# LES EMISSIONS ET LES REDUCTIONS D'EMISSIONS DE GES EN NOUVELLE-CALEDONIE

Coordinateur :
A. Riedacker

Experts :
P. BABY, P. COUTERON, J.-M. MOST

# 1. Les émissions et les réductions d'émissions dans le monde d'ici à 2050

Les chocs pétroliers avaient fait prendre conscience de la nécessité de réduire les consommations d'énergies fossiles. Avec la menace climatique, il faut continuer à maîtriser ces consommations : non seulement parce que les énergies fossiles ne sont pas renouvelables, mais également parce que leurs consommations génèrent des quantités plus ou moins importante de GES, en particulier de gaz carbonique, par unité d'énergie primaire. Or ces gaz s'accumulent en partie dans l'atmosphère. Jusqu'au milieu du siècle dernier, les océans et les écosystèmes terrestres (forêts, prairies et cultures) étaient capables d'absorber ces excédents. Cela n'est plus le cas. L'augmentation des concentrations de ces gaz dans l'atmosphère augmente donc l'effet de serre. En cas de refroidissement rapide du climat, à la vielle d'une nouvelle glaciation cela aurait pu apparaître comme une bonne nouvelle. Nous ne sommes malheureusement pas dans cette situation.

En continuant à augmenter les émissions nettes de GES, le risque est aujourd'hui d'aboutir à des dérapages incontrôlables du climat.

C'est le rapport de 1990 du Giec (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) qui a alerté la communauté internationale sur la nécessité d'agir pour limiter le changement climatique provoqué par les émissions de GES.

**Le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat**

**(Giec ou IPCC)**

Le Giec, mis en place en 1988 sous l'égide des Nations unies, dépend de l'Organisation mondiale de la météorologie (OMM) et du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Il ne prescrit jamais ce qu'il faut faire, mais fait l'état des connaissances sur la question climatique pour les décideurs politiques : sur la climatologie (Groupe 1), sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques (Groupe 2), sur les moyens d'atténuer ces changements en réduisant les émissions de GES (Groupe 3) et sur les méthodes pour déterminer ces émissions (Groupe 4). Les trois premiers groupes publient tous les 4 ou 5 ans trois rapports de base, de 600 à 800 pages chacun, faisant l'état des connaissances sous la seule responsabilité des scientifiques rédacteurs, mais revus par d'autres scientifiques et par les gouvernements auxquels ils doivent dire comment ils ont pris en compte leurs remarques.

Ils rédigent aussi trois résumés techniques d'environ 50 pages. Et ils publient enfin pour les décideurs également trois résumés d'une dizaine de pages chacun, puis un résumé général, *co-écrits, ligne après ligne, par des scientifiques ayant rédigé les rapports* ***et*** *des représentants des gouvernements.* Approuvés par consensus, ces résumés ne peuvent pas faire mention d'éléments contraires aux rapports de base, ou n'y figurant pas. En revanche ils sont évidemment fortement édulcorés.

Cette architecture à trois niveaux garantit la qualité et l'indépendance des évaluations scientifiques de base. Le Giec qui a reçu le prix Nobel de la Paix en 2007, conjointement avec Al Gore, a eu successivement comme président Bert Bolin, (Suède), Robert Watson (États-Unis) et R.K. Pachaury (Inde).

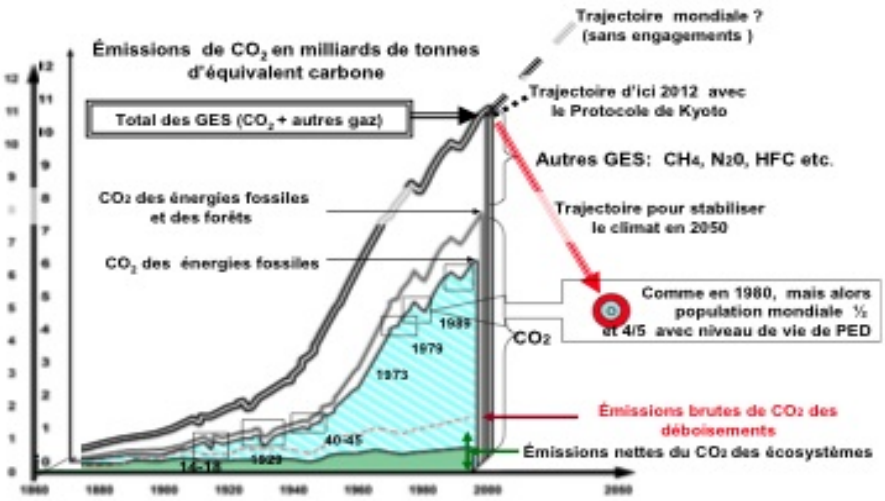
Pour ce qui concerne la N.-C., on notera également le rapport spécial sur la capture et la séquestration géologique du $CO_2$ paru en 2005.

**Sur http://www.ipcc.int on trouve les rapports mentionnés ci-dessus ainsi que les rapports spéciaux. Cf. bibliographie.**

Le rapport de 2007 du Giec, en se fondant sur les publications scientifiques parues jusqu'en 2005, ne prévoyait encore pour la fin du siècle, sous le double effet de la dilatation

thermique des océans et de la fonte des calottes glaciaires, qu'une élévation du niveau des mers de 18 à 59 cm. Les concentrations de ces gaz dans l'atmosphère sont en effet passés de 280 ppm au début de la révolution industrielle à près de 400 ppm aujourd'hui. D'après des travaux plus récents, le niveau moyen des mers pourrait même s'élever d'un mètre d'ici à 2100, si nous continuons avec le rythme actuel d'émissions de GES (Ramstorf, 2009). Mais par la suite, au-delà de l'an 2100, cette élévation se poursuivrait. Pour stabiliser le climat d'ici à 2050 il faudrait diviser les émissions mondiales actuelles par 2. (Giec 2007) ! En 2050 le climat serait alors plus chaud qu'actuellement d'environ 2 °C. En effet, même si on stoppait brutalement toutes les émissions anthropiques de GES, le réchauffement se poursuivrait encore pendant une trentaine d'années à cause de l'excédent de ces gaz déjà accumulé dans l'atmosphère. Mais du moins espère-t-on, en divisant ces émissions par 2, pouvoir éviter des changements encore beaucoup plus importants et plus menaçants qui, sinon, pourraient apparaître vers la fin de ce siècle et au XXII^e siècle ! Aussi les chefs d'États présents au sommet du G8 à Hokkaido au Japon, en juillet 2008, ont-ils adopté cet objectif de stabilisation du climat pour la communauté internationale.

**Figure 1 – Évolutions des émissions de GES depuis la révolution industrielle**




**(1) de la totalité des GES considérés sous la convention climat, (2) du gaz carbonique provenant des combustibles fossiles, (3) des déboisements (18 à 20 % des émissions des combustibles fossiles) et (4) des émissions nettes des écosystèmes, qui comprennent les absorptions nettes de $CO_2$, notamment dans les forêts de l'hémisphère nord, mais qui sont très peu précises. À droite figurent l'évolution des émissions mondiales, d'une part sans mesures spécifiques, d'autre part avec le protocole de Kyoto, et enfin l'évolution souhaitable de la trajectoire des émissions pour que la température moyenne n'augmente pas de plus de 2 °C d'ici à 2050. Les rectangles indiquent les périodes de crises, depuis la première guerre mondiale, et les diminutions correspondantes des émissions provenant des énergies fossiles. Les émissions devront revenir, en 2050, au niveau de 1980, lorsque la population était la moitié de ce qui est attendu en 2050 et quand les 4/5^e de la population mondiale vivaient dans des pays en développement.**

**Source : d'après les données du Giec, 2007.**

Quelles conséquences cela aura-t-il sur l'évolution des consommations énergétiques et sur les changements d'utilisation des terres ?

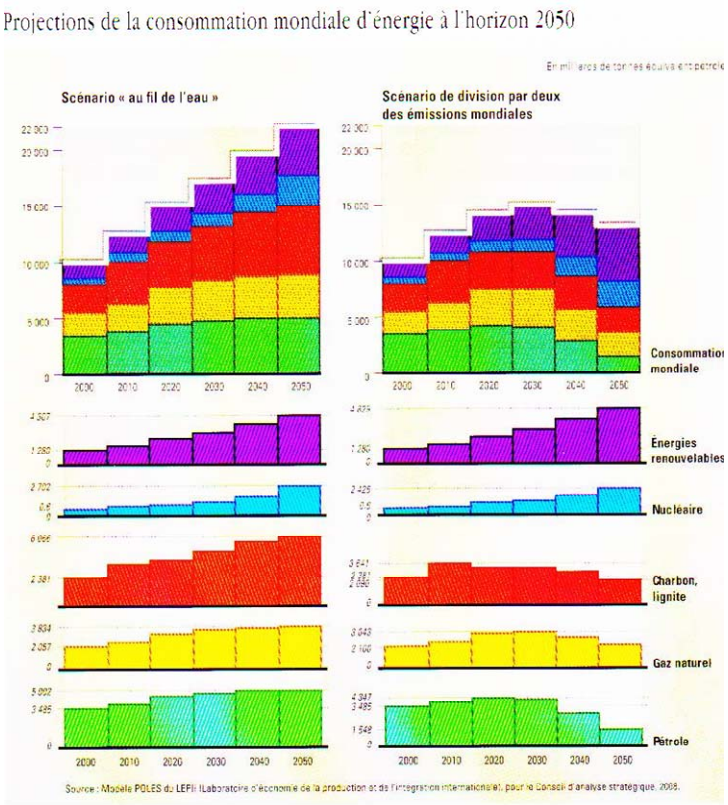
## Quelles conséquences pour les consommations d'énergie fossiles ?

Il est toujours difficile de faire de prévisions. Très souvent dans le passé, celles des prévisionnistes de l'énergie ont dépassé les consommations réellement observées par la suite.

Pour situer les enjeux, on peut néanmoins s'appuyer sur deux scénarios extrêmes de modélisation des évolutions probables de ces consommations d'énergie (figure 2) obtenus au CNRS par l'équipe de P. Cricki (2009). Dans le premier scénario, appelé au fil de l'eau, car sans contrainte de réduction des émissions de GES, les consommations mondiales de charbon et de pétrole continueront à augmenter fortement et doubleront sans doute d'ici à 2050. Cela aura évidemment des effets sur les prix des combustibles.

Dans le second scénario, destiné à stabiliser le climat en divisant les émissions mondiales de GES par 2, ces consommations devront être, en 2050, inférieures de 40 % à ce premier scénario et n'atteindre que 13 Gtep au lieu de 23 Gtep ! Mais comme cela ne suffira pas pour stabiliser les émissions, sur les 16 milliards de tonnes $CO_2$ générés par ces combustibles, environ un tiers devra être capté à la sortie des grandes chaufferies et stocké dans la croûte terrestre. Sous ce scénario les énergies n'émettant pas d'émissions nettes de $CO_2$ représenteraient 55 % de la fourniture totale d'énergie en 2050. Dans les pays industrialisés, cette contrainte est encore plus forte. Selon la loi d'Orientation sur l'énergie approuvée en 2005, ces émissions devront en effet, à cet horizon, avoir été divisées par 4 en France métropolitaine (Radanne, 2004). Aux États-Unis et au Canada elles devraient avoir été divisées par 8 !

**Figure 2 – Projections de la consommation mondiale d'énergie d'ici à 2050 d'après le modèle Poles pour un scénario sans contraintes de réductions de GES (à gauche) et pour un scénario ayant pour objectif la stabilisation du climat (à droite).**



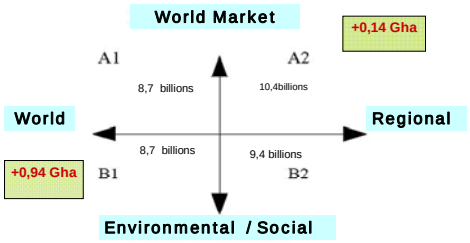

**Source : d'après Cricki (2009).**

## Quelles conséquences pour la gestion des espaces ruraux du monde ?

Il faudra aussi tenter de préserver les stocks de carbone dans la végétation donc ralentir les déboisements et, si possible, favoriser les boisements de terres non cultivées tout en produisant des bioénergies. Pour limiter les déboisements on pourra souvent augmenter les

rendements par hectare de surface cultivée, de prairie et des forêts (Riedacker 2006, 2008a et c et 2009a). Il faudra également tenter de reboiser les terres agricoles qui pourront devenir disponibles d'ici à 2050 (Dameron *et al.*, 2005 ; Riedacker *et al.*, 2005). Sous les deux scénarios extrêmes (A2 et B1 de la figure 3) d'utilisation mondiale des terres agricoles, les terres devenant disponibles pourront aller de 140 M ha (scénario A2) à 940 M ha (scénario B1)[1].

**Figure 3 – Surfaces cumulées des terres devenant disponibles d'ici à 2050 dans le monde, sous deux scénarios extrêmes du Giec**




**A2 à forte croissance de la population mondiale et une orientation vers le marché mondial et B1 avec une croissance démographique plus faible et une économie tournée vers le développement durable (moins de consommations énergétiques et de viande, mais très ouvertes aux innovations). Dans le scénario B1 les terres sont également utilisées plus efficacement grâce à l'adoption plus facile des innovations.**

**Source : Dameron *et al.*, 2050.**

Les réductions cumulées des émissions de $CO_2$ (en GtC), d'ici à 2050, provenant de l'accroissement du stockage de carbone dans la végétation et des productions d'énergie (en Gtep) permettant de réduire les consommations d'énergie fossile sont également très différentes et dépendent des types de reboisement et d'utilisation des produits des terres agricoles ainsi boisés.

**Tableau 1 – Réductions cumulées des émissions de $CO_2$ en GtC (en Gt $CO_2$), et production d'énergie* (en Gtep), d'ici à 2050, sous différents scénarios d'utilisation des terres agricoles et différentes gestions forestières des boisements installés sur des terres devenues vacantes, puis boisées en tenant compte des débouchés locaux.**

| Scénarios | A2 | B1 |
|---|---|---|
| Surface de terres devenant disponibles d'ici à 2050 en M ha | 140 | 940 |
| **Plantations à courtes rotations pour la production d'énergie** | | |
| Réductions des émissions en GtC (en $GtCO_2$)<br>Production totale d'énergie sous forme de biomasses (Gtep) | 7,3 (26,8)<br>0.4 | 27.8 (102)<br>3.2 |
| % d'utilisation des terres devenant disponibles | 84 % | 45 % |
| **Plantation à courtes rotations pour la production de bois matériau** | | |
| Réductions d'émissions en GtC (en $GtCO_2$)<br>Production d'énergie (Gtep) | 2 (7,34)<br>0.1 | 4.1 (15)<br>0.9 |
| % d'utilisation des terres devenant disponibles | 6 % | 2% |
| **Plantations traditionnelles de forêts conduites en futaie** | | |
| Réductions d'émissions en GtC (en $GtCO_2$)<br>Production d'énergie (Gtep) | 2.1 (7,7)<br>0.0 | 5.4 (19,8)<br>0.3 |
| % d'utilisation des terres devenant disponibles | 37 % | 9 % |
| **Plantations forestières seulement destinées à accroître les stocks du carbone** | | |

[1] Sans toutefois envisager des productions de biocarburant liquide à partir du bois, ni des productions de charbon de bois pour replacer le charbon minéral dans la sidérurgie.

| | | |
|---|---|---|
| Réductions d'émissions (GtC et en $GtCO_2$)<br>Production d'énergie (Gtep) | 3.4 (12,5)<br>0 | 27.9 (102,4)<br>0 |
| % d'utilisation des terres devenant disponibles | 100 % | 100 % |

**Source : Dameron *et al*. 2005 ; Riedacker *et al*. 2005.**

Signalons seulement, sans entrer dans les détails, que les résultats les plus intéressants pour le climat sont obtenus avec des plantations forestières à courtes rotations dont le bois est destiné à la production d'énergie. L'adoption de ce type de gestion implique cependant que le bois produit puisse être récolté. Sous cette réserve, c'est l'option la plus intéressante pour le climat et le développement : on aboutit à une réduction des émissions d'environ 100 $GtCO_2$ sous le scénario B1 et à une production potentielle d'au moins 3,2 Gtep. Sous le scénario A2 on obtient seulement le quart des réductions d'émissions et le huitième de cette production d'énergie ! Ce qui montre bien l'intérêt d'accroître l'efficacité territoriale dans les régions du monde partout où cela est encore possible, et ensuite d'utiliser d'abord les terres non nécessaires pour la production alimentaire pour les bioénergies. L'augmentation des stocks de carbone par plantations sans récolte réduit seulement les émissions de GES, mais ne permet pas de produire d'énergie et ne génère donc pas de revenus.

