Nous présentons tout d'abord le bilan carbone à l'échelle d'une parcelle afin de comparer les scénarios d'exploitation par région « toutes choses égales par ailleurs », en écartant les effets liés à la disponibilité en terres par région et à d'éventuelles limites de débouchés pour les produits bois. Un bilan des

stocks totaux de carbone (biomasse vivante, carbone du sol et produits bois) à 50 ans est présenté en complément en annexe IV. Les différents scénarios sont rappelés dans l'encadré en page précédente.

Le bilan carbone prend en compte les accroissements de stocks dans la biomasse vivante, dans les sols, et dans les produits bois, ainsi que les quantités de CO₂ non émises du fait des substitutions énergie ou matériau (figure 25). Ce sont des potentiels théoriques maximaux compte tenu des hypothèses

Figure 25 – Réductions d'émissions cumulées de carbone à 50 ans par stockage dans les plantations et par substitution de produits fossiles par les bois récoltés - Cumulated carbon emission reductions, after 50 years, by storage of carbon in plantations, and through substitution of fossil products by use of harvested wood



retenues, dans la mesure où l'on considère que chaque produit trouve un débouché et permet une substitution, ce qui n'est pas forcément le cas dans la pratique, comme on le verra plus loin. Par ailleurs, nous avons retenu les taux de substitution présentant le meilleur bilan carbone.

Il apparaît clairement que, s'il n'y a pas de contrainte de débouchés, la substitution de matériaux bois à des matériaux de construction à fortes émissions en carbone (acier, ciment, etc.) présente de loin le bilan le plus favorable, notamment pour les rotations courtes et dans les régions chaudes. Ceci est par ailleurs renforcé par le fait que ces matériaux bois peuvent souvent être récupérés en fin de vie et incinérés pour produire de l'énergie. La production directe d'énergie par plantations à courte rotation vient ensuite. Les meilleurs bilans sont obtenus dans les régions tropicales avec des potentiels de gains cumulés l'ordre de 1500 tonnes de carbone par hectare après 50 ans et de l'ordre de 2500 tC/ha après 100 ans. Les meilleurs potentiels des pays industrialisés situés en zone tempérés sont de l'ordre de 400 tC/ha après 50 ans et 800 tC/ha après 100 ans²⁷. La hiérarchie entre les scénarios à 50 ans ou 100 ans est identique.

On peut noter que, dans les régions tropicales, le gain net final à l'hectare des plantations énergétiques n'est que de l'ordre de 20 à 25 % du gain obtenu lors de la production de matériaux après 50 ans, alors que dans les pays tempérés, il est de 40 à 45 %. Cela vient entre autres du fait que les taux de substitution matière sont théoriquement plus élevés dans les régions tropicales.

Lorsque l'évolution naturelle des terres est un boisement spontané, le bilan est évidemment moins bon pour un scénario donné de plantations que si ces terres avaient eu tendance à évoluer vers de la prairie. La différence provient alors exclusivement de la partie « biologique » du système complet ; la partie « anthropique », c'est à dire le compartiment produits, se comportant de la même manière dans les deux cas.

Le boisement sans exploitation, du point de vue du bilan net des flux de carbone à 50 ou 100 ans, présente les gains les moins bons dans toutes les régions. Toutefois, si le choix est fait de réaliser des plantations sans exploitation, il est évidemment plus intéressant, du point de vue du bilan carbone, de les réaliser en priorité sur des terres dont l'évolution naturelle aurait été vers de la prairie, et ce, spécialement dans les zones boréales, pour lesquelles le bilan est le moins défavorable par rapport aux autres scénarios.

Bilan complet à l'échelle mondiale

Des limites liées aux débouchés des produits bois

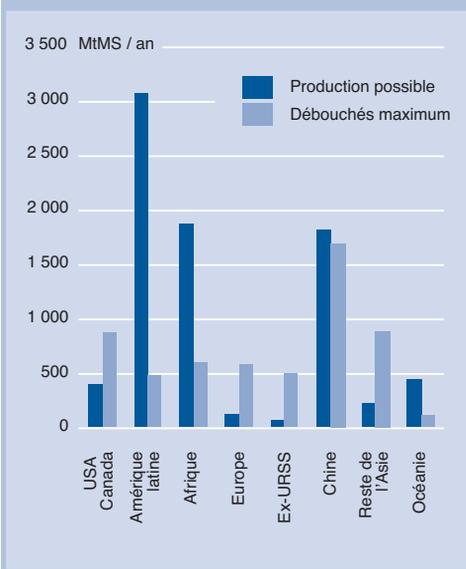
Nous avons vu que les disponibilités en terre conditionneront fortement les bilans carbone des scénarios. La question des débouchés pour le bois-énergie et pour les produits bois apparaît comme un autre paramètre essentiel.

Nous avons présenté dans la partie précédente les hypothèses retenues quant aux taux de pénétration du bois-énergie pour la chaleur et l'électricité, dans différents secteurs et des matériaux bois dans la construction. Ces évaluations sont calées sur les scénarios du modèle Image.

Dans le scénario B1 correspondant au cas de fortes disponibilités en terre, la consommation énergétique totale est de 17,4 Gtep et la population mondiale à 8,7 milliards en 2050. Selon nos estimations, la consommation potentielle de bois-énergie supplémentaire serait de 2,3 Gtep en 2050, soit 5,6 GtMS. La consommation potentielle supplémentaire de bois-matériau est évaluée à 123 MtMS en 2050, sachant que la consommation de bois-matériau en 2000 pour la construction, l'ameublement et les infrastructures extérieures était de 410 MtMS.

Figure 26 : Potentiel mondial de production de bois-énergie par les plantations nouvelles en 2050 et débouchés potentiels - World potential production of wood for energy from new plantations in 2050 and potential demand

Scénario à courte rotation avec fortes disponibilités en terre



Dans le cas du scénario A2 (faibles disponibilités en terre), la consommation énergétique totale atteint 21,9 Gtep, et la population 11,3 milliards en 2050, selon le modèle Image. Les débouchés supplémentaires en bois-énergie seraient de 3 Gtep (soit 7,3 GtMS) en 2050 et l'usage potentiel de bois-matériau est évalué à 52 MtMS. Le débouché en bois-matériau est nettement plus faible que dans le scénario B1, cela s'explique par le fait que la croissance du PIB mondial connaît un rythme deux fois plus faible dans A2 par rapport à B1 (voir annexe II).

Pour les résultats qui vont suivre, nous avons considéré qu'il n'y avait pas d'échanges internationaux des produits bois. La production de bois est donc plafonnée au niveau des débouchés potentiels dans chaque région. Dans le scénario à faibles disponibilités en terre, la quasi-totalité de la production de bois-énergie trouve un débouché, hormis en Océanie. La production de bois-énergie issue des plantations nouvelles atteint ainsi de l'ordre de 720 MtMS en 2050, soit 300 Mtep.

Par contre, dans le scénario à fortes disponibilités en terre, plusieurs régions ont des débouchés insuffisants (figure 26, hors biocarburants), notamment l'Afrique et l'Amérique du Sud. Ainsi, moins de 50% de la production potentielle de bois-énergie trouve un débouché, soit 1,5 Gtep (3,6 GtMS) en 2050.