Dans l'hypothèse où le bois ne peut être converti économiquement en carburant liquide, ce qui est encore le cas aujourd'hui, la moitié des terres susceptible de devenir vacante sous ce scénario B1 (près de 470 Mha) ne serait pas reboisée quand on tient compte des débouchés locaux, et cela par suite d'une demande en bois pour la production de chaleur et d'électricité insuffisante. Seulement 15 % des terres agricoles d'Amérique latine devenant disponibles seraient alors à mobiliser pour couvrir les besoins locaux! Tant que le bois ne pourra être converti en carburant liquide, mieux vaut utiliser les terres devenant vacantes et susceptibles de ne pas être reboisées faute de débouchés, pour la production d'aliments, ou quand ces besoins sont satisfaits pour l'obtention de biocarburants à partir de la canne à sucre ou des palmiers à huile sous les tropiques bénéficiant de régimes pluviométriques satisfaisants pour ces cultures, ou à partir de maïs ou de blé et des betteraves à sucre en zone tempérée… Sous A2, le scénario le plus prometteur ne permet cependant que de compenser, d'ici à 2050, les émissions mondiales de GES d'une année, en 1990 ! Quand le bois peut être récolté et exporté, l'intérêt des reboisements sous les tropiques croît.

Mais quand les plantations ne sont pas exploitées et ne procurent pas de revenus, il est très difficile de les protéger, notamment contre les feux.

Hodgewicjk *et al.* (2004), dans un étude ne s'intéressant qu'aux productions de bioénergie, estiment de manière beaucoup plus optimiste que 130 à 270 EJ (40 à 70 % des consommations énergétiques mondiales en 2000), pourraient être couverts par des productions de biomasses des terres agricoles devenant vacantes d'ici à 2050, Mais cela suppose également que l'on augmente d'abord la productivités des terres pour l'agriculture quand celle-ci est basse, notamment dans l'ex URSS, en Océanie, en Afrique de l'Ouest et de l'Est et en Asie de l'Est.

Il reste à explorer la mise en oeuvre de ces scénarios, notamment les possibilités de développement des énergies renouvelables, d'augmentations des stocks de carbone dans les espaces ruraux ainsi que de stockage géologique, à des coûts acceptables, du $CO_2$ que l'on pourrait capter à la sortie des grandes unités des production.

Ces évolutions ne se réaliseront pas spontanément. Il faudra donc des interventions publiques fortes à divers niveaux : notamment au niveau des PNAQ (Plans nationaux d'allocations des quotas) dont dépendront les efforts de réduction des émissions demandés aux entreprises qui y sont soumises, ce qui déterminera le prix de la tonne de $CO_2$ sur les

marchés des droits d'émissions ; également au niveau des taxes carbones qui pourront rester fiscalement neutres, ou être affectées partiellement à la promotion d'économies d'énergies, de substitution d'énergie, d'intensification de l'agriculture pour éviter des déboisements, ou encore à des boisements pour stocker davantage de carbone et produire plus de biomasses pour l'énergie ; et enfin pour stimuler la R& D et ainsi tenter notamment d'abaisser par exemple les coûts des captages et de stockage géologique du $CO_2$ (cf. en Les perspectives d'évolution des coûts pour ces filières d'élimination du $CO_2$).

**Dans cette partie 3 nous ne traitons que des questions scientifiques et techniques concernant le changement climatique. Les questions relatives aux négociations internationales, à la mise sur pied de la Convention sur le climat et du protocole de Kyoto, le premier instrument contraignant sous cette Convention, sont traitées dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie ».**

• Dans le chapitre 1, nous donnons un bref aperçu sur les impacts du changement climatique et sur les émissions de GES, notamment en N.-C.

• Dans le chapitre 2, on considère ensuite plus particulièrement le captage et dans le chapitre 3 le stockage géologique du gaz carbonique (CSC), une option qui pourrait devenir particulièrement intéressante pour la N.-C. grâce à la présence de péridotites.

• Dans le chapitre 4, on s'intéresse aux possibilités d'utilisations des matières végétales (encore ou biomasses végétales) pour réduire l'utilisation du charbon (sans CSC) dans les industries du nickel de la N.-C. Cela suppose que les phytomasses puissent être produites dans l'espace rural (agricole ou forestier) néo-calédonien ou être importées. On examinera aussi le bénéfice, pour le climat, de la co-utilisation éventuelle du charbon et des biomasses avec le CSC.

• Dans le chapitre 5, on s'intéresse aux forêts de la N.-C. et aux autres formations végétales dont le stockage moyen de carbone pourrait varier et dont il faudrait, par conséquent, tenir compte. On envisage néanmoins de traiter ici cette question assez complexe suivant le découpage retenu sous le protocole de Kyoto, sous les articles 3.3 et 3.4. On y examine aussi les potentiels d'augmentation des stocks moyens de carbone ; par de nouvelles plantations, en sous-exploitant les forêts exploitées par ailleurs pour produire des bioénergies, en n'exploitant pas les forêts dans les zones inaccessibles ou encore en reverdissant des terrains miniers. Quand on ne récolte pas le bois, cela suppose tout de même de préserver ces stocks de carbone biotiques (des arbres, des arbustes) et la matière organique des sols contre les incendies et parfois aussi contre l'excès de gibier.

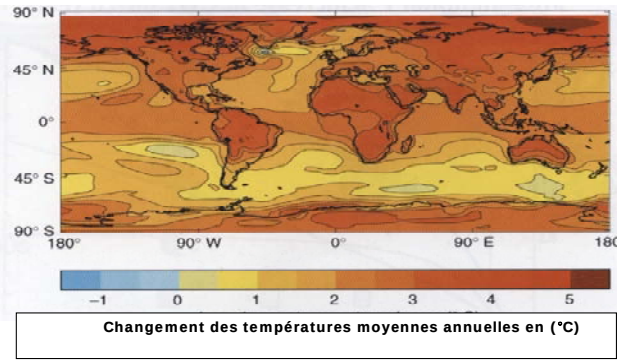
• Dans le chapitre 6, on examine les coûts de réduction du $CO_2$ notamment *via* le stockage dans la végétation et le stockage géologique et on récapitule les recommandations pour la N.-C. relatives de ce chapitre.

## 1.1. L'évolution du climat

### *1.1.1. L'évolution du climat dans le monde*

Les augmentations de température provoquées par l'augmentation de l'effet de serre auront des effets très divers, directement sur les températures et indirectement sur les précipitations et l'élévation des niveaux des océans.

**Figures 4 et 4 bis – Modifications des températures et des précipitations dans les différentes parties du monde entre 2000 et 2050**




**Source : Simulations de Met. Office Hadley Center.**

Les petites îles du Pacifique à faible élévation pourraient disparaître. Toutes les zones côtières seront affectées ; les surfaces cultivables diminueront et les intrusions salines deviendront plus menaçantes dans les zones côtières en général fortement peuplées. Une fois enclenchée, la hausse du niveau de la mer pourrait se poursuivre : l'histoire du globe ne s'arrêtera pas en effet en 2100.

En d'autres endroits du globe, pas toujours facile à préciser dans l'état actuel des connaissances, les précipitations devraient diminuer. Ce qui, combiné au réchauffement et à des évapotranspirations potentielles plus élevées, augmentera l'aridité en certains endroits. Dans d'autres endroits, par exemple sous les hautes latitudes, par suite de l'allongement des saisons de végétation**,** les conditions pourraient devenir plus favorables pour les productions végétales.

### *1.1.2. L'évolution du climat et les petites îles (d'après le Résumé technique du Giec, groupe II 2007)*

Les petites îles sont particulièrement vulnérables aux effets des changements climatiques, à la montée du niveau des mers et aux événements climatiques extrêmes.

Leur capacité d'adaptation est faible, et les coûts d'adaptation relativement élevés, compte tenu de leurs revenus. L'augmentation du niveau des mers aggravera vraisemblablement les inondations, les tempêtes et l'érosion côtière. Les cyclones augmenteront la vulnérabilité due à cette évolution. Dans les Caraïbes et dans les îles du Pacifique 50 % de la population vit à moins de 1,5 km de la côte Ce qui affectera les infrastructures aéroportuaires, maritimes et industrielles ainsi que les routes situées majoritairement en zone des zones côtières.

Les ressources en eau constituent un facteur limitant dans de très nombreuses îles. Dans tous les scénarios, les pluviométries d'été diminueront et ne seront en général pas compensées par l'augmentation de celles-ci en hiver. Les stress hydriques augmenteront. Il faudra donc aussi augmenter les capacités de stockage de l'eau.

La pêche commerciale et artisanale qui constitue une ressource importante pour bon nombre d'îles sera également affectée par la fréquence et l'intensité d'El Ninõ. Cela risque également d'augmenter le blanchiment des coraux. La capacité de régénération des forêts tropicales de ces îles, qui est en général lente, sera également affectée.

L'agriculture est menacée dans les zones côtières par l'élévation du niveau de la mer, les intrusions d'eau salée, la baisse des ressources en eau. Plus loin des côtes, elle sera probablement menacée par les événements extrêmes comme les sècheresses et les inondations. Dans certains cas il faudra dessaler l'eau.

L'érosion côtière augmentera, les coraux blanchiront, ce qui contribuera à la dégradation des zones côtières.

Dans les basses latitudes, le tourisme pourrait souffrir de ces changements (érosions côtières, blanchiments des coraux, etc.), ainsi que de l'augmentation des risques d'apparition de certaines maladies transmissibles par divers vecteurs (dengue, paludismes, filariose, schistosomiase, etc.). Dans les hautes latitudes les conditions pourraient au contraire devenir plus favorables.

### *1.1.3. L'évolution du climat en Australie et en Nouvelle-Zélande (d'après Résumé technique du Giec, groupe II 2007)*

Depuis 1950 la température moyenne a augmenté entre 0,3 et 0,7 °C. Les vagues de chaleur sont plus fréquentes, les gelées plus rares. Les précipitations ont augmenté dans le nord-ouest de l'Australie et dans le sud-ouest de la Nouvelle-Zélande. Elles ont en revanche diminué dans le sud et l'est de l'Australie et dans le nord-est de la Nouvelle-Zélande.

Les sécheresses sont devenues plus extrêmes en Australie. Les glaciers se sont modifiés de même que les couvertures neigeuses, ce qui a eu un impact sur les régimes des eaux, les écosystèmes et l'agriculture.

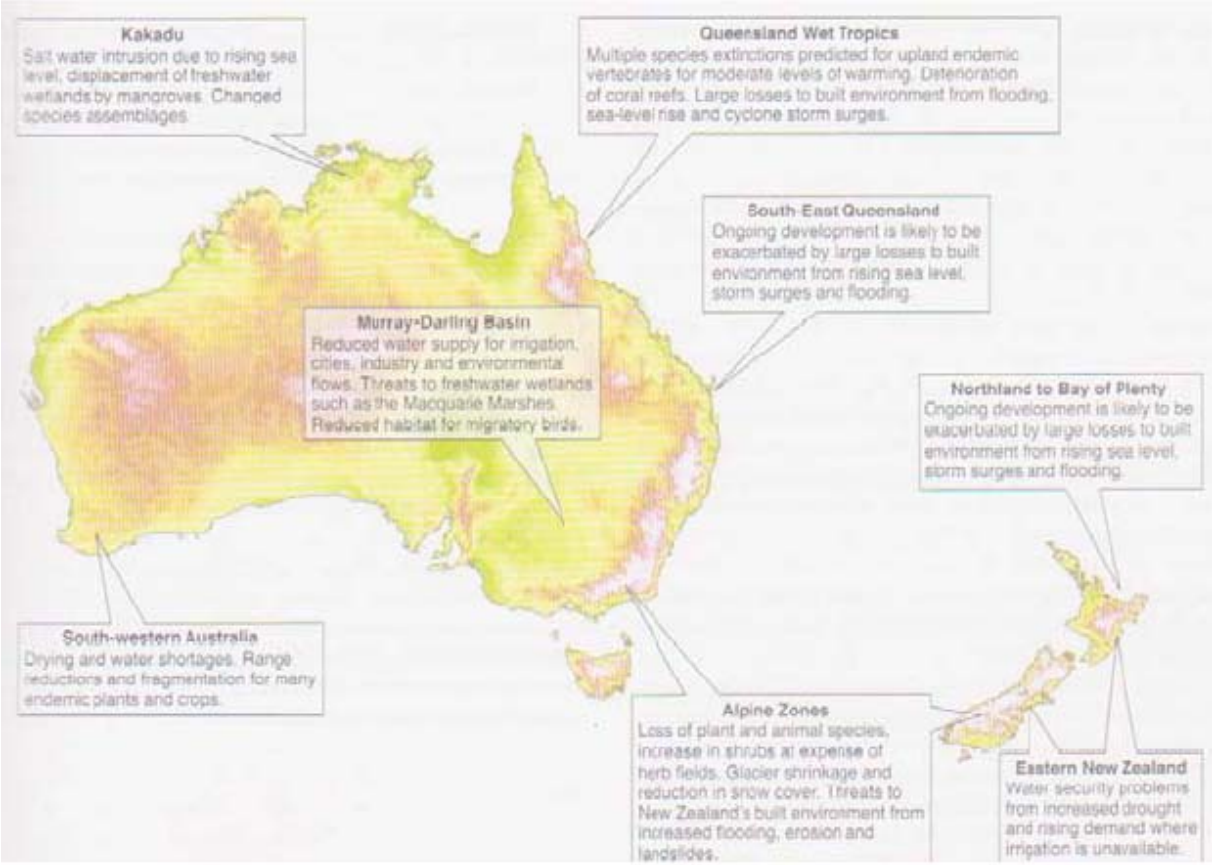
Au XXIe siècle, les températures augmenteront très probablement, de même que l'intensité et la fréquence des vagues de chaleur et de sécheresse. En Australie et dans l'est de la Nouvelle-Zélande de grandes régions auront des sols avec moins d'humidité.

Cela pourrait conduire à une aggravation des conditions hydriques vers 2030 dans le sud et l'est de l'Australie, ainsi que dans le nord et certaines régions de l'est de la Nouvelle-Zélande. Dans ces régions, les productions agricoles et forestières pourraient décliner vers 2030. Mais au début, ces changements climatiques pourraient, grâce à un allongement des périodes de végétation et à la réduction des gelées, être bénéfiques dans l'ouest et le sud de la Nouvelle-Zélande. Mais l'est de la Nouvelle-Zélande devrait recevoir davantage de précipitations.

Dès 2020, il pourrait se produire une perte de biodiversité dans certaines régions.

Pour plus d'informations le lecteur pourra consulter la deuxième partie du 4e rapport du Giec paru en 2007.

**Figure 5 – Impacts des changements climatiques sur l'Australie et la Nouvelle-Zélande**

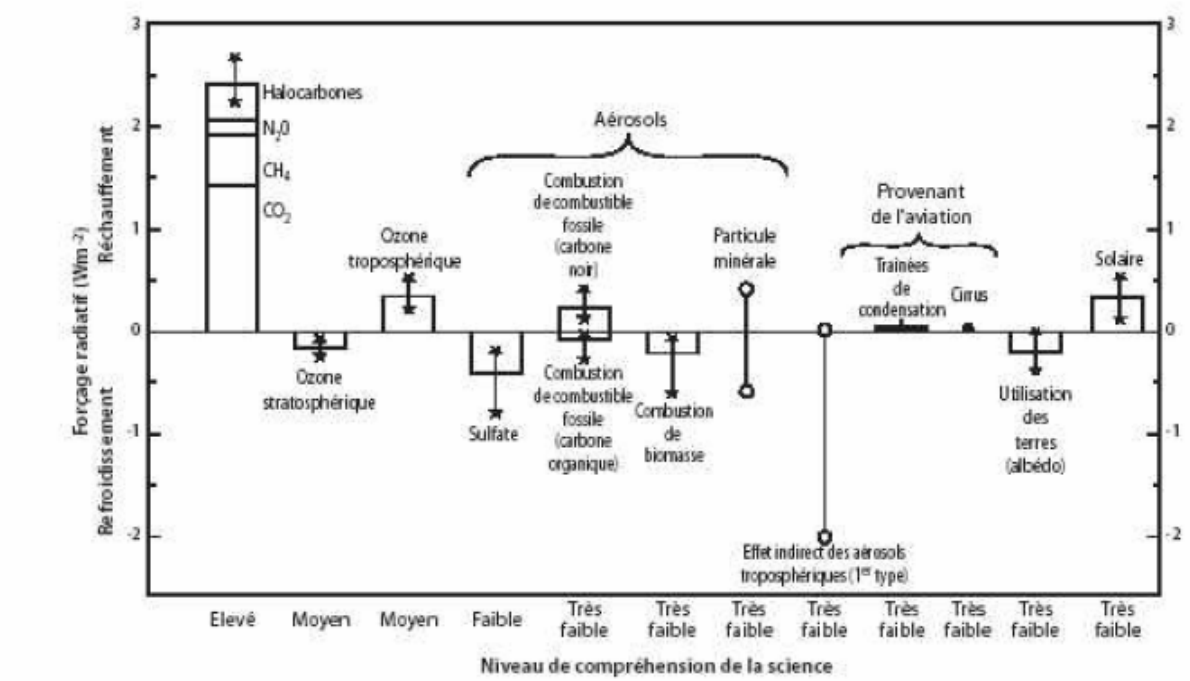



**Source : d'après le résumé pour décideur du groupe 2 du quatrième rapport du Giec, 2007.**

## 1.2. Les principaux gaz à effet de serre

Les principaux gaz, particules et autres facteurs soupçonnés être à l'origine du changement climatique sont indiqués dans la figure 6.

**Figure 6 – Facteurs intervenant dans le forçage radiatif moyen (en Watt/m$^2$) du système climatique depuis 1750. Noter les précisions (et imprécisions) pour les différents groupes de facteur. Le niveau de compréhension diminue lorsqu'on va de la gauche vers la droite de la figure**



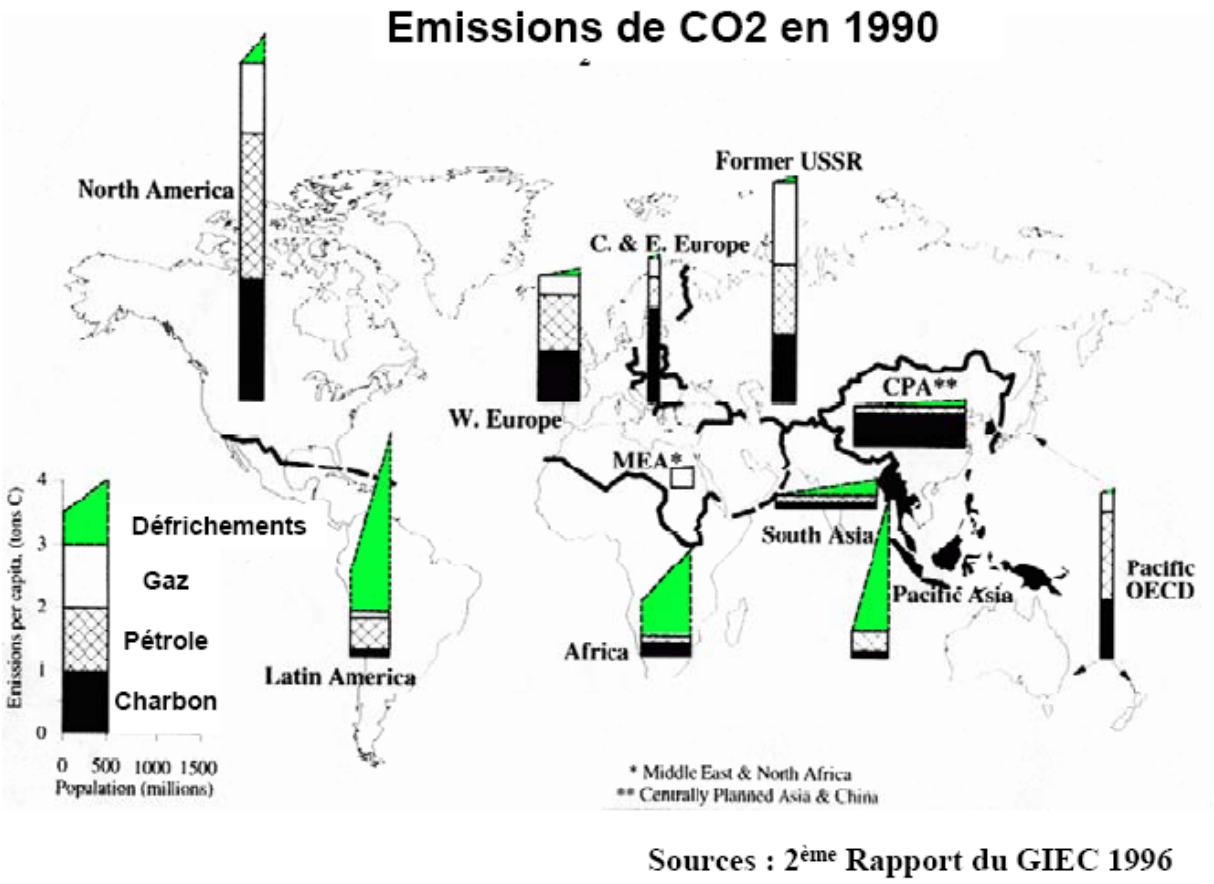

**Source : d'après le troisième rapport du Giec de 2001.**

En dehors de la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère, sur laquelle on a peu de prise directe, le gaz carbonique est le plus important des GES.

### *1.2.1. Les émissions de gaz carbonique*

Les émissions *nettes* de gaz carbonique proviennent essentiellement des combustibles fossiles dans l'hémisphère nord et des changements d'utilisations des terres dans les pays en développement (on entend par changement de l'utilisation des terres : la déforestation, la transformation des pâturages en terres labourées, l'urbanisation, mais aussi le reboisement, artificiel ou spontané de terres cultivées puis abandonnées, etc. (figure 7).

**Figure 7 – Émissions annuelles totales de $CO_2$, en 1990, dans différentes parties du monde.**

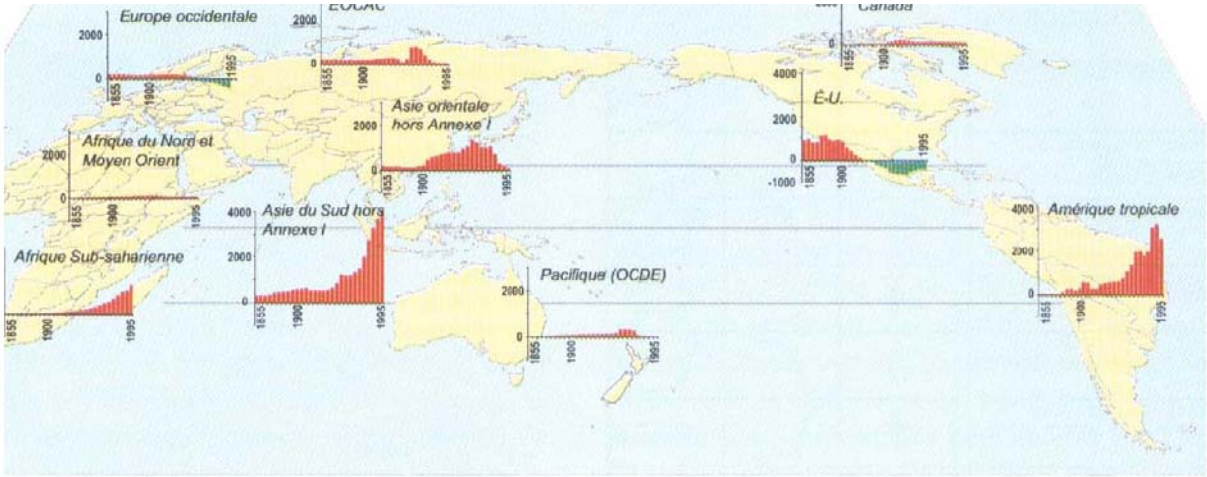



**En abscisse figure le nombre d'habitants pour les diverses zones et en ordonnée les émissions, par habitant, provenant du charbon, du pétrole, du gaz naturel et des changements d'utilisation des terres (représentées sous forme de trapèzes à cause des fortes incertitudes). Celles provenant des changements d'utilisations des terres sont importantes, surtout dans les pays du Sud de la planète. En Afrique Sub-saharienne, les émissions d'origine fossile sont négligeables, alors que celles provenant des changements d'utilisation des terres pourraient avoisiner 1,75 $tCO_2$ par habitant.**

**Source : d'après le deuxième rapport du Giec (1996)[b].**

La figure 8 montre l'évolution, depuis le début de la révolution industrielle, des émissions ou absorptions nettes de $CO_2$ des forêts des diverses régions du monde. On constate que les forêts des pays industrialisés, autrefois émettrices nettes de $CO_2$, ont maintenant des stocks de carbone qui augmentent (absorptions > émissions). En revanche dans les pays en développement, ces émissions n'ont augmenté significativement qu'au cours de la deuxième moitié du XX^e^ siècle.

**Figure 8 – Les variations de stocks de carbone dans les forêts depuis le début de la révolution industrielles dans les différentes parties du monde**




**Source : Giec 2007.**

### *1.2.2. Les cycles du carbone*

L'augmentation des émissions de $CO_2$ dans l'atmosphère dépend tout à la fois des consommations de combustibles fossiles, de la substitution des combustibles fossiles par des biomasses végétales et d'autres formes d'énergie renouvelables, des variations de stocks de carbone dans la végétation (c'est-à-dire de la différence entre les émissions et les absorptions, ou des sources et des puits) et de la séquestration géologique du $CO_2$. Ces différents cycles sont imbriqués les uns dans les autres. Cette complexité conduit souvent à des approches partielles, parfois très éloignées de la réalité. Pour l'atmosphère, ce qui compte c'est la quantité nette de GES émises et les variations nettes de $CO_2$. C'est pourquoi nous détaillons ces cycles, car leur compréhension est nécessaire pour bien appréhender les points abordés par la suite : le captage et le stockage géologique du $CO_2$, (chapitres 2 et 3), le rôle des biomasses végétales comme source d'énergie (chapitre 4) et le rôle de variations de stocks en forêts (chapitre 5).

**a. Les bilans des émissions de $CO_2$**

En 1990 les émissions annuelles brutes de $CO_2$ d'origine fossiles s'élevaient à environ 6 milliards de tonnes de carbone (ou Pg de carbone), c'est-à-dire à 22 milliards de tonnes de $CO_2$,[2] Elles atteindraient maintenant 7,5 milliards de tC (27,5 milliards de tonnes de $CO_2$).

Les émissions brutes de la végétation sont environ 20 fois plus importantes que celles des combustibles fossiles, mais la végétation en reprend presque autant.

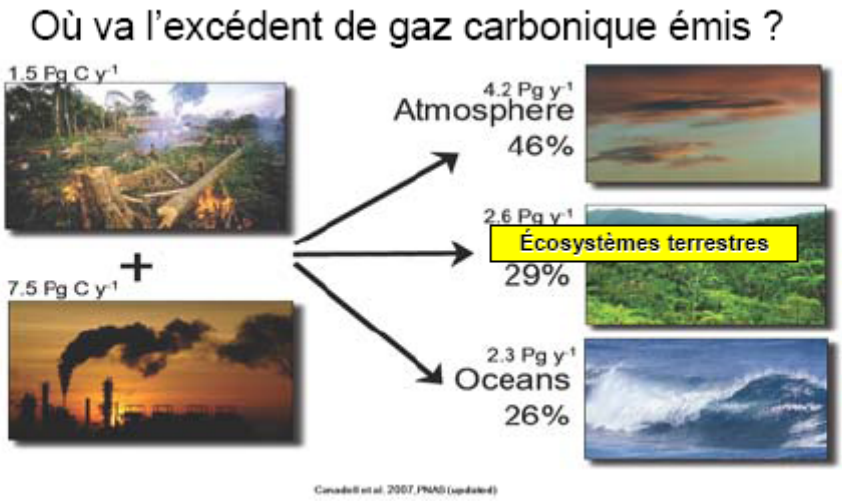
Celles provenant des défrichements atteindraient en revanche maintenant environ 1,5 milliard de tonnes de carbone (4,4 milliards de tonnes de $CO_2$) par an.

L'excédent de gaz carbonique émis dans l'atmosphère est repris en partie par les océans et la végétation terrestre, mais une partie reste dans l'atmosphère, ce qui accroît l'effet de serre (figure 9). Les absorptions annuelles nettes par la végétation du monde (par les forêts et les autres écosystèmes terrestres) s'élèveraient maintenant à environ 2,6 milliards de tC, soit environ 29 % des émissions nettes totales ; 1,5 $\pm$ 0,6 milliard de tC seraient absorbés dans l'hémisphère nord et 1,1$\pm$ 1 milliard de tC dans l'hémisphère sud.

[2] 1 tC génère 3,67 t de $CO_2$.