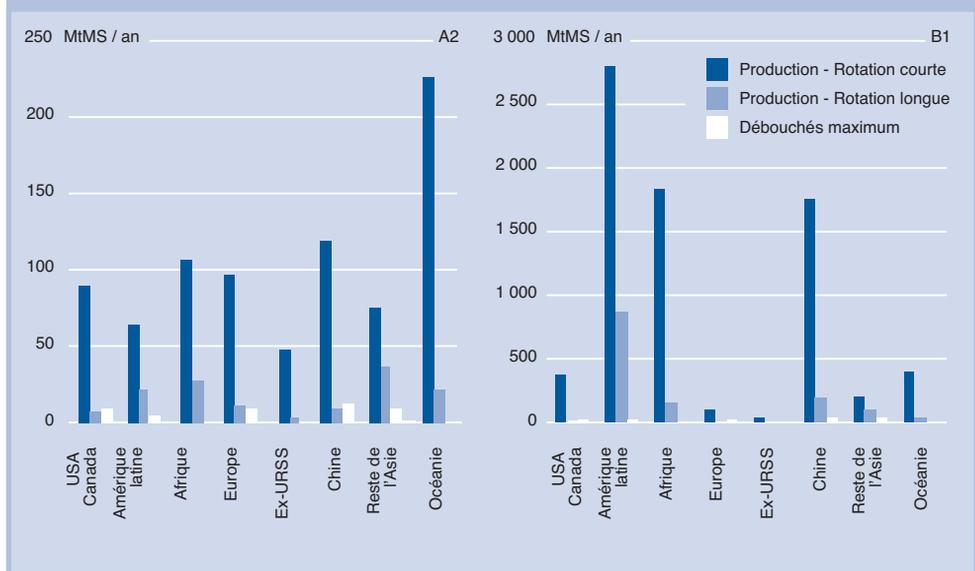
Dans le cas des scénarios dédiés à la production de bois-matériau, celle-ci est très fortement contrainte par les débouchés (figure 27). Si les débouchés peuvent progresser jusqu'à 400 MtMS supplémentaires en 2100, cela reste très en deçà des possibilités de production.

Nous avons traduit dans le paragraphe qui suit cette contrainte de débouchés en terme de ratio entre terres utilisées et terres disponibles (voir tableau 6). En effet, les évaluations de bilan carbone ne portent que sur les terres utilisées, sachant que les produits trouveront un débouché. Nous faisons donc l'hypothèse que les autres terres disponibles ne seront pas plantées faute de débouchés.

Bilan carbone au niveau mondial en 2050

Lorsque nous prenons en compte le bilan carbone global (stockage et substitution sous contrainte de débouchés) pour les quatre scénarios de plantations forestières, ce bilan peut atteindre près de 28 GtC cumulées sur la période 2000-2050, soit en moyenne de près de 0,6 GtC par an dans le scénario de fortes disponibilités en terre (figure 28). Les flux sont en réalité croissants sur la période au rythme de la libération des terres issues de l'agriculture, de la mise en plantations forestières, puis des gains liés aux substitutions directes ou indirectes à des énergies fossiles.

Figure 27 : Potentiel mondial de production de bois-matériau par les plantations nouvelles en 2050 et débouchés potentiels - World potential production of wood for material from new plantations in 2050 and potential demand



Les scénarios dont le bilan est le meilleur sont le scénario à courte rotation pour la production d'énergie et le scénario sans exploitation. Cependant il faut noter que les terres utilisées dans les deux cas, et les intérêts économiques, sont très différents (tableau 6). Le scénario sans exploitation utilise par définition la totalité des terres disponibles puisqu'il n'y a pas de contrainte de débouchés (soit 940 Mha et 140 Mha selon les deux cas de disponibilités en terre). Par contre, le scénario à courte rotation bois-énergie n'utilise que 45% des terres disponibles dans le scénario à fortes disponibilités en terres du fait des contraintes de débouchés, soit environ 420 Mha.

Dans le cas des faibles disponibilités en terre, le scénario à rotation courte bois-énergie utilisera 120 Mha (86% des terres disponibles) pour un bilan carbone cumulé de 7,3 GtC en 2050. Les débouchés étant ici moins contraints, le scénario à courte rotation bois-énergie assure un bilan carbone deux fois meilleur que le scénario sans exploitation.

Les scénarios à courte ou longue rotation pour la production de bois-matériau obtiennent des bilans carbone plus faibles, du fait du manque de débouchés pour ces produits.

Figure 28 : Réductions potentielles mondiales d'émissions de CO₂ cumulées d'ici 2050, suivant le type de plantations sur les terres agricoles - World potential of CO₂ cumulated emission reductions, until 2050, according to different types of forest plantations on agricultural land

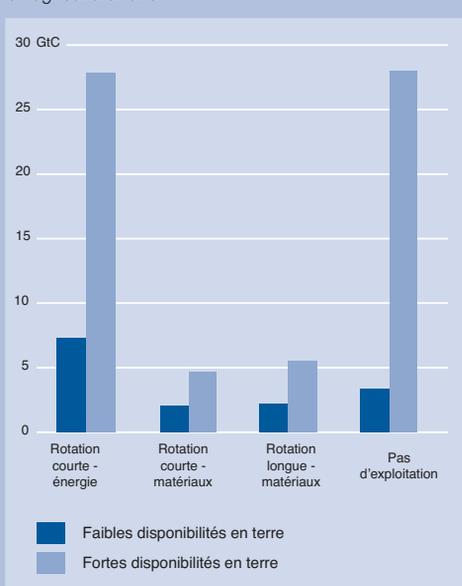


Tableau 6 : Principaux résultats, au niveau mondial en 2050, selon le type de plantations sur terres agricoles - Main results, at the world level in 2050, according to the type of plantations on agricultural land.

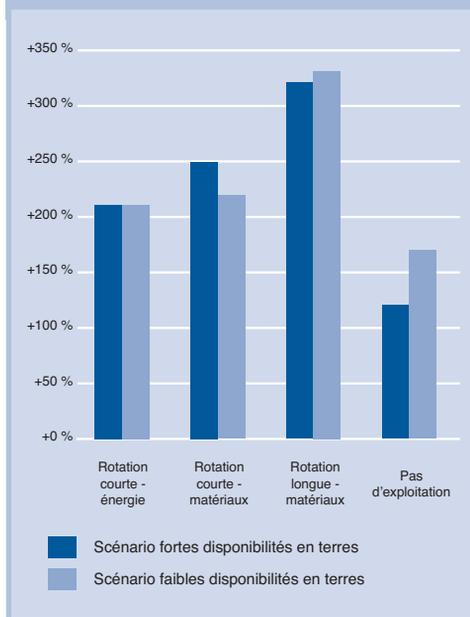
Scénario fortes disponibilités en terres				
	Rotation courte + énergie	Rotation courte + matériaux	Rotation longue + matériaux	Pas d'exploitation
Bilan CO ₂ en GtC cumulées	27,8	4,4	5,4	27,9
Différence de stocks de carbone en GtC	4	0,8	3	31
Terres utilisées / terres disponibles	45%	2%	9%	100%
Part de gains permanents	86%	83%	46%	0%
Scénario faibles disponibilités en terres				
	Rotation courte + énergie	Rotation courte + matériaux	Rotation longue + matériaux	Pas d'exploitation
Bilan CO ₂ en GtC cumulées	7,3	2	2,1	3,4
Différence de stocks de carbone en GtC	2,3	0,3	1,2	3,7
Terres utilisées / terres disponibles	84%	6%	37%	100%
Part de gains permanents	69%	84%	47%	0%

Nous avons conservé pour référence les données concernant la séquestration proprement dite de carbone grâce à la biomasse, au sein des écosystèmes (biomasse aérienne et sol) et au sein des produits bois (cf. ligne « différence de stocks de carbone » –Tableau 6), les valeurs observables en 2050 sont les plus importantes pour les scénarios de plantation sans exploitation de produits et vont de 3,7 à 31 GtC selon les disponibilités en terres. Les bilans carbone plus favorables du scénario bois-énergie s'expliquent donc essentiellement par la substitution d'énergies fossiles.