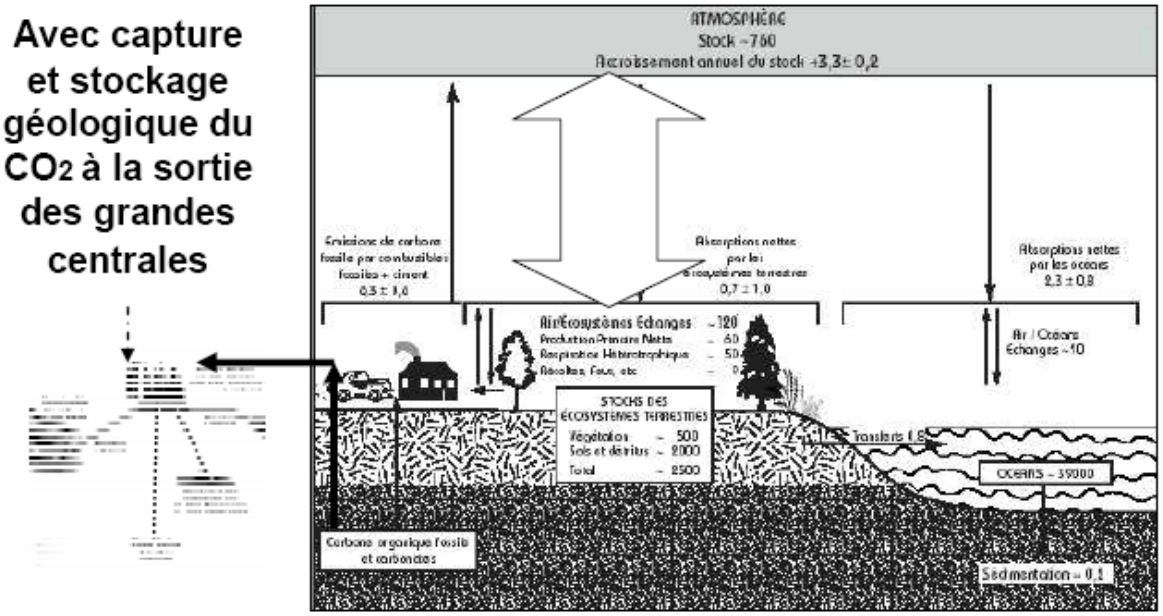
Les absorptions nettes par les océans atteindraient 26 %. Le restant, environ 46 %, resterait dans l'atmosphère, contribuant ainsi au renforcement de l'effet de serre (source : Ciais 2008).

**Figure 9 – Une partie des excédents de $CO_2$ émis dans l'atmosphère est repris par les océans et les écosystèmes terrestres. Mais une partie reste dans l'atmosphère et augmente l'effet de serre.**




La figure 10 montre les flux de $CO_2$ et les stocks de carbone dans les écosystèmes terrestres et marins. Les augmentations de stocks de carbone en forêt (ce que l'on appelle communément les « puits », mais il faudrait parler de différence entre « puits » et « source »), d'une part, et les stockages géologiques du $CO_2$ dans la croûte terrestre, d'autre part, devraient permettre d'absorber une partie des excédents des émissions de $CO_2$ qui s'accumulent dans l'atmosphère. Le stockage géologique sera certes en général plus coûteux que les déforestations évitées ou que l'augmentation des stocks en forêts. En revanche il est potentiellement beaucoup plus important.

**Figure 10 – Les flux de $CO_2$ au niveau de la planète en 1990, sans stockage géologique (à droite) et avec le stockage géologique après captage du $CO_2$ à la sortie des grandes centrales et stockage (à gauche).**




**Les végétaux émettent environ 20 fois plus de $CO_2$ que les consommations de combustibles fossiles. Mais ce gaz carbonique est réabsorbé par la végétation. Le stockage géologique qui figure à gauche pourrait se réaliser dans des aquifères salins, dans d'anciens puits de pétrole ou de gaz. Les océans pourraient également servir au stockage du gaz carbonique, mais cette dernière solution n'est actuellement plus guère envisagée à cause des impacts sur les écosystèmes marins et du risque de non permanence du $CO_2$ dans les océans. Noter que les dimensions des rectangles représentant les stocks de carbone ne sont pas proportionnelles aux grandeurs réelles de ces stocks.**

**Source : d'après IPCC- Giec 2000.**

### b. Les émissions de $CO_2$ résultant de changements d'utilisation et d'affectation des terres

Lorsqu'il y a des changements d'utilisation des terres, les stocks de carbone dans la végétation et dans les matières organiques des sols varient également.

La figure 11 indique des stocks moyens de carbone en zones tempérées, dans les forêts, dans les prairies et dans les cultures, notamment en France en 1990. Le passage d'une forêt à une prairie fait perdre en moyenne 60 t de carbone (220 t de $CO_2$) par hectare au niveau de la végétation. En passant à une culture, on perd en outre de la matière organique au niveau des sols, environ 25 t de carbone par ha, mais beaucoup plus lentement à raison d'environ 1 t de carbone par ha et par an (figure 12).

L'examen de la figure 12 montre que, pour limiter le changement climatique, il est préférable d'éviter de déboiser avant de penser à boiser des terres. On montre par ailleurs aussi que lorsqu'il faut augmenter les productions alimentaires, mieux vaut d'abord augmenter les rendements, quand cela est localement et agronomiquement possible, plutôt que de mettre des forêts et des prairies en culture (Riedacker, 2008a et 2009b).

Le stock moyen de carbone d'une forêt sous-exploitée pourra augmenter pendant un certain nombre d'années. Mais, à long terme, le stock de carbone d'une forêt non exploitée et non perturbée par des incendies, des tempêtes ou des insectes ravageurs, n'augmente plus guère.

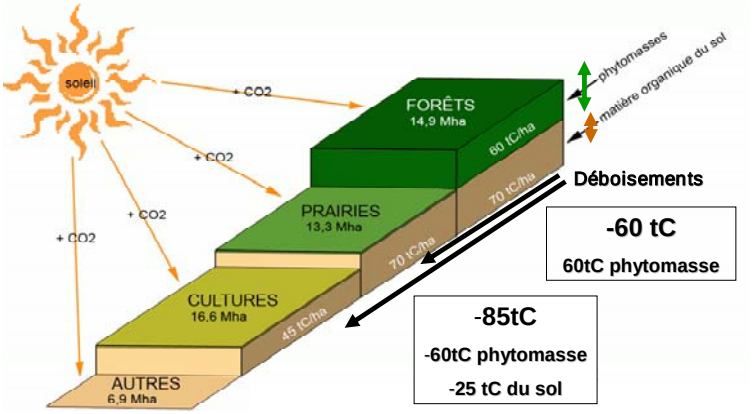
En revanche le stock de carbone d'une forêt sur exploitée diminue. Mais on continuera de l'appeler « forêt » tant que le couvert végétal à l'âge adulte sera potentiellement supérieur à un certain niveau (10 à 30 % selon les définitions), c'est-à-dire tant qu'elle ne sera pas défrichée pour faire place à une culture ou une prairie.

Sous les tropiques humides les stocks moyens de carbone des forêts vierges peuvent atteindre 150 à 200 t, trois fois plus en moyenne que dans les forêts exploitées des zones tempérées. Mais quand on commence à exploiter la forêt, le stock moyen diminue (figure 13). Les récoltes moyennes par ha et par an en forêts tropicales naturelles sont cependant généralement bien inférieures à celles en zones tempérées. En revanche les plantations d'eucalyptus peuvent maintenant fréquemment atteindre des productions moyennes supérieures à 20 t de MS par ha et par an, nettement supérieures aux productions moyennes de peupliers en zones tempérées.

Les stocks de carbone des forêts surexploitées (dégradées) sur des surfaces qui seront ensuite défrichées sont en général plus faibles. Ainsi dans l'arc de la déforestation de la forêt amazonienne du Brésil, les stocks moyens des forêts surexploitées, qui seront ensuite remplacées par des cultures de soja, sont inférieurs à ceux de la forêt française ! On y récolte en général les essences intéressantes à bois durs et de densité élevée, en délaissant celles peu intéressantes, souvent de très faible densité. Pour passer aux cultures, on y met alors généralement le feu. Ce qui non seulement déstocke le carbone restant, mais génère également du méthane et du monoxyde de carbone intervenant directement, ou indirectement *via* la formation d'ozone troposphérique, dans le renforcement de l'effet de serre.

En fin de compte au lieu de passer à des cultures de soja, on peut également passer à des palmeraies à huile (sauf sur tourbières) qui non seulement stockent plus de carbone que les cultures annuelles, mais produisent également plus d'huile que le soja. Cette huile peut être utilisée à des fins alimentaires, (l'essentiel des destinations des productions de l'Asie du Sud-Est), ou encore comme biocarburant (figures 13 et 14).

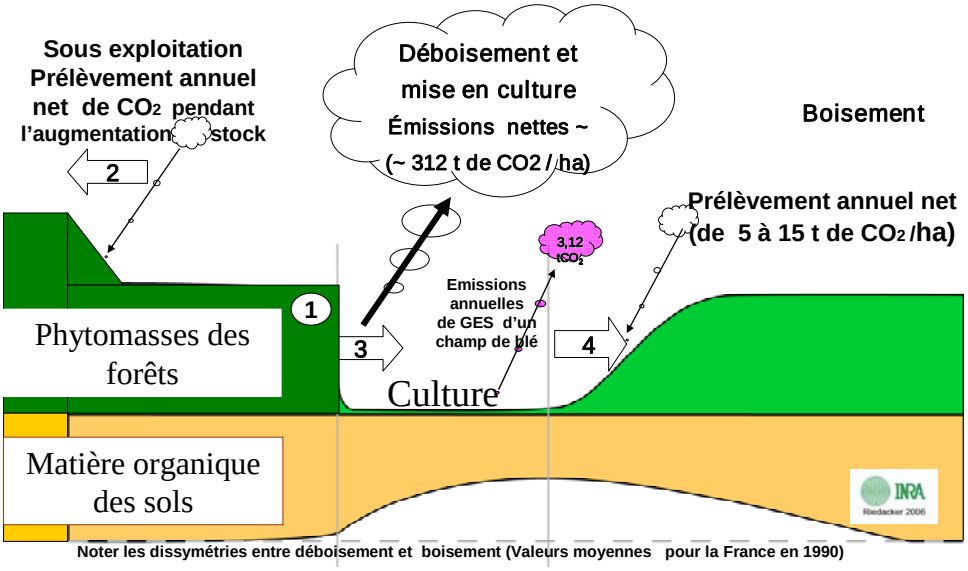
**Figure 11 – Stocks moyens de carbone par hectare dans les biomasses végétales et dans les matières organiques des sols dans divers écosystèmes français.**




**Les changements d'utilisation des terres modifient les stocks moyens de carbone. En passant d'une forêt à des prairies ou à des cultures, on assiste à des émissions nettes de $CO_2$, alors que le boisement ou le retour à la prairie de terres cultivées conduisent à des absorptions nettes de carbone, donc de $CO_2$.**

**Valeurs moyennes pour la France métropolitaine, cf. Riedacker rapport à l'ADEME 2006 et Riedacker, 2006.**

**Figure 12 – Évolution des stocks moyens de carbone par ha dans les biomasses végétales et dans les matières organiques des sols pour diverses gestions et divers changements d'utilisations des terres :**




**1. lors d'une gestion durable des forêts, c'est-à-dire ne prélevant que l'accroissement moyen annuel des forêts de manière à ce que le stock moyen de carbone dans les arbres reste constant ;**

**2. lors d'une sous-exploitation des forêts (prélèvements moyen annuel inférieur à la croissance) ;**

**3. lors d'un défrichement, c'est-à-dire d'une conversion d'une forêt en terre cultivée. Le stock de carbone des biomasses des arbres diminue presque instantanément, alors que celui des matières organiques des sols ne diminue qu'à raison d'environ 1 t de C par ha et par an, mais pendant environ 25 ans. Lorsqu'on y installe une culture de blé correctement conduite donnant 75 quintaux de blé par ha, on obtient une émission de GES d'environ 3,12 t d'équivalent $CO_2$ par ha et par an, c'est-à-dire environ 100 fois plus faible que celle résultant d'un défrichement d'un hectare de forêt moyenne.**

**4. lors d'un boisement d'une terre précédemment cultivée. Les stocks moyens de carbone augmentent alors de nouveau, mais très lentement. L'augmentation des stocks dans les matières organique augmente à une vitesse environ deux fois plus faible, en valeur absolue, que la diminution du stock après défrichement.**

**Source : Riedacker, 2006.**

**Figure 13 – Ordres de grandeurs, sous les tropiques humides et en zone tempérée, des stocks moyens de carbone dans les biomasses végétales et dans les matières organiques des sols pour diverses formations ligneuses qualifiées de « forêts » sous le vocabulaire de la convention sur le climat. Des ordres de grandeurs pour les récoltes de biomasses (en t de matière sèche pour le bois, ou en tonne d'huile) sont également indiquées.**

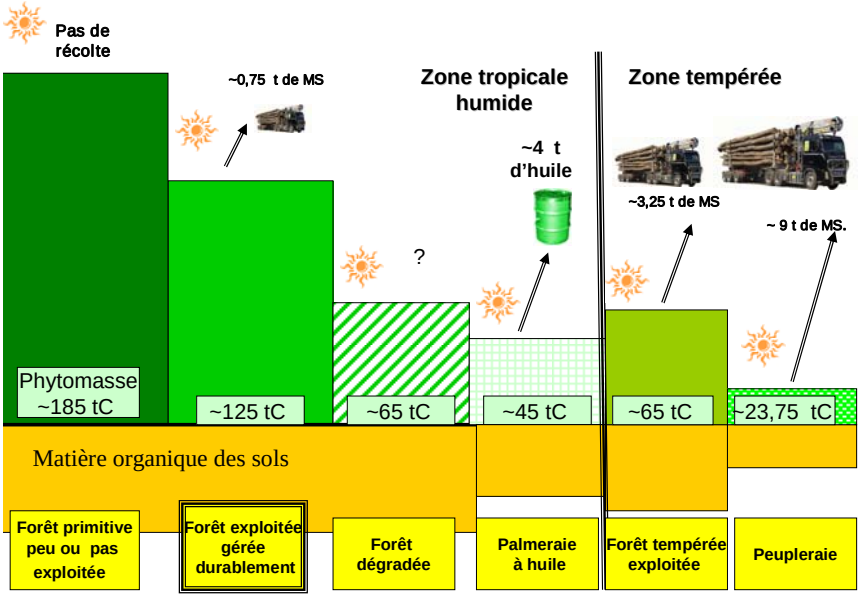
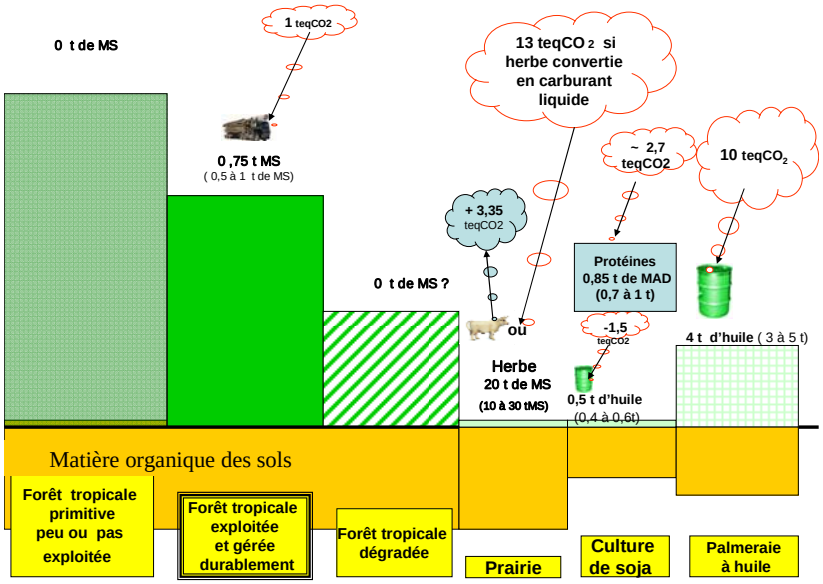



**Figure 14 – Diverses utilisation des terres sous les tropiques humides et conséquences pour les émissions de GES, quand les stocks moyens de carbone des phytomasses et des sols restent constants. Y figurent également les pâturages et la culture de soja.**




**Source : Riedacker, 2009 b.**

### c. Les émissions lors des utilisations de combustibles fossiles ou de biomasses végétales dans la production d'énergie, avec ou sans captage et stockage géologique du $CO_2$

Les utilisations des biomasses végétales renouvelées pour la production d'énergie n'augmentent pas les concentrations de $CO_2$ dans l'atmosphère, puisque le $CO_2$ émis par les conversions de biomasses est réutilisé pour fabriquer de nouvelles biomasses végétales grâce à la photosynthèse. À stock moyen de biomasses constant, les émissions nettes de $CO_2$ sont nulles, peu importe que les biomasses proviennent de forêts, de plantes herbacées ou d'algues. Il n'y a alors qu'une bioconversion de l'énergie solaire en énergie biochimique avec recyclage du $CO_2$ (émis lors des combustions ou des décompositions à l'air libre) des biomasses récoltées (figure 14).

Les combustibles fossiles et les biomasses renouvelées (alimentaire ou non alimentaires) présentent deux différences fondamentales ; contrairement aux énergies fossiles l'utilisation de ces biomasses ne génère pas d'émissions nettes de $CO_2$ (figures 15 et 16), mais leurs productions requièrent des surfaces pour convertir l'énergie solaire. Ces différences doivent être soulignées. Elles sont particulièrement importantes au niveau planétaire notamment pour les pays n'ayant que peu de surfaces agricoles cultivables et de faibles superficies de forêts exploitables. Quand les biomasses alimentaires ou non alimentaires sont importées, leur production exige également des surfaces, mais dans d'autres parties du monde, ce que l'on ne peut ignorer.

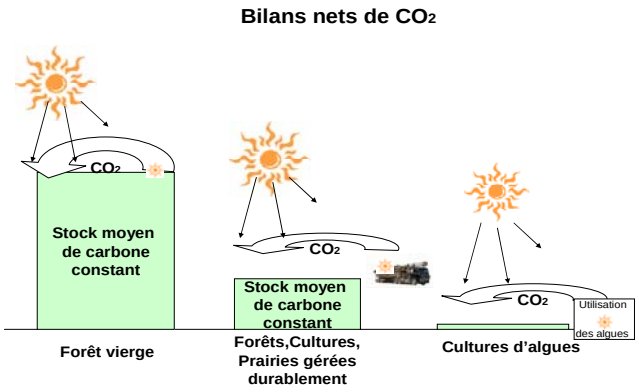
Quand le $CO_2$ capté dans les centrales puis stocké dans la croûte terrestre est issu de biomasses renouvelées, il y a un prélèvement net de $CO_2$ dans l'atmosphère (figure 16). En revanche quand il provient des combustibles fossiles, les émissions ne sont seulement nulles (figure 17). Dans les deux cas, il est nécessaire de consommer de l'énergie (jusqu'à 30 % de l'énergie produite) essentiellement pour capter le $CO_2$ émis par les centrales, mais aussi pour transporter ce gaz puis le stocker dans la croûte terrestre. Le captage et le stockage du $CO_2$ issu des biomasses sera donc surtout intéressant quand l'énergie supplémentaire nécessaire à cette fin peut être fournie par du charbon. Sinon il faut produire davantage de biomasses, ce qui en général nécessite d'y consacrer des surfaces plus importantes. Il peut également devenir intéressant de capter et de stocker dans ces conditions le gaz carbonique issu de la conversion du sucre en éthanol, près de la moitié du carbone des sucres partant en $CO_2$ lors de cette fermentation.

C'est pour ces diverses raisons qu'il est toujours préférable de réduire d'abord les besoins en énergie[3], surtout quand celles-ci proviennent de combustibles fossiles ou de biomasses renouvelées. Quand elles proviennent de biomasses non renouvelées (ou qui pourraient être détruites pas des incendies, il peut être préférable de les utiliser même avec un rendement moins élevé (ce qui peut éviter ou abaisser les coûts d'investissement) plutôt que de ne pas les utiliser. Il faut alors également tenir compte de la demande énergétique locale.

Quand, au lieu de consommer des biomasses renouvelées, on utilise des biomasses issues par exemple de défrichements, les émissions nettes de $CO_2$ par tep à la sortie de la chaufferie sont voisines de celles du charbon (plus de 4 t de $CO_2$ par tep). Mais quand on se place au niveau planétaire, comme cela s'impose quand on veut lutter contre les changements climatiques, si ces biomasses devaient de toute façon se dégrader – être brûlées ou pourrir à l'air libre – mieux vaut les utiliser à la place de charbon ou de pétrole.

[3] C'est également vrai pour l'énergie alimentaire.

**Figure 15 – Les émissions nettes de $CO_2$ des bioénergies à partir des biomasses.**




**Quand le stock moyen de carbone dans les biomasses et dans le sol des forêts, des prairies, des champs ou des algues des lagunes reste constant, l'utilisation des biomasses n'induit pas d'émissions nettes de $CO_2$, Il a seulement une bioconversion de l'énergie solaire. En récoltant les accroissements nets des plantes et des algues on peut, en revanche, remplacer des énergies fossiles et ainsi réduire les émissions nettes de $CO_2$.**

**Figure 16 – Les émissions nettes de $CO_2$ des biomasses, sans ou avec stockage géologique du $CO_2$ émis par les chaufferies**

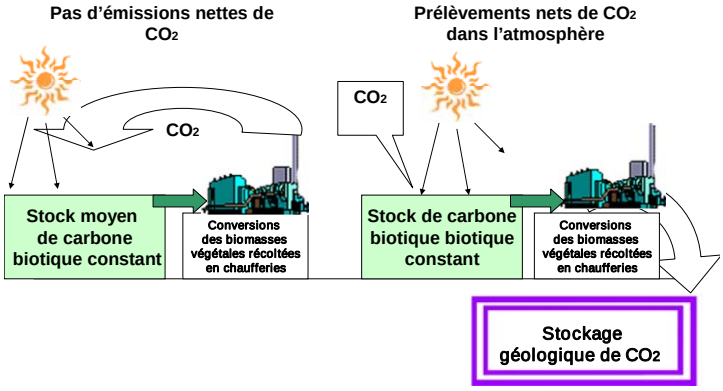
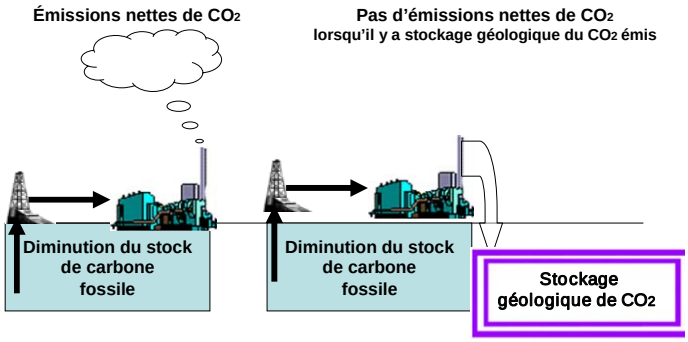



**Figure 17 – Les émissions nettes de $CO_2$ des énergies fossiles, sans ou avec stockage géologique du $CO_2$ émis par les chaufferies**




### *1.2.3. Les autres gaz à effet de serre (cf. figure 6)*

Le gaz carbonique est le plus important GES. Il sert de référence pour comparer les effets radiatifs des divers autres gaz émis. Le Giec donne des valeurs pour caractériser les

effets radiatifs des autres gaz en équivalent $CO_2$ mais en tenant compte des durées de vie différentes de ces différents gaz : cela implique aussi d'indiquer l'*horizon auquel on se réfère.*

**a. Le méthane**

À 100 ans son effet est, à poids égal, 23 fois plus important que celui du $CO_2$. (PRG à 100 ans, ou Potentiel de réchauffement global à l'horizon de 100 ans). Mais pour un horizon de 20 ans, ce PRG est 62. À 50 ans, le nouvel horizon apparu depuis 2001 avec l'obligation de stabilisation du climat, d'ici à 2050, ce PRG est de 42, c'est-à-dire presque deux fois plus important que ce que l'on considérait jusqu'à présent en prenant un horizon de 100 ans (Le Treut, Dessus et Laponche, 2008).

*La réduction des émissions de méthane issues des décharges, des mines et des élevages prend ainsi un poids plus important.*

**b. Le protoxyde d'azote**

Ce gaz a durée de vie semblable au gaz carbonique. À l'horizon de 100 ans son impact est, à poids égal, 296 fois plus actif que celui du gaz carbonique[4]. Les émissions de ce gaz sont importantes dans la fabrication du nylon et dans l'industrie des nitrates, où l'on peut les réduire moyennant des consommations d'énergie légèrement plus élevées. On peut aussi éviter les émissions de ce gaz en traitant correctement les lisiers des élevages industriels.

**c. Les CFC, les HFC et les autres gaz de synthèse**

Les chlorofluorocarbones (CFC) de l'industrie du froid et des mousses isolantes, les hydrofluorocarbones (HFC) fabriqués tout comme les perfluorocarbones (PFC) pour remplacer les CFC à cause de leur moindre nocivité pour la couche d'ozone, ainsi que l'hexafluorure de soufre (SF6) utilisé dans l'industrie électronique sont des gaz de synthèse à potentiel de réchauffement beaucoup plus important que ceux des gaz évoqués précédemment. Leur PRG peut être plusieurs milliers de fois plus important. Les CFC sont seulement comptabilisés sous le protocole de Montréal et non sous la Convention sur le climat. Mais ils sont peu à peu éliminés, à cause des engagements pris sous le protocole de Montréal, et remplacés par des HFC. Ces derniers sont moins nocifs pour la couche d'ozone, mais ont des PRG également très élevés et sont comptabilisés sous la convention climat (Giec et GTE 2005).

**d. L'ozone troposphérique**

L'ozone troposphérique est également important à considérer même si ce gaz n'a pas été retenu dans la liste des gaz à réduire sous le protocole de Kyoto, car sa formation est difficile à prévoir. Le monoxyde de carbones (qui résulte des mauvaises combustions des voitures, des chaudières et surtout des feux de forêts et de savane) est en partie responsable de sa formation.

*Les émissions de protoxyde d'azote et de gaz de synthèse, (hors ceux, comme les CFC comptabilisés sous le protocole de Montréal, et d'ozone troposphérique auraient été responsables en 1990 de l'ordre de 20 % de l'effet de serre additionnel comptabilisé sous la Convention sur le changement climatique.*

[4] Pour la première période d'engagement sous le protocole de Kyoto, les comptabilités des Nations unies utilisent encore les PRG publiés en 1996, un peu différents de ceux publiés par le Giec en 2001.

### e. Les autres facteurs impliqués dans le réchauffement : les aérosols, l'albédo et l'évaporation

*Les aérosols* – Ce sont de fines particules (de 0,01 à 10 µm) en suspension dans l'air : des sulfates émis par les volcans, des cristaux de sodium et de chlore formés à partir de l'assèchement des embruns marins, des particules émises par les centrales thermiques, par les feux de savanes et de forêts, etc. Ils modifient également le bilan thermique de la planète : les sulfates émis par les volcans réfléchissent la lumière incidente du soleil et refroidissent donc localement le climat : les éruptions volcaniques, comme celle du Pinatubo en Indonésie, ont permis de le confirmer. Les suies ou poussières noires absorbent au contraire les rayonnements et contribuent par conséquent au réchauffement. À la différence des GES, ils ne s'accumulent cependant pas dans l'atmosphère. Leur durée de vie n'est en général que de quelques jours : ils sont éliminés par les pluies. L'effet direct des aérosols est globalement négatif. Sans eux le réchauffement attendu par suite de l'augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère pourrait être plus important. Le forçage négatif dû aux effets indirects des aérosols sur les nuages peut être important, mais il est encore mal quantifié. C'est pourquoi les aérosols n'ont pas été pris en compte pour la première période d'engagement sous le Protocole.

*L'albédo des couvertures végétales et les bilans thermiques* – Les corps noirs absorbent tous les rayonnements qu'ils reçoivent, alors que les surfaces blanches (la neige, les glaciers, les toits blancs des maisons des régions chaudes) en réfléchissent une très grande partie ; c'est ce qu'on appelle l'albédo. La disparition des glaces augmentera le réchauffement en réduisant cette réflexion. Les changements de couverture végétale des sols modifient simultanément l'albédo et l'évaporation, donc les bilans thermiques locaux

### f. Les bilans des émissions provenant des utilisations et des changements d'utilisation des terres

Il faut toujours considérer les bilans à l'échelle de tout l'espace rural et de toute la planète. Les approches ne considérant que les variations au niveau des champs conduisent généralement à des diagnostics erronés pour le climat (Riedacker, 2008b et c).

L'augmentation des rendements en blé en France a augmenté un peu les émissions de protoxydes d'azote et de $CO_2$ attribuable à la production et au transport des engrais. Mais sans ces augmentations de rendements, il aurait fallut défricher plus de 13 M ha de terres, pour augmenter de manière identique la production totale de blé. Il aurait donc fallut défricher, en France ou ailleurs dans le monde, une surface comparable à celle des forêts de la France métropolitaine. En cas de défrichement de la forêt cela aurait conduit à l'émission de plus de 4 milliards de tonnes de $CO_2$ et supprimé toutes les récoltes annuelles de bois sur cette surface (Riedacker, 2006 et 2008a).

*La diminution des émissions de ce gaz doit donc être recherchée en appliquant mieux les engrais organiques et minéraux, mais en évitant de le faire au détriment des rendements, et plus généralement au détriment de l'efficacité territoriale.*

*Quand il faut augmenter les productions de biomasses végétales alimentaires, on peut en effet soit augmenter les rendements agricoles soit défricher des prairies ou des forêts. Les émissions annuelles de GES résultant de cultures, même fortement fertilisées, sont cependant en général relativement faibles, environ une centaine de fois inférieures aux émissions résultant des changements des stocks de carbone consécutifs à un défrichement moyen. Aussi est-il préférable, quand il s'agit de limiter ou de retarder les émissions de GES, de chercher tout d'abord à maximiser les productions des cultures agricoles et forestières par ha,c'est-à-*

*dire leur efficacité territoriale, sous réserve que cela soit acceptable pour l'environnement local et la santé humaine. (Riedacker, 2008).*

*Sans entrer davantage dans les détails il convient d'insister ici sur le fait que les émissions de GES provenant des cultures ne doivent pas être considérées de la même façon que celles résultant des autres activités, notamment des élevages ou des activités industrielles.*

### 1.3. Les émissions de GES de la Nouvelle–Calédonie

Les inventaires des émissions de GES de la France au titre de la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC) sont réalisés par le Citepa (http://www.citepa.org).

La couverture géographique de ces inventaires pour la CCNUCC comprend la métropole (MT), les départements d'outre-mer (DOM), c'est-à-dire la Guadeloupe, la Guyane, la Martinique et la Réunion, les Collectivité d'outre-mer (COM) c'est-à-dire Mayotte, Saint-Pierre-et-Miquelon, Wallis-et-Futuna, et la Polynésie française) ainsi que la N.-C. Mais seule la métropole et les DOM entrent dans le périmètre retenu sous le protocole de Kyoto.

En 2007 le PIB de cet ensemble atteignait 1938,4 milliards d'€, dont 1892,2 milliards d'€ en métropole, (soit près de 97,6 % du PIB total), 34,4 milliards d'€ dans les DOM (environ 1,8 % du PIB total), et 11,7 milliards dans l'ensemble « COM et N.-C. » (0,6 % du PIB total). Le PIB du périmètre Kyoto (métropole + DOM) est donc de 99,4 % de l'ensemble de la couverture géographique considérée pour la France.

Avec un PIB 5,8 milliards d'€, la N.-C. atteint 0,3 % de l'ensemble, soit pratiquement la moitié de l'ensemble « N.-C. + COM).