Potentiel à venir entre 2050 et 2100

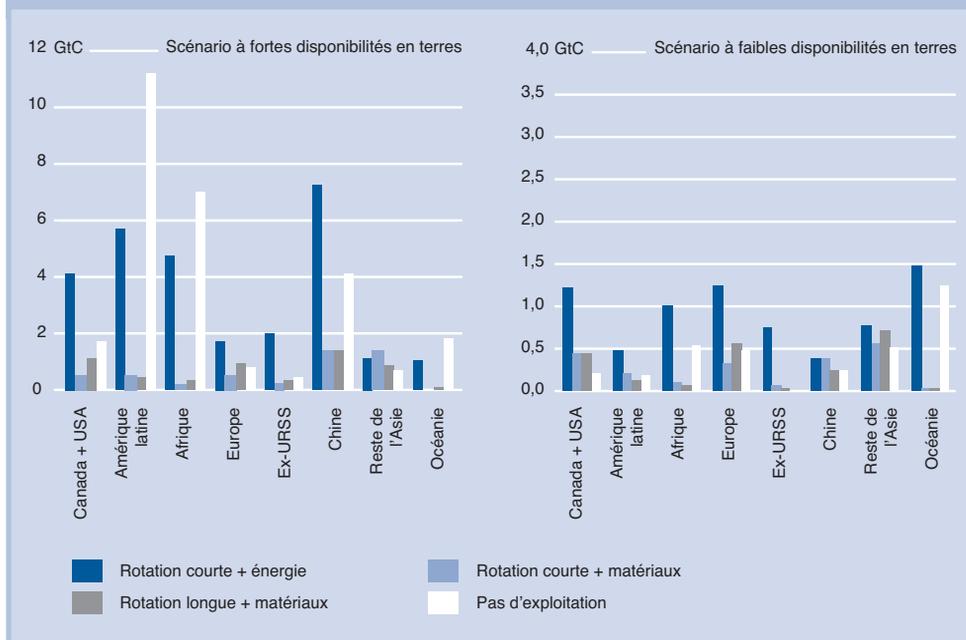
L'héritage laissé après 50 ans ou 100 ans est très différent d'un scénario de plantation à l'autre. En effet, si l'on décidait de réaffecter à un usage non forestier, après 50 ans, les terres plantées, seuls les gains résultant des substitutions seraient acquis de manière permanente. Alors que dans le cas de plantations sans exploitation l'ensemble des gains obtenus jusque là seraient perdus. Le seul avantage dans ce cas serait d'avoir gagné du temps sur l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère. Ceci peut se concevoir, si ces plantations ont été réalisées dans l'optique de permettre la mise en place différée d'autres techniques plus efficaces de lutte contre l'effet de serre additionnel.

Figure 29 : Augmentation des réductions d'émissions de CO₂ entre 2050 et 2100 - Increase of CO₂ emission reductions between 2050 and 2100



Les éléments chiffrés de cet héritage sont donnés dans le tableau 6 par le taux de gains permanents (ligne « part de gains permanents »). Les gains des plantations à courte rotation, avec production de matériaux, sont, en 2050, définitifs à 84 %. Ils le sont à 69 à 86 % pour les plantations énergétiques. Les plantations à rotation longue n'ont pas encore, en 2050 atteint le gros de leur production de matériaux, les gains issus de la substitution ne représentent encore que 46 % des gains totaux. Une seconde manière d'exprimer l'héritage laissé en 2050 est l'évaluation du « potentiel à venir », c'est-à-dire des réductions d'émissions au-delà de 2050 résultant des plantations réalisées entre 2000 et 2050. Nous avons retenu comme indicateur de ce potentiel, le taux d'augmentation possible entre 2050 et 2100 des gains observés en 2050 (figure 29). Il est bien évident que s'il est possible de modéliser à peu près correctement des croissances biologiques, les conditions des marchés, taux de substitution, etc. sont, eux, bien plus aléatoires à si longue échéance. Le plus fort potentiel d'augmentation des gains après 2050 est évidemment obtenu dans le cas des plantations à rotation longue, puisque celles-ci ne sont pas encore dans leur phase de récolte maximale en 2050. Le bilan en 2100 peut alors être de l'ordre de 4,2 fois plus important qu'en 2050. À l'autre extrémité se trouvent les plantations sans exploitation, qui voient leur bilan potentiel en 2100 de 2,2 à 2,7 fois supérieur à celui de 2050.

L'héritage laissé en 2050 par des plantations sans exploitation est donc le plus contraignant, dans la mesure où, pour conserver les gains de carbone, il faut garder le même usage des terres. Toutefois, celles-ci sont encore dans une dynamique relativement forte, puisque leur potentiel de gains à venir peut plus que doubler jusqu'à 2100. Les plantations à rotation courte ont l'avantage de présenter une grande part de gains permanents, et laissent donc plus de latitude aux générations suivantes pour changer éventuellement l'usage des terres sans remettre en cause les gains obtenus jusque là. Leur dynamique est encore plus forte par la suite puisqu'elles peuvent plus que tripler les gains obtenus au cours des 50 années suivantes. Enfin, les plantations à rotation longue présentent une situation intermédiaire en 2050 au regard de la permanence des gains observés, et donc de l'hypothèque sur les terres, mais ont le potentiel d'augmentation des gains le plus fort par la suite. Pour qu'elles donnent tout leur potentiel, il est utile de les conserver avec cet usage sur des durées de l'ordre du siècle.

Figure 30 : Réduction d'émissions de CO₂ cumulées en 2050 - Cumulated CO₂ emission reductions in 2050

Bilan carbone régional selon les scénarios d'exploitation

Nous présentons ici le détail des résultats par régions. Les grandes tendances ne sont pas forcément les mêmes selon les régions, en fonction des critères de disponibilité en terre, de productivité des sols et des débouchés régionaux pour les produits bois. Ce paragraphe reprend, scénario par scénario, les valeurs et tendances régionales, ainsi que les enjeux majeurs qui y sont attachés.

Dans le cas de fortes disponibilités en terre par exemple, le scénario sans exploitation obtient un bilan carbone supérieur à celui pour la production de bois-énergie en Amérique du sud, en Afrique et en Océanie, du fait des débouchés limités dans ces trois régions pour ce type de produit (figures 30). La hiérarchie entre ces deux scénarios s'inverse si les débouchés sont importants (USA-Canada, Europe, ex-URSS et Chine).

1. Plantations à courte rotation pour la production de bois-énergie

Ainsi que nous venons de le voir, lorsque les disponibilités en terre sont fortes et les débouchés pour la production de chaleur et d'électricité limités au niveau régional, seulement 45 % du total de la production mondiale de bois-énergie issues de nouvelles plantations trouveraient un

débouché en 2050 et 30 % en 2100. L'Amérique du Sud et l'Océanie ne seraient en mesure d'absorber que 15 % de leur production en 2050 (8 % en 2100), et l'Afrique, 30 % (15 % en 2100). En Chine, la production de bois-énergie et les débouchés sont du même ordre de grandeur en 2050, et les autres régions produiraient bien moins que ce que le marché pourrait absorber : de 2 à 9 fois moins en 2050. Dans le cas des faibles disponibilités en terres, seule l'Océanie aurait des difficultés à écouler sa production, avec des débouchés pour seulement 42 à 46 % de sa production.