Les données utilisées sont extraites du rapport du Citepa remis en mars 2009 (Rapport CCNUCC, Ref. Citepa 770 / Convention MEDDAT n° 696) http://www.citepa.org). Mais elles ont été présentées de manière différente, avec des calculs complémentaires, afin de faire apparaître la place des émissions de l'ensemble « N.-C. et des Communautés d'outre-mer » (N.-C. + COM).

Les émissions de GES fournies par la France à la CCUNCC concernent, d'une part, le périmètre de Kyoto (métropole et DOM), la métropole, les DOM (non individualisés dans le tableau ci-dessous) et l'ensemble « N.-C. + COM ». Mais il faut souligner que ces valeurs ne tiennent pas compte des émissions ou réductions d'émissions pour l'utilisation des terres, les changements d'utilisation des terres et les forêts (UTCF) mentionnées seulement dans le tableau 3.

Entre 1990 et 2007, les émissions de GES ont diminué de 5,6 % pour l'ensemble soumis à la contrainte Kyoto (métropole + DOM), de 6,5 % en métropole, mais elles ont augmenté de 73,4 % dans les DOM et de 63,5 % dans l'ensemble « N.-C. + COM ».

Par habitant (mais cet indicateurs doit être utilisé avec de fortes réserves[5]), les émissions de GES ont, entre 1990 et 2007, fortement diminué ; de 13,6 % pour l'ensemble soumis à la contrainte Kyoto (métropole + DOM), de 20,6 % en métropole. Elles ont en

[5] Cette valeur est à prendre avec précautions pour les petits ensembles où dominent, comme en Islande, au Groenland ou en N.-C., des industries très intensives en carbone. Cela ne reflète pas les émissions réelles des consommations de ces ensembles, car les produits de ces industries sont exportés. Ces comptabilités ne prennent pas non plus en compte les émissions des produits importés. Les paradis fiscaux ou les pays spécialisés dans les activités bancaires ont, de ce fait, des émissions par habitant plus faibles, car elles n'ont pas d'industries lourdes ou fortement intensives en carbone. De plus elles ne comptabilisent pas les émissions des produits importés. (Cf. également « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie »).

revanche augmenté de 36,8 % dans les DOM et de 10,7 % dans l'ensemble « N.-C. + COM ». Elles sont passées respectivement de 9,6 à 8,3 teq$CO_2$, dans le périmètre de Kyoto, de 9 à 7,2 teq$CO_2$ en France métropolitaine, de 5,7 à 7,8 teq$CO_2$ dans les DOM et de 6 à 6,6 teq$CO_2$ dans l'ensemble « N.-C. + COM ».

On notera que les émissions pour l'ensemble des Communauté d'outre-mer et la N.-C. représentent moins de 1 % de l'ensemble des émissions « métropole + DOM » déclarées sous le protocole de Kyoto. En 1990 elles ne représentaient que 0,5 % de ces émissions. C'est pourquoi les émissions ne sont pas détaillées davantage dans les inventaires du Citepa. Dans cet ensemble 70 à 90 % des émissions de $CO_2$ proviennent vraisemblablement de la N.-C. (communication personnelle).

**Les émissions de Nouvelle-Calédonie et des COM sous le format UNFCCC**

Hors prise en compte des changements d'utilisation des terres, les émissions de la N.-C. et des COM ont augmenté de 63 ,5% (+1,8 Mt d'équivalent $CO_2$) entre 1990 et 2007. Dans cette comptabilité l'essentiel de cette augmentation est attribuable à l'augmentation des émissions de gaz carbonique (+1,7 Mt), c'est-à-dire à l'industrie, aux transports et à la production d'électricité.
Les émissions de méthane provenant des décharges et des fermentations entériques des ruminants ont peu varié.
Les émissions de HFC, comptabilisés sous la Convention climat, ont augmenté de 0,1 Mt d'équivalent $CO_2$. Cela provient du fait qu'ils remplacent des CFC, comptabilisés seulement sous le protocole de Montréal malgré leur contribution au réchauffement climatique et non sous le protocole de Kyoto. Il conviendrait donc de suivre plus précisément l'évolution des émissions des HFC et de chercher à réduire les fuites.
Ces inventaires pourraient être précisés davantage par le Citepa[6].

D'après le MEDDAT (cf. Présentation des défis énergétiques : économies d'énergies et développement des énergies renouvelables - Sous direction climat et qualité de l'air, 26 mai 2009) les émissions de la France atteignent actuellement environ 550 Mteq$CO_2$ avec une consommation de 276 Mtep. Celles de l'Union européenne atteindraient environ 5 000 Mteq$CO_2$ avec une consommation de 1 815 Mtep. Les émissions mondiales atteindraient environ 40 000 Mteq$CO_2$ pour une consommation de 11 434 tep.

D'après ces comptabilités, les émissions de GES de la N.-C. représentent donc moins de 1 % des émissions de la France, moins de 0,1 % de celles de l'Union européenne et moins de 0,01 % de celles du monde.

[6] Cet organisme peut, sur commande, réaliser des inventaires plus précis, notamment pour les collectivités territoriales.

**Tableau 2 – Émissions en France, en 1990 et en 2007, des six GES retenus sous le protocole de Kyoto**

| Types de GES et évolution entre 1990 et 2007 | Émissions de GES | | | |
|---|---|---|---|---|
| | (1) Sous le protocole de Kyoto (métropole + DOM) | (2) En métropole | (3) En « Nouvelle-Calédonie + COM» | |
| | | | en valeur | en % de l'ensemble « métropole + DOM »[7] |
| Émissions sous le protocole de Kyoto[8] en 1990 en Tg $CO_2$eq | 564 | 556 | 2,9 | 0,5 % |
| Émissions sous le protocole de Kyoto en 2007 Tg $CO_2$eq | 531 | 520 | 4,7 | 0,9 % |
| Évolution 2007/1990 (en %) | -33 (-5,6 %) | -36 (-6,5 %) | +1,8 (+ 63,5 %) | |
| Émissions de $CO_2$eq , en Tg, en 1990 | 393 | 391 | 2,2 | 0,6 % |
| Émissions de $CO_2$ en Tg, en 2007 | 397 | 388 | 3,9 | 1 % |
| Écart des émissions de $CO_2$, 2007/1990 en Tg (en %) | +4 (+0,3 %) | -3 (-0,8 %) | +1,7 (+ 79,4 %) | |
| Émissions de $CH_4$[9], en 1990, en Tg $CO_2$eq | 68 | 64 | 0,4 | 0,6 % |
| Émissions de $CH_4$ en 2007, en Tg $CO_2$eq | 54 | 53 | 0,4 | 0,7 % |
| Écart des émissions de $CH_4$, 2007/1990 en Tg $CO_{2e}$ (en %) | -14 (-17,6 %) | -11 (-17,6 %) | Inchangé | |
| Émissions de $NO_2$, en 1990 hors UTCF (avec UTCF), en Tg $CO_{2e}$, | 93 | 91 (95) | 0,3 | 0,3 % |
| Émissions de $NO_2$, en 2007 hors UTCF (avec UTCF), en Tg $CO_{2e}$ | 64 | 64 (66) | 0,2 | 0,3 % |
| Écart des émissions de $NO_2$ hors UTCF, 2007/1990 en Tg $CO_{2e}$ (en %) | -29 (-30,1 %) | -27 (30,2 %)- | -0,1 -9,5 % | |
| Émissions de HFC, en 1990 en Tg $CO_{2e}$ | 3,7 | 3,7 | 0 | 0 % |
| Émissions de HFC en 1997 en Tg $CO_{2e}$ | 14,3 | 14 | 0,1 | 0,6 % |
| Écart des émissions de HFC, 2007/1990 en Tg $CO_2$eq (en %) | +10,6 (+290 %) | +10,3 (+282 %) | | |
| Émissions de PFC en 1990 en Tg $CO_2$eq | 4,3 | 4,3 | 0 | 0 % |
| Émissions de PFC en 1997 | 0,9 | 0,9 | 0 | 0 % |

[7] Ces pourcentages ont été arrondis, compte tenu de l'imprécision des mesures de certaines émissions dont le poids total, par rapport à l'ensemble des émissions, est faible.
[8] Déclarées par la France pour la métropole et les DOM, donc sans les COM ni la N.-C. Ces valeurs ne tiennent pas compte des émissions ou réductions d'émissions – pour l'utilisation des terres, les changements d'utilisation des terres et les forêts (UTCF) – qui sont prises en considération à part pour la période 2008-2012.
[9] Ces valeurs sont peu différentes des émissions de $CH_4$ avec UTCF.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| en Tg $CO_2$eq | | | | |
| Écart des émissions de PFC, 2007/1990 en Tg $CO_2$eq (en %) | -3,4 (-78 %) | -3,4 (-78 %) | | |
| Émissions de $SF_6$ en 1990 en Tg $CO_2$eq | 2,1 | 2 | 0 | 0 % |
| Émissions de $SF_6$ en 1997 en Tg $CO_2$eq | 1,1 | 1,1 | 0 | 0 % |
| Écart 2007/1990 des émissions de $SF_6$ en Tg $CO_2$eq (en %) | -1 (-47 %) | -0,9 (-47 %) | | |

**Émissions en Mt d'équivalent $CO_2$ (Mt d'équivalent $CO_2$ ou Tg de $CO_2$eq) ; (1) au titre du protocole de Kyoto, (France métropolitaine + départements d'outre-mer ou DOM, (2) pour la métropole et (3) pour l'ensemble « Communautés d'outre-mer et N.-C. » ou « COM + N.-C. ».**

**Source : d'après le rapport du Citepa 2009.**

Les valeurs du tableau 3 permettent d'avoir un aperçu de la contribution des forêts et des changements d'utilisation des terres dans la lutte contre le changement climatique. Mais elles ne sont pas pertinentes pour la comptabilité très spéciale des variations de stocks de carbone sous le protocole de Kyoto, entre 2008 et 2012, comme cela est précisé par ailleurs dans le chapitre 5 et dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie ».

**Tableau 3 – Évolutions, entre 1990 et 2007, des émissions de GES (six gaz) exprimées en Mt d'équivalent $CO_2$ ou Tg de $CO_2$eq, avec UTCF, (mais non pertinentes pour le protocole de Kyoto entre 2008 et 2012)**

| Types de GES et évolution entre 1990 et 2007 | Sous le Protocole (métropole +DOM) | En métropole | Dans les DOM | Dans les « COM + Nouvelle-Calédonie » | |
|---|---|---|---|---|---|
| **$CO_2$eq avec UTCF en 1990** | 35110 | 344 | 1,2 | 8,2 | 2,2 % |
| **$CO_2$q avec UTCF en 2007** | 321 | 309 | 7,6 | 8,5 | 2,6 % |
| **Écart 2007/1990 pour le CO2 avec UTCF (en %)** | -30 (-8,6 %) | -35 (-10,3 %) | | +0,3 (+6,2 %) | |

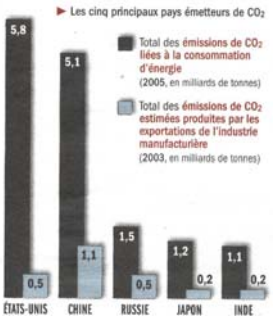
Il faut aussi préciser que ces inventaires ne recensent pas les émissions des produits importés et ne soustraient pas les émissions des productions réalisées pour l'exportation. Le Japon importe en bois l'équivalent de la production annuelle de la forêt de la France métropolitaine, c'est-à-dire ce qui est produit sur environ 15 M ha. L'Union européenne importe par ailleurs l'équivalent de 15 M d'ha de soja. En toute rigueur, il faudrait comptabiliser les émissions qui résultent des productions de soja dans ces pays et des déboisements correspondants. La Chine importe aussi des produits, par exemple du soja produit sur des surfaces égales à celles utilisées pour la production d'éthanol-carburant, ex canne à sucre au Brésil, etc.

De même on ne soustrait pas dans cette comptabilité les émissions de produits exportés. La figure 18 ci-dessous montre que, même pour des grands pays, les émissions résultant de production destinées à l'exportation de produits manufacturés peuvent ne pas être

[10] Valeurs ne concernant pas le protocole de Kyoto (cf. « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie ». pour la comptabilité spéciale).

négligeables. Les délocalisations des industries fortement intensives en carbone réduisent également les émissions dans les pays où ces activités disparaissent, mais elles augmentent ailleurs.

**Figure 18 – Les émissions de $CO_2$ des cinq principaux émetteurs de GES en 2005 résultants de la consommation d'énergie fossile et les estimations produites par les exportations des industries manufacturières.**




**Source : *Courrier international*, 2007.**

En N.-C., il faudrait comptabiliser les émissions des produits alimentaires importés comme celle des laitages et autres, et défalquer les émissions liées à la production de nickel, qui n'est évidemment pas consommé par les habitants de la N.-C.

Il ne faut donc pas confondre les inventaires des émissions de GES sous le format des Nations unies, destinés à permettre l'obtention de réductions d'émissions vérifiables, avec les inventaires des émissions réelles moyennes par habitant dans un pays ou sur un territoire donné (cf. également « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie »).

## Bibliographie

RAPPORTS du GIEC – http://www.ipcc.int/

QUATRIEME RAPPORT D'EVALUATION, 2007

Rapport de synthèse des groupes I, II et III (en français), 102 p.

Rapports des groupes de travail

Groupe III – *L'atténuation du changement climatique, Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique* (en français) 119 p. *Mitigation of Climate Change* Complete Report with 13 chapters (Rapport complet seulement en anglais) 841 p.

Groupe II – *Impacts, adaptations et vulnérabilité*, Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique (en français) 93 p. Impacts, Adaptation and Vulnerability, (Rapport complet seulement en anglais).

Groupe I – *Les bases scientifiques et physiques*. Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique (en français). *The Physical Science Basis*, (Rapport complet seulement en anglais).

TROISIEME RAPPORT D'EVALUATION, 2001 (même structure que pour le 4e rapport).

DEUXIEME RAPPORT D'EVALUATION, 1995 (structure peu différente des autres rapports).

+ Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques Contributions des Groupes I, II et III.

PREMIER RAPPORT D'EVALUATION, 1990.

RAPPORT SPECIAUX DU GIEC (liste non exhaustive)

– *Piégeage et stockage du dioxyde de carbone*, 2005 – Résumé pour décideur et Résumé technique (en français), 52 p. *Carbon capture and storage* (Rapport complet seulement en anglais).

– *Préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire : Questions relatives aux hydrofluorocarbures et aux hydrocarbures perfluorés*, 2005 – Résumé pour décideur et Résumé techniques (en français) 52 p. (Rapport conjoint du Giec et du Gete) *Safeguarding the Ozone Layer and the Global - Climate System : Issues Related to Hydrofluorcarbons and Perfluorocarbons* (Rapport complet seulement en anglais).

– *Utilisation des terres, changements d'utilisation d'affectation des terres et foresterie*, 2000 – Résumé pour décideur et Résumé techniques (en français) *Land use, Land-Use Change and Forestry*, (Rapport complet seulement en anglais).

– *Scénarios d'émissions*. Résumé pour décideur et Résumé techniques (en français) *Emissions Scenarios*, (Rapport complet seulement en anglais).

RAPPORT METHODOLOGIQUES ET DIRECTIVES TECHNIQUES DU GIEC (liste non exhaustive) – Lignes directrices 2006 du Giec pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (5 volumes pour les divers secteurs d'activités et la méthodologie générale).

C'est, depuis 2006, le document de base pour déterminer les émissions de GES.

DOCUMENTS TECHNIQUES DU GIEC (liste non exhaustive), 2002 – Les changements climatiques et la biodiversité, Document technique n° 5 du Giec.

DOCUMENTS SUPPLEMENTAIRES DU GIEC (liste non exhaustive), 1992 – *Global Climate Change and the Rising Challenge*.