Ces résultats sont bien entendu très dépendants des hypothèses prises :

- si des exportations de bois-énergie vers d'autres régions sont envisagées, 71 % de la production potentielle mondiale trouverait un débouché en 2050 dans le cas des fortes disponibilités en terres. Ainsi la consommation supplémentaire mondiale de bois-énergie passerait de 1,5 Gtep (sans échanges internationaux) à 3,2 Gtep en 2050. Les réductions d'émissions atteindrait alors 59 GtC soit un peu plus de 10 % des émissions de gaz carbonique d'origine anthropique attendues.
- Si on fait évoluer les taux de pénétration dans les diverses filières de 20 à 30% en moyenne par exemple, la totalité de la production de bois-énergie trouverait un débouché en 2050.

- D'autres usages énergétiques du bois peuvent être envisagés, notamment avec la production de biocarburants. En supposant que les gains de substitution par les biocarburants soient comparables à ceux utilisés dans cette étude, on pourrait atteindre un réduction d'émissions du même ordre (59 GtC cumulé en 2050) que celui obtenu dans le cas d'échanges internationaux de bois-énergie.

2. Plantations à courte rotation pour la production de matériaux

Quelque soit le scénario de disponibilité en terres, chaque région est en mesure de produire bien plus que sa consommation potentielle supplémentaire. Les différences dans les bilans carbone entre les deux scénarios de disponibilités en terre proviennent des débouchés possibles. En effet, ces deux scénarios correspondent à des évolutions différentes du monde et en particulier des PIB, sur lesquels nous avons indexé les marchés de la construction et des infrastructures extérieures. D'autre part, selon la durée de vie des produits, les dynamiques peuvent être plus ou moins décalées, menant à des bilans différents en 2050.

La Chine présente les meilleurs potentiels en 2050, suivie par le reste de l'Asie ; l'ensemble de l'Asie totalisant de 50 à 60 % du bilan global. Cela s'explique par le fait que ce sont les régions où les débouchés sont les plus forts. L'Amérique du Sud et les pays industrialisés, à l'exception de l'Océanie, dont le marché est faible, viennent ensuite.

3. Plantations à rotation longue pour la production de matériaux

Quel que soit le scénario de disponibilité en terres, la production mondiale potentielle dépasse là aussi les capacités d'absorption des marchés, mais dans une moindre mesure que pour le scénario à rotation courte. Quelques régions ne sont plus forcément en mesure de produire de quoi saturer leur marché. Ainsi, dans le cas des fortes disponibilités en terres, l'Europe produirait un peu moins que ce qu'elle peut absorber, et dans le cas des faibles disponibilités en terres, l'Amérique du Nord, et la Chine trouvent des débouchés pour l'ensemble de leur production. Dans tous les autres cas, les marchés seraient saturés. La différence principale avec le scénario précédent porte sur l'échéance d'observation. Dans le cas des rotations courtes, en 2050, une majorité

des plantations a atteint son « régime de croisière », l'ordre de grandeur du cycle de rotation étant de 8 à 30 ans. Dans le cas des plantations à rotation longue, pour la plupart d'entre elles, la récolte en fin de rotation n'a pas eu lieu en 2050. Les seuls produits sortant de ces plantations avant 2050 proviennent d'éclaircies intermédiaires.

L'observation de l'échéance 2100 est plus significative de ce point de vue. Dans le cas du scénario de fortes disponibilités en terres, le bilan cumulé de gain de CO₂ en 2050 est de l'ordre de 5,6 GtC. 9 % des terres disponibles suffisent alors pour atteindre ces résultats. La Chine présente encore le meilleur potentiel en 2050, suivie par l'Amérique du Nord, l'Europe et le reste de l'Asie, ces quatre régions totalisant près de 80 % des gains totaux observés en 2050. Là encore, les débouchés conditionnent fortement les résultats. Dans le cas des faibles disponibilités en terres (ou faibles débouchés), les mêmes régions représentent 87 % du bilan en 2050, qui s'élève à 2,2 GtC, le reste de l'Asie ayant un poids moins important au sein de ces régions. 37 % des terres sont alors nécessaires pour saturer les marchés.

4. Plantations sans exploitation

Les scénarios de plantation sans exploitation n'ont par définition pas de contraintes de débouchés. Ainsi, toutes les terres classées disponibles sont susceptibles d'être plantées.

Dans le cas du scénario de fortes disponibilités en terres, le bilan cumulé de gain de CO₂ en 2050 est de l'ordre de 27,9 GtC. L'Amérique du Sud en représente près de 40 %, l'Afrique 25 % et la Chine 15 %. Dans le cas du scénario de faibles disponibilités le bilan mondial est de 3,4 GtC en 2050. On peut distinguer trois ensembles de régions : l'Océanie, d'abord qui représente près de 40 % de ce bilan, la Chine, l'Europe et l'Afrique, qui représentent chacune autour de 15 % et les autres régions, à moins de 7 %.

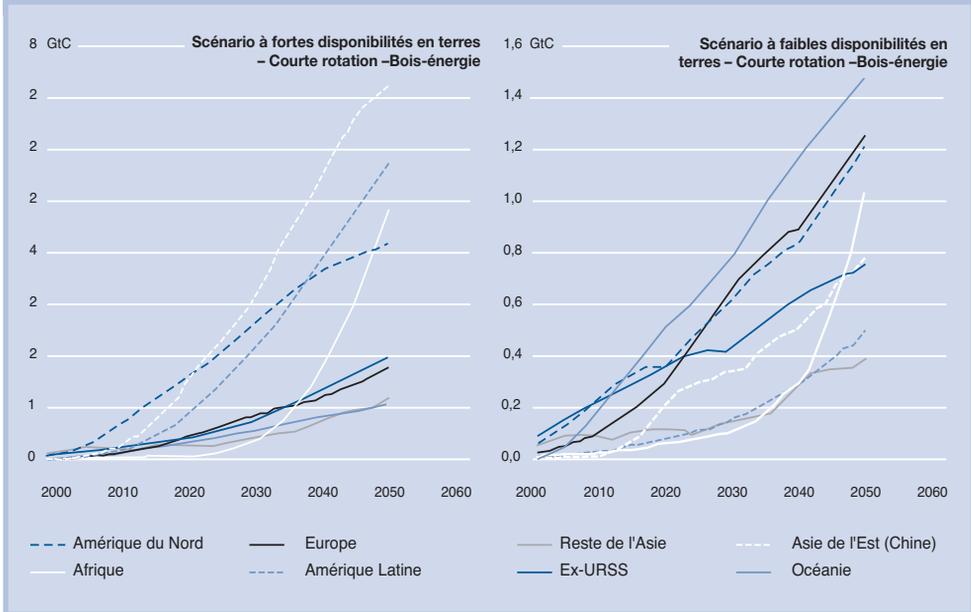
Dynamique temporelle par région

Les gains de carbone annuels évoluent différemment selon les régions, selon le moment où les terres agricoles se libèrent, les types d'exploitation et les rendements biologiques des terres, facteur que l'on retrouve dans la durée des cycles de rotation. Par exemple, la durée des rotations courtes s'échelonne dans nos hypothèses de 8 à 30 ans, selon les types de sols. Ces dynamiques ont des conséquences importantes, bien enten-

du, sur les résultats constatés en 2050 ou 2100. Nous présentons ici les dynamiques de séquestration seulement pour le scénario à courte rotation – bois-énergie à titre d'exemple, afin de souligner les phénomènes à l'œuvre (figures 31). Nous pouvons constater tout d'abord que l'Afrique ne rejoint les autres que très tard, mais avec une dynamique en 2050 beaucoup plus forte. C'est en effet vers la fin de la période 2000 à 2050 que sont envisagées des libérations de terres importantes en Afrique. Inversement, l'Amérique du Nord a une dynamique assez forte dès le départ, qui tend à se ralentir en 2050. Cela traduit le fait que les premières substitutions se font avec un très bon bilan, dans un marché qui n'est pas saturé du tout. L'Amérique du Sud, qui a pourtant un fort potentiel en terres est confrontée à une saturation rapide de ses marchés (15 % de ses terres disponibles sont suffisantes pour répondre aux besoins en bois-énergie pour la production de chaleur et d'électricité). La Chine cumule des facteurs relativement favorables : terres assez abondantes, bilan de substitution correct, et marché assez important, d'où son potentiel important. Les autres régions présentent des bilans de l'ordre de quatre fois inférieurs en 2050, avec une progression régu-

lière. Mais ces bilans ne s'expliquent pas par les mêmes facteurs. L'Océanie est bridée par l'absence de débouchés de ses produits, alors que les autres régions le sont plus par des quantités limitées de terres (Europe, reste de l'Asie) ou des rendements biologiques faibles (Russie). Dans le cas des scénarios de faibles disponibilités en terres, les débouchés des produits ne représentent pas un facteur limitant, sauf en Océanie. C'est donc essentiellement la disponibilité en terres (quantité et période), ainsi que les rendements de celles-ci qui influent les résultats. Le gain total cumulé en 2050 est de l'ordre de 7,34 GtC (8 GtC en l'absence de saturation en Océanie), soit à peine plus d'un pourcent des émissions d'origine anthropique mondiales d'ici là. Les valeurs par région s'échelonnent de 0,5 à 1,5 GtC, avec des progressions assez linéaires d'ici 2050, sauf encore en Afrique, qui démarre plus tard. Les pays industrialisés totalisent les meilleurs résultats, notamment parce que l'écart de terres disponibles entre scénarios faibles et fortes disponibilités y est le plus faible. L'Océanie est en tête, en n'utilisant que 42 % de ses terres disponibles.

Figure 31 : Dynamique des réductions d'émissions de CO₂ liées aux plantations sur terres agricoles selon les diverses régions du monde - Dynamics of CO₂ emission reductions through plantations on agricultural land in different regions of the world



Conclusion

Beaucoup d'enseignements peuvent être tirés de cette étude. Il apparaît en premier lieu que le potentiel de stockage de carbone par des plantations forestières sur des terres agricoles abandonnées est fortement dépendant des terres disponibles. Cet élément est conditionné par l'évolution de la demande alimentaire et des rendements agricoles attendus. Nous avons volontairement retenu une fourchette très large, compte tenu des fortes incertitudes qui pèsent sur les perspectives agricoles mondiales. Les enjeux portent ensuite sur les débouchés des produits bois issus des plantations forestières et enfin sur la dynamique temporelle des gains de carbone obtenus. L'augmentation de l'efficacité de l'utilisation des terres peut conduire à une plus forte disponibilité des terres. Examinons tout d'abord ce cas.

Cas de fortes disponibilités en terres agricoles

La concurrence entre production d'énergie et alimentation humaine est moins forte. Des disponibilités en terre se révèlent, avec toutefois de fortes différences régionales. D'importants progrès agricoles conduisent à la libération de 950 millions d'hectares, principalement en Amérique du Sud, en Afrique et en Chine.

• Plantations avec exploitation

Le potentiel dépend alors des débouchés des produits bois. Rappelons que nous avons considéré dans cette étude, que les marchés étaient régionaux et nous n'avons pris en compte aucun processus d'échange entre grandes régions du monde.

1. La production de bois énergie

Les gains de carbone cumulés pourraient atteindre 60 GtC sur la période 2000-2050, soit environ 10 % des émissions d'origine anthropique estimées, si la totalité de la production de bois-énergie trouvait un débouché. Mais, les zones climatiques à la plus forte productivité biologique sont celles qui consomment le moins de bois pour le chauffage des bâtiments, qui est aujourd'hui le débouché principal du bois énergie. Ainsi, compte-tenu de nos hypothèses sur

les débouchés potentiels du bois-énergie (conduisant à 1,5 Gtep supplémentaires consommées en 2050), la moitié de terres resterait inutilisée. Ainsi, à l'échelle mondiale dans le cas des fortes disponibilités en terres, le potentiel de gain cumulé de CO₂ observable en 2050 serait de l'ordre de 28 GtC pour les scénarios de rotation courte avec production de bois énergie, soit près de 5 % des émissions d'origine anthropique attendues.

2. La production de bois matériau

L'utilisation de bois comme matériau réduit fortement les émissions dès lors qu'il se substitue à des matériaux à fort contenu carbone comme le ciment. Plus encore que pour le bois-énergie, en cas de fortes disponibilités, on rencontre une forte limite en débouchés, ceci dans toutes les régions et en particulier dans les régions mondiales à faible densité de population.

Les scénarios avec production de bois-matériau permettraient un gain de 2 à 5 GtC, soit moins de 1 % des émissions d'origine anthropique attendues. Ces gains sont obtenus en ne plantant que 2 à 9 % des terres disponibles. L'Asie et les pays industrialisés de l'hémisphère nord présentent les meilleurs potentiels, de par la présence de marchés importants.

3. Les bio-carburants

Une troisième forme de débouché est envisageable dans le cas où les capacités de production de la biomasse dépassent largement dans certaines zones du monde les besoins locaux en bois énergie (chaleur et électricité) et en bois matériau. C'est le marché des biocarburants. Il faut alors envisager ce marché dans les mêmes termes que celui des carburants classiques ex-pétrole, c'est-à-dire au niveau mondial.

Cette dernière forme de débouché n'a pas fait l'objet d'une approche détaillée ni sur le plan de la nature des plantations, ni des procédés ni des échanges. Elle doit être comprise comme rendant crédible, dans un monde où les tensions sur les marchés pétroliers sont inévitables, une valorisation de l'ensemble des potentiels.

Si l'ensemble des terres disponibles est utilisé, dans le cas de fortes disponibilités, avec des productions de bois complémentaires selon les débouchés (matériau, chaleur ou carburant), le potentiel de gains de carbone cumulés serait de l'ordre de 60 GtC, soit au maximum 10% des émissions anthropiques telles qu'envisagées.

Nous sommes alors placés devant une contribution significative, d'autant plus intéressante qu'elle est facteur de développement local, mais qui n'efface pas la nature du défi que nous pose l'effet de serre.

• Plantations sans exploitation

En l'absence d'exploitation la capacité de stockage du CO₂ se limite à la phase de croissance de la forêt. Parvenue à maturité, son bilan carbone se stabilise. Les gains potentiels observables atteignent 28 GtC cumulés en 2050, ceci en utilisant l'ensemble des terres disponibles.