**Autres documents**

CIAIS P., 2008 – Forest and the carbon cycle. Conférence européenne sur les forêts. International Conference "The European Forest-Based Sector: Bio-Responses to Address New Climate and Energy Challenges?" 6-8 November 2008, Nancy, France, Organized under the auspices of the French Presidency of the European Union (philipe.ciais@cea.fr), à paraître.

CITEPA, 2009 – *Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques* (Rapport CCNUCC, Ref. Citepa 770 / Convention MEDDAT n° 696 100 p.), http://www.citepa.org/

COURRIER INTERNATIONAL, 2007 – La pollution chinoise vient de l'Occident. Extrait du *Wall Street Journal* d'après l'AIE, World Resource Institute, l'Université norvégienne de Science et Technologie, *Courrier international* n° 891, 2007, p. 15.

CRICKI P., 2009 – Vers une rupture profonde du modèle énergétique mondial. La Documentation Française, Questions internationales *Le climat risques et débats* n° 38 juillet-août 2009, 67-75.

DAMERON V., BARBIER C. *et al*., 2005 – Les réductions potentielles d'émissions de $CO_2$ par des plantations forestières sur des terres agricoles dans le monde à l'horizon 2050, *Cahier du Clip* n° 17 septembre 2005, 41-91.

DENEUX M., 2001 – *Évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leurs impacts prévisibles sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050, 2100*, Rapport du sénateur Marcel Deneux, Office des choix scientifiques et technologiques. Sur CD (http://www.senat.fr_opecst@senat.fr).

ELLERMAN A., CONVERY F., PERTHUIS C. (de), 2010 – *Le prix du carbone. Les enseignements du marché européen du $CO_2$*, Paris, Pearson, 325 p.

HODGEWICJK M., FAAIJ A. *et al*., 2004 – Exploration of the range of the global potential of biomass for energy. Biomass and bioenergy 25 (2003) 119-133.

LE TREUT, H., DESSUS B. *et al*. 2008 – Réchauffement climatique : importance du méthane, *Les cahiers de Global Chance*, n° 24, p. 44-49, mars.

RADANNE P., 2004 – « La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici à 2050 », Introduction au débat Mission interministérielle de l'effet de serre, ministère de l'Écologie et du Développement durable, 35 p., http://www.effet-de-serre.gouv.fr

RAMSTORF S., 2009 – Plenary Speech in Congress on Climate Change Global risks, Challenges & Decisions 10-12 March 2009, University of Copenhagen (Ramstorf est de l'Institut de recherche sur le climat de Potsdam).

RIEDACKER A., DAMERON V. *et al*., 2005 – "An integrated approach to stabilize greenhouse gas concentration in the atmosphere: the impact of aforestation of agricultural land becoming available in the world", 14th European Biomass Conference and Exhibition Biomass for Energy Indusdry and Climate Protection 17-21, octobre, Paris, 5 p.

RIEDACKER A., 2008a – "Reconsidering Approaches for Land Use to Mitigate Climate change and to Promote Sustainable Development", In Global Warming and Climate Change Ten Years after Kyoto and Still counting Editor Velma Grover United nations University Science Publishers Enfield, 387- 424.

RIEDACKER A., 2008b – « Pourquoi passer maintenant des Analyses de cycles de vie (ACV) aux Évaluations environnementales intégrées (EEI) pour évaluer les mérites des biocombustibles et des biocarburant ? », Conférence Sifée, 8 au 11 septembre 2008, Québec, http://www.sifee.org/

RIEDACKER A., 2008 c – « L'Évaluation environnementale planétaire intégrée : l'ÉPI, un outil d'aide à la décision pour le développement planétaire durable », Conférence européenne sur les forêts, International Conference "The European Forest-Based Sector: Bio-Responses to Address New Climate and Energy Challenges?" 6-8 November 2008, Nancy, France, Organized under the auspices of the French Presidency of the European Union.

RIEDACKER A., 2009a – Increasing efficiency of land use and phytomass conversion to mitigate climate change until 2050, Speech in Congress on Climate Change Global risks, Challenges & Decisions 10-12 March 2009, University of Copenhagen.

RIEDACKER A., 2009b – « L'Initiative climat et développement boisements et déforestations évitées. Les défis », Congrès de l'ACFAS, mai 2009, Ottawa, 13 p.

# 2. Le captage du gaz carbonique en vue de son stockage géologique

## 2.1. Présentation générale de la problématique sur le stockage géologique du $CO_2$

Comme on l'a mentionné plus haut, le captage et le stockage durable du gaz carbonique peuvent être obtenus par voie géologique (CSC, pour Capture et stockage du gaz carbonique ou CCS en anglais pour Carbon dioxide Capture and Storage).

Cette approche se distingue sur bien des points de la capture et du stockage de $CO_2$ par et dans la végétation que nous rappelons brièvement ici.

La végétation peut en effet également capter le $CO_2$ de l'atmosphère et le stocker, mais seulement temporairement, pendant moins d'un an dans les plantes annuelles ou pendant plusieurs siècles dans les phytomasses des arbres. À la différence de la CCS la capture du $CO_2$ s'accompagne par une bioconversion de l'énergie solaire. Cette énergie solaire est alors stockée sous forme biochimique dans les phytomasses. Lors des combustions, ces dernières libèrent cette énergie solaire précédemment convertie. Ce qui permet de remplacer des énergies fossiles et donc de diminuer les émissions nettes de $CO_2$. Nous examinons plus loin, dans le chapitre 4, une de ces possibilités.

Tant que les arbres croissent, les stocks de carbone dans leurs phytomasses augmentent : cette augmentation est rapide quand les arbres et les peuplements sont jeunes, mais en vieillissant ces stocks augmentent de moins en moins vite et finissent presque par ne plus augmenter. Il y a donc une limite à l'augmentation des stocks de carbone dans la végétation, c'est-à-dire à ce que l'on appelle parfois la fonction « puits » de la végétation. Celle-ci est, du moins théoriquement, très inférieure au stockage géologique de $CO_2$. Dans le chapitre 5 on examine ce que l'on sait des potentialités d'augmentation des stocks de carbone dans la végétation forestière de la N.-C.

Quand les phytomasses se décomposent elles libèrent à nouveau le $CO_2$ qu'elles avaient précédemment, durant leur croissance, prélevé dans l'atmosphère. Cette décomposition peut être biologiques (pourrissement des arbres morts décomposés par les bactéries et les champignons) ou thermique (décomposition par le feu lors des incendies ou dans les chaudières). À la différence du stockage géologique du $CO_2$ (CCS) le stockage du $CO_2$ dans un arbre n'est pas permanent.

Le captage et le stockage géologique de $CO_2$ demandent en revanche un supplément d'énergie fossile, alors que la bioconversion de l'énergie solaire par la végétation demande essentiellement de l'énergie solaire renouvelable.

Enfin le $CO_2$ stocké géologiquement ne peut plus fournir d'énergie (c'est du $CO_2$ et pas du charbon ou du pétrole), alors que l'accroissement du stock de carbone dans les phytomasses qui résulte de prélèvements du $CO_2$ dans l'atmosphère et de la bioconversion de l'énergie solaire, donne des matières végétales dont la décomposition thermique ou biologique fournit de nouveau de l'énergie.

Ces options ne sont pas exclusives l'une par rapport à l'autre. Le stockage géologique paraît cependant aujourd'hui incontournable pour stabiliser le climat bien que les technologies industrielles envisagées de captage du $CO_2$, entraînent une surconsommation énergétique non négligeable qui pourrait induire, hors coût du transport et du stockage du $CO_2$, des baisses de rendement de la centrale de l'ordre de 6 à 12 points. Mais même si cette technologie parvenait assez rapidement à maturité technologique et économique, c'est-à-dire vers 2020 ou 2030,

elle ne pourrait en aucun cas remplacer les efforts de réductions des émissions envisagés pas d'autres moyens dans les autres secteurs.

Nous présentons donc ci-dessous l'état des connaissances pour la capture du $CO_2$, puis la possibilité de stockage du $CO_2$, notamment en N.-C.

Signalons aussi que le bulletin « Greenhouse Issues » de l'Agence internationale de l'énergie (IEA Greenhouse Gas R&D Programm) publie chaque année plusieurs numéros d'un bulletin, de 20 à 30 pages, qui permet de s'informer régulièrement de l'avancée des connaissances techniques, économiques et juridiques relatifs au captage et au stockage géologique du $CO_2$ (http://www.ieagreen.org.uk).

En dehors du rapport spécial du Giec, on pourra également consulter *Carbon Capture and Storage. R& D Technologies for Sustainable Energy Future* édité par M. Goel, B. Kumar et S. N. Charran, 242 p., Narosa Publishers, 2008.

### 2.2. Le captage du $CO_2$

Parmi l'ensemble des mesures visant à réduire les émissions de GES, la séquestration géologique d'une partie du $CO_2$ s'affirme comme une option forte du développement de vecteurs énergétiques et procédés industriels à moindre contenu en carbone.

L'option visant à capturer puis à stocker durablement le $CO_2$ dans le sous-sol semble une solution prometteuse en terme de quantité de $CO_2$ stockée et en terme de durée de stockage. Selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie), les potentiels sont de 920 Gt pour les gisements épuisés de gaz ou de pétrole, compris entre 400 et 10 000 Gt pour les réservoirs salins profonds et supérieurs à 15 Gt pour les mines de charbon inexploitables. Le potentiel total est à comparer avec les émissions totales de $CO_2$ estimées entre 2000 et 2050 qui sont de l'ordre de 26 Gt/an (scénario *Business as usual* /Projection IS92a du Giec).

On pense également qu'il pourrait être possible de séquestrer le $CO_2$ dans des péridotites (roches présentes dans de nombreux bassins dans le monde, en particulier dans le bassin d'Oman et en N.-C.), ce processus naturel, connu des géochimistes, devrait permettre la minéralisation du dioxyde de carbone au contact de la péridotite et de l'atmosphère en profondeur. Cette possibilité est détaillée dans le chapitre 3.

Actuellement, le captage et le stockage du $CO_2$ ne sont envisagés que pour des sources importantes et localisées (principalement les centrales thermiques et les industries lourdes avec des rejets supérieurs à 100 000 $tCO_2$/an, à comparer aux installations de NC qui émettent 3,5 $MtCO^2$/an pour Doniambo, 1,1 M $tCO^2$/an pour Prony et Goronickel).

Aussi, d'un point de vue structurel, les émissions de $CO_2$ par le secteur des transports et du résidentiel sont diffuses et ne peuvent pas faire l'objet d'une capture en l'état.

Les procédés à mettre en œuvre sont complexes et actuellement encore trop coûteux. Mais on estime que leur coût pourrait être abaissé et devenir acceptable sous contrainte climatique forte et à condition d'en abaisser encore significativement le coût, c'est-à-dire après 2020 Cette question est précisée plus loin, dans le chapitre 6. Il reste donc encore à prouver la faisabilité industrielle de ces procédés, la sûreté d'un stockage à long terme et à abaisser les coûts.

Pour attester l'intérêt croissant de développement de recherches dans le domaine de la CCS, le ministère de la Recherche français a demandé à l'ANR (Agence nationale de la recherche) de financer de 2005 à 2008 un programme de recherche sur « Le captage et le stockage du $CO_2$ ». Puis en 2009, un nouveau programme sur « L'efficacité énergétique des

systèmes industriels » a été initié, il intègre les problématiques de capture du $CO_2$. Les objectifs de ce programme seront donc :

- de valider des solutions technologiques et géologiques permettant de traiter durablement le $CO_2$ avec un coût acceptable (réduction d'un facteur de 2 à 3, ce qui correspondrait à doubler le prix de l'électricité produite à partir de charbon) ;
- de surveiller les stockages souterrains (absence de nuisances et de danger en cas de fuites). Les étapes de la recherche comprendront la validation, à la fois des procédés de CCS développés en laboratoires et sur des pilotes, puis l'évaluation du coût économique avant le déploiement industriel. Déjà des plates-formes sont soit envisagées, soit construites par les grands groupes industriels de par le monde, mais aucune technologie ne s'impose encore actuellement.

Ce rapport trace un état de l'art des différents procédés envisagés pour le captage du $CO_2$ à des fins de stockage géologique à long terme. Lors de son déploiement, le procédé industriel doit prendre en compte les contextes économiques (coût de l'installation, de son fonctionnement incluant la maintenance), énergétiques (efficacité énergétique globale), sans oublier les aspects sécuritaires et d'acceptabilité par les populations. Il doit également comporter une approche systémique globale incluant la ressource énergétique (types de combustibles et comburants employés), le procédé industriel de conversion chimique de l'énergie et enfin la gestion des effluents (polluants tels que les oxydes d'azote (NOx), de souffre (SOx), COV (composés organiques volatils), les particules et aérosols (actions sur la santé), bruit. Dans les paragraphes suivants, un panorama des différentes technologies de captage, puis de stockage géologique du $CO_2$ sera présenté avant de proposer une stratégie plus adaptée au parc industriel de la N.-C.

Simultanément à une réduction des émissions de GES par une amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes, il faut considérer le procédé dans sa globalité : quelle ressource (comburant/combustible) doit être utilisée, quel procédé de conversion de l'énergie doit être considéré, quel processus industriel adopter, afin de réduire les coûts du captage du $CO_2$ puis son stockage (CCS), en préservant la sécurité à toutes les étapes ?

### *2.2.1. Grandes orientations technologiques pour réduire le coût du captage du $CO_2$*

Dans la chaîne de CCS, le coût le plus important est celui du captage du $CO_2$, il consiste à séparer le $CO_2$ des autres produits de combustion : l'azote pour des combustions à l'air, l'oxygène non consommé (combustion pauvre), l'eau, les polluants (hydrocarbures imbrûlés, les oxydes d'azote (NOx) et de soufre (SOx), les particules, les suies, les composés organiques volatils (COV). Dans une combustion avec de l'air, il s'agira donc d'extraire le $CO_2$ qui est en concentration faible (6 à 12 % en masse) des autres produits, en particulier de l'azote après séchage des fumées. Pour s'affranchir de cette séparation, un des procédés envisagés est d'effectuer une combustion dans de l'oxygène pur (oxy-combustion), ou dans de l'air enrichi en oxygène, de façon à obtenir en postcombustion, et après séchage des fumées, une forte concentration en $CO_2$ qui peut alors être capté plus facilement. Le coût énergétique de la production doit inclure la production d'oxygène.

Sans une diminution drastique du coût de capture du carbone, l'applicabilité du procédé peut être remise en cause.