La question posée par ce scénario est celle de la permanence des gains carbone et de la réversibilité de l'usage des terres. En effet, les substitutions permettent d'éviter des émissions de CO₂ lors de la fourniture d'un service. Ces gains sont alors acquis définitivement. À l'inverse, un prélèvement de carbone de l'atmosphère par stockage dans l'écosystème est réversible. Si pour une raison quelconque, la parcelle change d'affectation, le carbone stocké est susceptible d'être émis. Certes, la partie biomasse de cet écosystème peut alors être utilisée en substitution et donc être « convertie » en des gains permanents, avec un taux de conversion qui peut être inférieur ou supérieur à 1, selon le type de substitution qui a lieu. Mais, d'une part, l'ensemble de la biomasse n'est en général pas utilisé, et d'autre part, le carbone du sol n'est pas maîtrisé et peut conduire à des émissions différées importantes. Sauf pour assurer la protection des sols, ce qui représente de faibles surfaces, l'intérêt de plantations sans exploitation pourrait en outre paraître discutable aux pays en développement dont la priorité est effectivement de se développer. Enfin l'héritage laissé aux générations futures en charge de ces plantations représenterait une contrainte supplémentaire.

Une part importante des gains obtenus par les plantations avec exportation de produits en 2050 est ainsi définitive, étant le fruit des substitutions. Dans le cas des scénarios dédiés à la production de bois-énergie, entre 70 % et 85% des gains seraient permanents en 2050. Les scénarios avec production de bois-matériau permettent d'obte-

nir des gains permanents pour les plantations à courte rotation de l'ordre de 85% en 2050 et 45 % pour les rotations longues. Inversement, les gains obtenus dans le cas des plantations sans exploitation sont uniquement le résultat d'une variation de stock et sont, de ce fait, réversibles.

Il apparaît enfin qu'une politique de plantations forestières dans le cadre de la lutte contre le changement climatique est clairement une stratégie de long terme. Elle ne peut être considérée comme un moyen de « gagner du temps » par rapport aux politiques de réduction d'émissions de CO₂, c'est-à-dire permettre des gains de carbone significatifs en attendant que les politiques de réductions d'émissions de CO₂ se déploient. Nous constatons que les gains de carbone liées à des plantations forestières conduisent à des résultats significatifs selon les scénarios qu'au-delà de 2030 ou 2050, voir plus pour les longues rotations, pour lesquelles 100 ans est un ordre de grandeur moyen pour observer l'ensemble des phénomènes en jeu. Ceci s'explique par le fait que les effets prédominants des plantations avec exportation de produits sont dus aux produits eux-mêmes.

Cas de faibles disponibilités en terres agricoles

Les faibles disponibilités en terres peuvent résulter de deux phénomènes distincts ; d'une part d'une croissance démographique mondiale forte augmentant les besoins alimentaires ou /et d'autre part d'une faible augmentation des productions annuelles alimentaires par hectare.

Dans ce contexte, les réductions d'émissions nettes de gaz carbonique à attendre de nouvelles plantations forestières sont forcément limitées. Dans notre étude, qui utilise le scénario A2 du GIEC, les gains cumulés sur la période 2000-2050 varient entre 2 GtC et 7 GtC, ce qui représente au maximum de 1% des émissions anthropiques attendues.

Avec le scénario A1 du GIEC, que nous n'avons pas étudié en détail ici, qui porte une plus faible attention aux économies d'énergie et aux utilisations efficaces des terres pour l'alimentation, il faudrait même convertir 1,1 milliard d'hectares de terres forestières ou de pâturages en terres pour la production d'aliments d'ici 2100 ! Ce qui pourrait se traduire par une augmentation des émissions conséquentes, entre 100 et 200 GtC d'ici la fin du siècle.

En conclusion, il faut aussi noter que les stocks de carbone des boisements sur terres agricoles

devenant vacantes n'augmentent que lentement alors que les diminutions de stocks consécutives aux déboisements de forêts existantes, ou aux conversions des prairies, sont brutales et fortes. Cette dissymétrie entre plantations forestières sur des terres agricoles et déboisements devrait conduire à tout d'abord à chercher à éviter des déboisements ; ceci au moyen d'une augmentation des productions agricoles par hectare, tout au moins tant que ces augmentations n'entraînent pas par ailleurs des nuisances inacceptables ou contreproductives. Elle devrait aussi conduire à optimiser dans un premier temps l'exploitation et l'utilisation, des ressources existantes ; en particulier celles des forêts (notamment des rémanents) mais aussi des prairies ou savanes non exploitées lorsque les technologies de conversion des biomasses herbacées seront disponibles.

La poursuite de l'augmentation des productions agricoles annuelles par hectare peut ensuite conduire à libérer des terres utilisées actuellement pour des productions alimentaires. C'est dans ce contexte particulièrement étudié ici que l'on peut continuer à diminuer les émissions nettes de gaz à effet de serre, d'une part en augmentant les stocks de carbone dans les biomasses et dans les sols par boisements de terres agricoles devenues vacantes et d'autre part en utilisant efficacement les biomasses produites par ces boisements et utilisées pour maximiser les réductions d'émissions de gaz carbonique provenant des produits (des combustibles, des carburants et des matériaux) fossiles.

Annexe I : Hypothèses sur les durées de rotation des plantations forestières (en années)

	Rotations courtes	Rotations longues
USA	28	112
Canada	20	80
Amérique centrale	8	32
Amérique du Sud (Nord)	8	32
Amérique du Sud (Sud)	13	52
Afrique du Nord	12	48
Afrique sub-saharienne	8	32
Europe (OCDE)	20	80
Europe de l'Est	20	80
Ex-URSS	29	116
Moyen-Orient	12	48
Asie	12	48
Océanie	20	80

Annexe II : Description des scénarios B1 et A2

Hypothèses des scénarios

Famille B1	Famille A2
Stabilisation de la population (8,7 milliards en 2050, et 7,1 en 2100)	Croissance de la population (11,3 milliards en 2050, 13,5 en 2100) ; Ralentissement de la baisse de fertilité quand les revenus sont plus faibles
Mondialisation, forte croissance : PIB à 160 Md \$95 en 2050 (33 Md \$95 en 2000), haute technologie	PIB à 97 Md \$95 en 2050 ; mise en valeur de l'identité régionale (culturelle) ; faible priorité environnementale
Équilibre entre intervention des gouvernements et marché dans le développement économique.	-
Recherche des aspects immatériels de la qualité de vie. Convergence des revenus et diffusion rapide des technologies économes vis-à-vis des ressources	Non convergence des revenus par régions et lente diffusion des technologies ; barrières commerciales.

Dynamique du système énergétique

Famille B1	Famille A2
Forte mise en valeur de l'efficacité énergétique de son approvisionnement ; économie de services.	Faible taux d'innovation dans l'efficacité énergétique, due à des barrières commerciales et des manques de capitaux
La très forte préférence pour des carburants propres et la diminution rapide des stocks entraînent la hausse des prix des carburants fossiles. Ceci accélère encore la pénétration de techniques plus efficaces et économes vis-à-vis du carbone, tendance accélérée par la valorisation de l'expérience	L'usage du charbon s'intensifie dans de nombreuses régions : vu comme la plus économiques des sources d'énergie disponibles, alors que le pétrole et le gaz deviennent plus cher et moins disponibles ; Les options sans carbone, nécessitant un investissement initial très important ne pénètrent que très lentement dans la plupart des régions

Dynamique du système alimentaire

Famille B1	Famille A2
Forte augmentation du volume d'échanges dans l'industrie agro-alimentaire	Augmentation modérée du volume d'échanges dans l'industrie agro-alimentaire
Augmentation rapide de la productivité des aliments et de l'élevage avec forte efficacité de l'usage des fertilisants	Lente augmentation de la productivité des cultures et de l'élevage
La consommation individuelle de produits issus de l'élevage est 10 % plus faible que pour le scénario A1 en 2050 et 20 % en 2100	Lente augmentation de la consommation individuelle de produits issus de l'élevage, à mesure que le PIB augmente

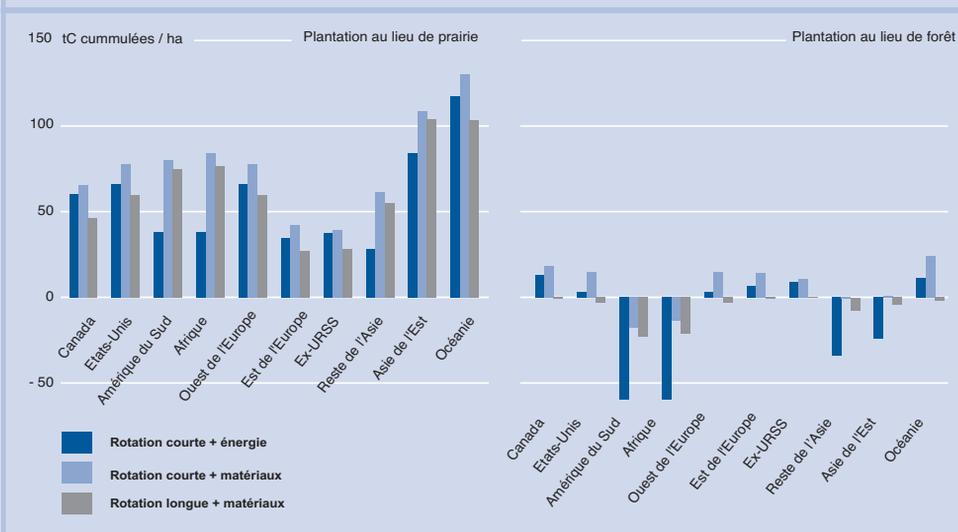
Annexe III : Estimation des durées de vie moyennes des diverses catégories de produits bois et production mondiale en 2000 - Sources : Apps et al., 1999 ; Bateman and Lovett, 2001 ; FAO 2000.

	Durée de vie moyenne		Production mondiale en 2000 (en MtC)
	basse (années)	haute (années)	
Sciages	30	60	141
Autres Bois Rond Industriels	15	30	54
Placages	10	15	3
Contre-plaqué	15	20	21
Panneaux de particules	10	20	31
Panneaux de fibres durs	10	15	3
Panneaux de fibres MDF	10	15	7
Panneaux de fibres isolants	15	30	2
Papiers cartons	2	4	239
Résidus	1	1	83
Bois-énergie	1	2	649
Total	5,6	11	1233

Annexe IV : Gains de stock total de carbone (biomasse + sol + produits) par hectare

Le bilan des stocks totaux à 50 ans correspond à la prise en compte des stocks de biomasse vivante, de carbone du sol et de carbone dans les produits bois.

Le bilan peut être négatif si l'évolution naturelle est un boisement spontané. En effet, dans ce cas, et essentiellement dans les zones tropicales, la durée de vie moyenne des produits n'est pas assez longue pour compenser le différentiel de stocks des écosystèmes entre plantations gérées et forêts non exploitées. Ce phénomène s'amplifie dans le temps, pour arriver à un équilibre. Lorsque les plantations ont lieu sur des terres évoluant naturellement vers de la prairie, le différentiel devient bien plus favorable. La part du réservoir produits dans les gains de stocks totaux est plus importante dans les régions chaudes, de 60 à 70 % dans le cas des scénarios courte rotation avec production de matériaux, 30 à 40 % dans les scénarios de rotation longue.



Bibliographie

- GIEC, *Rapport spécial : Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*, 2000.
- Tissot, B., *Quel avenir pour les combustibles fossiles ? Les avancées scientifiques et technologiques permettront-elles la poursuite d'un développement soutenable avec les énergies carbonées ?*, C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, 2001.
- Collomb P., *Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050*, Economica, 1999.
- FAO, *Agriculture mondiale : horizon 2015 / 2030 - Rapport abrégé*, 2002.
- Hoogwijk M., *On the global and regional potential of renewable energy*, Thèse Université d'Utrecht, 2004.
- IMAGE team, *The IMAGE 2.2 implementation of the SRES scenarios : A comprehensive analysis of emissions, climate change and impacts in the 21st century*, RIVM Cd-Rom publication, 2001.
- Nakicenovic N. et al., *Special Report on Emissions Scenarios*, 1990.
- FAO, *State of the world forests*, 2000.
- Buchanan A.H., Levine S.B., *Wood-based building materials and atmospheric emissions*, Environmental Science and Policy, 1999.
- ENERDATA s.a., *Banque de données mondiales pour l'énergie*, 2000.
- Hendriks C.A., Worrell E., de Jager D., Blok K. and Riemer P., *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry*, 1998.
- CLIP, *Le bois-énergie en Europe*, Les cahiers du Club d'ingénierie Prospective Energie et Environnement n°8, 1998.
- World resource institute, *Earthtrends*, 2004.
- Goudrian J, Groot J.J.R, Uithol P.W.J., *Agro-ecosystems and Primary Productivity*, 2001.
- Johansson T.B., Kelly H., Reddy A.K.N., and Williams R.H., *A renewables-intensive global energy scenario* in "Renewable Energy : Sources for fuels and Electricity", Washington D.C. : Island Press, 1993.
- Fischer G. and Schratzenholzer L., *Global bioenergy potentials through 2050*, Biomass and bioenergy, 2001.
- Sørensen, B., *Long term scenarios for global energy demand and supply : four global greenhouse mitigation scenarios*, 1999.
- Lashof D.A., and Tirpak D.A., *Policy options for stabilizing global climate*, Lashof D.A., and Tirpak D.A. editors, 1990.
- Berndes G., Hoogwijk M., van den Broek R, *The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies* *Biomass & Bioenergy*, 2003.
- Alcamo J. (Ed), *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994.
- IPCC, *Climate Change 1995, Impacts, Adaptation, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis*. The Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Watson, M. C. Zinyowera, R. H. Moss, (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- Olsson M. and Boström B., *Uncertainties in measurements of carbon stocks in forest soils - effects of silvicultural measures*, 1999.
- Gitz V., and Ciais P., *Amplifying effects of land-use change on future atmospheric CO₂ levels* *Global biogeochemical cycles*, 2003.
- Houghton R.A. and Hackler J.L., *Carbon flux to the atmosphere from land-use change: 1850 to 1990*, Technical report, ORNL / CDIAC, 2001.
- Friedlingstein P., *Modélisation du cycle du carbone biosphérique et étude du couplage biosphère-atmosphère*, PhD thesis, Aeronomica acta A N.392-1995, 1995.
- Davis M.R., Allen R.B., Clinton P.W., *Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand Nothofagus forest*, Forest ecology and management, 2003.
- Schroth G., D'Angelo S.A., Teixeira W.G., Haag D. and Lieberei, *Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years*, Forest Ecology and Management, 2002.
- Karjalainen T., Kellomaki S. Pussinen A., *Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon*, Sylvania Fennica, 1994.
- Karjalainen T., Pussinen A, Kellomaki S, Maki-paa R, *Scenarios for the carbon balance of Finnish forests and wood products* *Environmental Science and Policy* 2 (2), 1999.
- Schlamadinger B. and Marland G., *The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle*, Biomass and bioenergy, 1996.
- Maclaren J.P, Wakelin S.J., *Forestry and forest products as a carbon sink in New Zealand*, FRI Bulletin, 1991.
- Winjum J.K., Brown. S., Schlamadinger B., *Forests harvests and wood products : sources and sinks of atmospheric carbon dioxide*, Forest Science, 1998.

- Börjesson P, Gustavsson L, *Greenhouse gas balance in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspective*, Energy Policy, 2000.
- Maugham C.W., Clough, P.W.J, *The market for sawn Timber and panel products in New Zealand*, Policy Paper N°12, 1986.
- Lauer, *Effect of wood as construction material and heating fuel on the life cycle greenhouse gas emissions of residential houses in Austria*
- Künniger t., Richter K., *Ökologischer Vergleich von Freileitungsmasten aus imprägniertem Holz, armierten Beton und korrosiongeschütztem Stahl*, Forschungsbericht EMPA Abt. Holz, Dübendorf, 1995.
- Alcamo J., leemans R. and Kreilemen E. (Eds), *Global change scenarios of the 21st century. Results from the IMAGE 2.1 model*, Pergamon & Elseviers Science. London, 1998.
- Bourgeon G., Karsenty A., *Les options pour une contribution du secteur rural en Tunisie à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'atténuation du changement climatique*, 2000.
- Apps M.J., Kurz W.A., Beukema S.J., Bhatti J.S., *Carbon budget of the Canadian forest product sector*, Environmental Science and Policy, 1999.
- OCDE, *Environmental policy in the steel industry : using economic instruments, unclassified*, COM/ENV/EPOC/DAFFE/CFA(2002)68/FINAL, January 2003.
- MESTEEL, Crude steel production by process, <http://www.mesteel.com/cgi-bin/w3-mysql/goto.htm>, http://www.mesteel.com/info/crude_steel_prod_process.htm, 2002.

Notes

- ¹ GIEC, 2000.
- ² Collomb, 1999.
- ³ FAO, 2002.
- ⁴ FAO, 2002.
- ⁵ FAO, 2002.
- ⁶ Hoogwijk, 2004.
- ⁷ Johansson et al., 1993.
- ⁸ Fischer et al., 2001.
- ⁹ Sørensen, 1999, Fischer et al., 2001.
- ¹⁰ Lashof et al., 1990.
- ¹¹ Alcamo et al., 1994.
- ¹² IMAGE team, 2001.
- ¹³ Berndes et al., 2003.
- ¹⁴ Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG ou GWP en anglais) d'un gaz, exprimé à une échéance donnée, correspond à la quantité de gaz qui mène au même réchauffement qu'une unité de CO₂ à cette échéance. L'échéance est importante (10 ans, 100 ans par exemple), car la durée de vie de ce gaz dans l'atmosphère est différente de celle du CO₂.
- ¹⁵ Olsson and Boström, 1999.
- ¹⁶ Gitz et Ciaï, 2003.
- ¹⁷ Houghton et Hackler, 2001.
- ¹⁸ Friedlingstein, 1995.
- ¹⁹ Goudrian et al., 2001.
- ²⁰ Karjalainen et al. 1994 et 1999, Schlammadinger et Marland, 1996, Buchanan et Levine, 1999.
- ²¹ Maclaren et Wakelin 1991, Winjum et al. 1998.
- ²² Houghton et Hackler, 2001.
- ²³ Cahier du CLIP n°8, 1998.
- ²⁴ Hendriks et al. 1998, Fossdal, cité par Börjesson et Gustavsson, 2000.
- ²⁵ Maugham et Clough, 1986.
- ²⁶ Künniger et Richter, 1995.
- ²⁷ Rappelons que nous avons retenu, pour la substitution indirecte, une décroissance de 1%/an des taux considérés, pour tenir compte des progrès techniques qui ont lieu dans toutes les filières et mènent à une réduction des émissions par mètre carré construit. Les substitutions portent alors sur des quantités d'émissions plus faibles. À l'échéance de 100 ans et même 50 ans, ce coefficient mène à des diminutions très fortes. Sans ce coefficient, les valeurs obtenues pour le bilan peuvent être jusqu'à 40 % plus élevées en 2100.

N°1 - Octobre 1993 -

Le moteur à explosion : exercice de prospective mondiale des transports routiers
L'autocondamnation : un exercice de prospective mondiale à long terme pour l'automobile
Capture et stockage du gaz carbonique produit par les activités industrielles

N°2 - Mai 1994 -

Les enjeux environnementaux de la pénétration du véhicule électrique en Europe
Etude comparative des émissions de polluants associées à l'utilisation de carburants de substitution
Emissions de gaz à effet de serre : de la production d'hydrogène à son utilisation en tant que carburant automobile

N°3 - Octobre 1994 -

Le bois-énergie en France : évaluation prospective du potentiel mobilisable à l'horizon 2015 et ses conséquences sur l'environnement

N°4 - Juin 1995 -

Etude de faisabilité d'une centrale solaire en Tunisie
Impact environnemental d'une désulfuration poussée des gazoles

N°5 - Juillet 1996 -

Déchets-Energie-Environnement : étude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020

N°6 - Septembre 1996 -

Le bois-électricité : Perspectives de développement de la production d'électricité à base de bois en France à l'horizon 2015
Pollution des sols : Contamination des sols par les rejets d'hydrocarbures : analyse du marché de la réhabilitation

N°7 - Janvier 1997 -

MDE-L'éclairage en France : diffusion des technologies efficaces de maîtrise de la demande d'électricité dans le secteur de l'éclairage en France

N°8 - Janvier 1998 - anglais/français -

Le bois-énergie en Europe : évaluation du potentiel mobilisable à l'horizon 2020, impacts sur l'environnement global et conditions socioéconomiques de sa mobilisation.

N°9 - Décembre 1998 -

Automobile et développement durable : bilan environnement-matières premières 1975-2050
Automobile et gaz naturel : scénarios prospectifs et impact sur l'environnement

N°10 - Septembre 1999 -

Biomasse et électricité
Géothermie des roches fracturées

N°11 - Décembre 1999 -

Le froid domestique : étiquetage et efficacité énergétique

N°12 - Mars 2001 -

Parc automobile et effet de serre : agir sur le parc automobile pour réduire l'effet de serre

N°13 - Avril 2001 -

Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif
Le véhicule électrique à l'horizon 2050 : introduction du véhicule électrique dans le parc français des véhicules particuliers à l'horizon 2050

N°14 - Octobre 2001 -

Transports à l'horizon 2030 : Le secteur des transports en France à l'horizon 2030 selon le scénario «Etat protecteur de l'environnement» du Commissariat Général du Plan

N°15 - Janvier 2004 -

Cogénération et émissions de CO₂ : Impact de la pénétration de la cogénération décentralisée de faible puissance sur les émissions de CO₂ en France

N°16 - Septembre 2004 -

Habitat et développement durable : les perspectives offertes par le solaire thermique
Emissions de particules : étude prospective sur les émissions de particules primaires en France à l'horizon 2030