### *2.2.2. Procédés en cours de maturation pour le captage du CO2 des centrales thermiques*

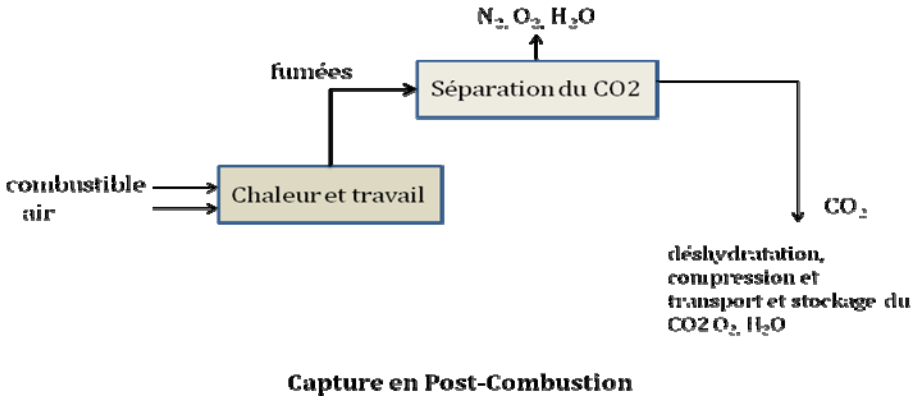
Plusieurs approches pratiques et théoriques du procédé CCS ont été recherchées depuis 15 ans. Elles ont révélé que la CCS peut être une technologie permettant réellement de réduire les émissions de $CO_2$. Parmi les étapes de captage, transport et stockage du $CO_2$, c'est le captage qui déterminera le coût global de la CCS avec une contribution aux alentours de 75 % du coût global du procédé. Cela pourrait augmenter le coût de production de l'électricité de 50 %. C'est donc sur la capture que doit porter l'effort majeur de réduction du coût énergétique et économique pour rendre cette option acceptable pour l'industrie de l'énergie. Trois options technologiques de capture du $CO_2$ sont développées :

#### 2.2.2.1. Le captage en postcombustion

**a. Principe général**

Le $CO_2$ est capté dans les fumées à basse pression (1 bar) avec une faible concentration (3 à 20 %) en général. L'opération de captage consistera donc à extraire le $CO_2$ d'un mélange gazeux composé principalement de $CO_2$, d'azote et d'oxygène. L'influence des impuretés telles que les oxydes d'azote, de soufre ainsi que les particules doit être prise en considération (figure 19).

**Figure 19 – Technologie de capture du $CO_2$ en post combustion**




*Réactions de combustion*

Charbon : $C + Air \Rightarrow CO_2$

Gaz naturel $CH_4 + Air \Rightarrow CO_2 + H_2O$

*Principe* : Élimination du $CO_2$ des fumées

**b. Les systèmes de captage**

Il s'agit d'adjoindre une unité de captage du $CO_2$ à une centrale conventionnelle (chaudière ou turbine à gaz). Le challenge consiste à séparer le $CO_2$ des fumées avec un coût énergétique moindre. Dans ces procédés en postcombustion, le $CO_2$ est séparé des autres constituants des fumées au moyen de techniques d'absorption (chimique et physique), d'adsorption, cryogéniques ou membranes.

Capture en postcombustion d'un procédé avec chaudière ou LFC : le combustible (lignite ou biomasse) est injecté avec l'air dans le foyer de la chaudière. Les échangeurs thermiques de cette dernière élèvent la température de la vapeur d'eau (700 °C) qui se détend dans une turbine à vapeur pour produire l'électricité grâce à un alternateur couplé. Les

cendres sont récupérées dans la partie inférieure de la chaudière. Les fumées sont dépoussiérées, désulfurées, dénitrifiées, refroidies, l'eau de combustion est condensée. Puis le $CO_2$ est capturé par absorption par un solvant aux amines, ammoniac ou autres. Le solvant est régénéré par chauffage et relâche le $CO_2$ qui est alors compressé puis introduit dans le réseau de transport vers le lieu de stockage.

Capture en postcombustion pour une turbine à gaz avec cycle combiné : le principe est semblable si ce n'est qu'en lieu et place de la chaudière ou du LFC, une turbine à combustion, ou turbine à gaz (TAG), fonctionnant au gaz naturel à l'hydrogène (technologie non mature) est utilisée et couplée à un alternateur. Pour accroître le rendement du procédé, une turbine à vapeur, couplée à un second alternateur, est utilisée pour valoriser la chaleur des gaz de sortie de la TAG (cycle thermodynamique combiné). Le procédé de captage reste identique à celle de la technologie précédente.

**c. Commentaires et potentiel d'application à la Nouvelle-Calédonie**

Ce procédé est le seul capable de s'adapter directement sur une installation existante, sans modifications majeures, dès que les effluents du procédé de combustion sont suffisamment épurés pour satisfaire aux conditions de compression, de liquéfaction, de transport et de stockage géologique du $CO_2$. Il faut s'assurer de cela pour coupler les centrales de Prony et Doniambo ainsi que sur l'usine pyrométallurgique à une unité de capture des effluents.

Par contre, l'étude préliminaire peut imposer d'adjoindre des unités de dénitrification et de désulfurisation des fumées avant de penser au captage du $CO_2$. Ces équipements nécessitent un investissement très important qui augmentera le coût de la tonne de $CO_2$ évitée.

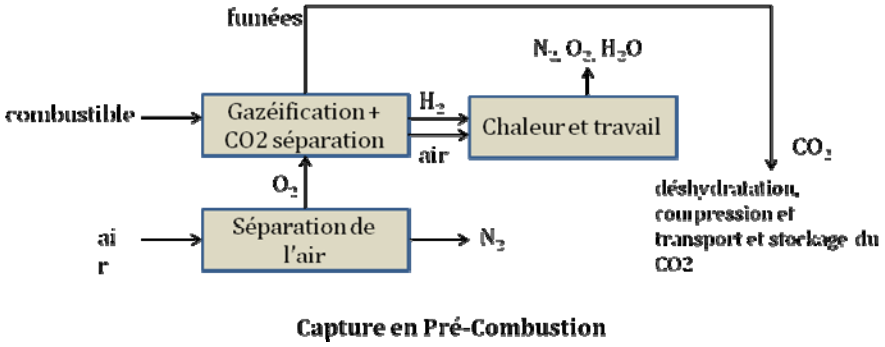
#### 2.2.2.2. La capture en précombustion

**a. Principe**

L'objectif de ce procédé (figure 20) est de capturer le $CO_2$ en précombustion afin d'effectuer la combustion à l'air d'un combustible non carboné (hydrogène) produit.

Pour cela, dans une première étape il sera effectué une gazéification du combustible (charbon, lignite, biomasse), généralement à la pression atmosphérique ou à haute pression (15 à 40 bars) en présence d'oxygène pur (le procédé n'exige de l'oxygène que pour la gazéification, oxydation ménagée), donc beaucoup moins d'oxygène que pour une oxy-combustion classique). Les produits de gazéification sont appelés gaz de synthèse ou *syngas*, ils sont composés majoritairement d'un mélange $CO/H_2$. Ce rapport est ajusté en fonction de l'application, il varie avec le combustible utilisé et la quantité d'eau introduite sous forme de vapeur (apport d'hydrogène) dans le gazéifieur. La deuxième étape consiste à oxyder le CO en $CO_2$ (réaction de shift), le $CO_2$ se retrouve alors en forte concentration (15 à 40 %), il est alors séparé de l'hydrogène. Les gaz peuvent contenir également du CO, du $H_2S$ ou d'autres composés sulfureux. Dans une dernière étape, l'hydrogène est brûlé avec de l'air dans une turbine à gaz.

**Figure 20 – La capture en précombustion**




L'avantage majeur de cette technique est la production à grande échelle d'hydrogène. Si la séparation $CO_2/H_2$ est facilitée à haute pression, la séparation avec de l'azote avant la gazéification à l'air exige de l'apport d'énergie, bien que ce procédé nécessite encore une démonstration et un bilan énergétique et économique.

*Réaction de combustion*

Charbon $C + O2 \Rightarrow CO$ et $CO + H_2O \Rightarrow CO_2 + H_2$

Gaz naturel $CH_4 + H_2O \Rightarrow CO_2 + H_2$

*Principe* : Combustion de gaz de synthèse sans carbone

**b. Présentation de la technique de la gazéification**

*C'est une oxydation partielle (ou ménagée) du combustible (charbon, lignite, biomasse). Lors de cette étape, le combustible est pyrolysé puis oxydé afin de former des gaz de synthèse* syngas *composés d'un mélange de CO et de $H_2$. Le rendement de la gazéification est augmenté si elle est effectuée sous pression et en présence d'oxygène pur.*

Une première filière consiste à produire à partir de gaz de synthèse épurés et au moyen du procédé catalytique Fischer Tropsch, des hydrocarbures lourds (chaînes linéaires possédant plus de 20 atomes de carbone) qu'il faudra ensuite raffiner (cf. « Les nouvelles technologies en matière de production et de stockage d'énergie » portant sur les biocarburants de seconde génération).

Une seconde filière va consister à valoriser les gaz de synthèse (mélange $CO_2/H_2$). Par la réaction de *shift* avec injection de $H_2O$ en présence d'un catalyseur, le CO est oxydé en $CO_2$ qui est alors séparé de l'hydrogène sous pression au moyen d'une technique de lavage par solvant ou toute autre technique (adsorption, membrane) applicable au traitement de gaz sous pression. Le $CO_2$ est ensuite conditionné pour un transport vers le lieu de stockage. L'hydrogène est épuré.

L'hydrogène est alors brûlé soit dans une chaudière, soit dans une turbine à gaz fonctionnant avec ou sans cycle combiné (combinaison de turbines à gaz et à vapeur). De telles turbines à gaz ne sont toujours pas opérationnelles, les instabilités de la combustion restent toujours un verrou à résoudre préalablement au déploiement de la technique (maîtrise du mélange $H_2/N_2$/air avec fort effet de densité, formation des NOx thermiques, adaptation des modèles de combustion turbulente, sécurité…).

Par rapport au captage du $CO_2$ dans les fumées d'une centrale à la pression atmosphérique, le procédé à haute pression va permettre de réduire la taille du gazéifieur et de limiter la perte de rendement (surtout pour une absorption physique à haute pression). En

conséquence, c'est un gaz très riche en hydrogène qui sera brûlé dans la turbine à combustion. Le $CO_2$ capté est très propre (85 %), il faut néanmoins éliminer la vapeur d'eau et les traces d'absorbant qu'il peut contenir avant compression et transport vers son lieu de stockage. Ce procédé est dénommé IGCC *Integrated Gasification Combined Cycle.*

Cette technique est la seule qui ouvre la voie à des centrales émettant peu de $CO_2$ et pouvant produire : de l'électricité, de la chaleur, de l'hydrogène et des carburants de synthèse.

**c. Commentaires et potentiel d'application à la Nouvelle-Calédonie**

Ce procédé utilisant un cycle combiné a pour objectif de produire, avec peu d'émission de $CO_2$, de l'hydrogène pouvant être soit brûlé dans une chaudière ou dans une turbine à gaz couplée à une turbine à vapeur afin d'atteindre un rendement voisin de 50 %, soit utilisé pour alimenter une pile à combustible. Il ne peut s'implanter que sur des installations neuves et pour des grandes capacités de production centralisée avec co-génération électricité-chaleur à partir de gaz naturel (la gazéification devient dans ce cas un réformage pour la production d'hydrogène), de charbon, d'huiles lourdes ou de biomasse.

Les technologies de base sont disponibles. Il reste néanmoins à intégrer de façon optimale l'ensemble des étapes en vue d'une injection de $CO_2$ dans le sous-sol à des fins de stockage. Différentes études ont été engagées, ou sont prévues, notamment dans le cadre des projets européens du 6$^{e}$ PCRD (projet Encap, propositions Cachet et Dynamis consultables sur le site http://www.encapco2.org).

Pour être opérationnel avec un rendement correct, des résultats de la recherche sont encore nécessaires pour améliorer la disponibilité des centrales IGCC, diminuer le coût et de la consommation énergétique de l'unité de production d'oxygène, développer de meilleurs catalyseurs pour la conversion *shift* du CO en $CO_2$, mettre au point des solvants plus performants pour l'absorption physique, et enfin maîtriser des méthodes performantes nouvelles pour la séparation $CO_2/H_2$.

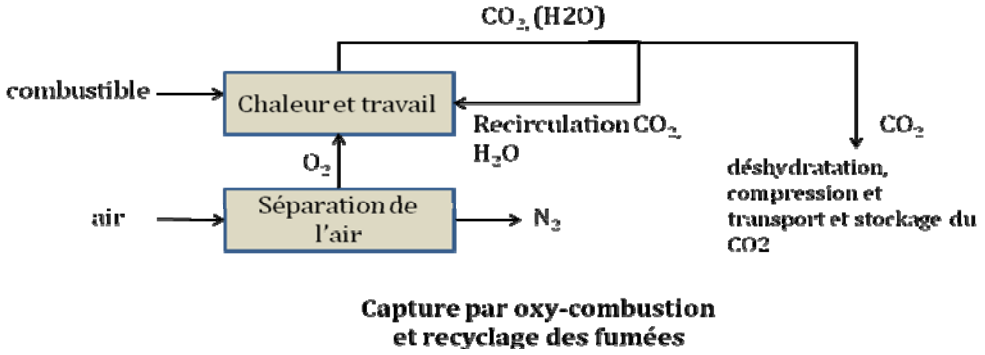
En conclusion, la technique IGCC est actuellement la plus chère, aussi bien lors de l'équipement, qu'en fonctionnement (rendement légèrement plus faible) ; son grand avantage est de mener à une combustion très propre. Son déploiement en N.-C., et dans le monde, exige encore des validations sur pilotes et démonstrateurs. La N.-C. ne présente pas de débouchés pour un marché de l'hydrogène. Le fonctionnement d'un procédé IGCC utilisant de la biomasse n'est sans doute envisageable en N.-C. qu'avec du bois importé (cf. chapitre 4), car la ressource végétale locale est insuffisante, comme cela est indiqué dans ce rapport dans « Les nouvelles technologies en matière de production et de stockage d'énergie ».

### 2.2.2.3. Les procédés d'oxy-combustion

**a. Principe**

La plupart des combustions ont lieu avec comme comburant l'air ambiant (21 % oxygène en masse dilué dans 79 % d'azote). L'objectif de ce procédé (figure 3) est d'obtenir un flux de $CO_2$ très concentré à la sortie de la chambre de combustion afin d'éviter d'avoir à le séparer de l'azote après la combustion. Pour cela, l'azote est exclu du système avant ou pendant les étapes de combustion/conversion. Le procédé va consister à produire un flux gazeux à très haute teneur en oxygène obtenu à partir de la séparation de l'air en oxygène et azote avant de l'introduire dans le foyer. C'est donc une combustion dans l'oxygène quasi pur : oxy-combustion.

**Figure 21 – La capture lors d'un procédé d'oxycombustion**




*Réactions de combustion:*

Charbon $C + O_2 \Rightarrow CO_2$

Gaz naturel $CH_4 + O_2 \Rightarrow CO_2 + H_2O$

*Principe*: Production d'un flux de $CO_2$ pur

**b. Présentation de l'oxy-combustion et de la combustion en air enrichi**

La combustion à l'oxygène est une technologie utilisée avec succès depuis de nombreuses années pour améliorer les performances des procédés industriels (en particulier les fours verriers). La combustion à l'oxygène de combustibles fossiles, ou de biomasse, dans des chaudières industrielles pour la production de vapeur et/ou d'électricité est une des voies majeures pour la réduction des émissions de $CO_2$. En effet, les produits de combustion sont alors essentiellement constitués de vapeur d'eau et de $CO_2$ dont la séparation s'effectue dans un premier temps par condensation. Plus précisément, l'étape de séparation du $CO_2$/azote dans les fumées en aval du procédé est remplacée par une étape de séparation d'air en amont du procédé.

Nous venons de montrer que l'accroissement de la concentration en oxygène du comburant réduit le coût du captage, ce dernier étant quasi nul lorsque la fraction massique en $CO_2$ dans les fumées est proche de 1. Bien sur s'ajoutent ici les coûts de la séparation de l'oxygène de l'air. Dans ces conditions, la combustion en air enrichi en oxygène ou en oxygène pur est un procédé particulièrement attrayant qui est de plus en plus envisagé ; de plus il réduit d'un facteur proche de 3 à 5 la taille des fours ou foyers, augmente les transferts radiatifs flamme/cible (échangeurs thermiques), diminue le bruit d'écoulement. Par contre les oxy-flammes sont très chaudes ($T_{flamme}$>2800K, l'azote n'étant pas présent dans le réacteur, il ne s'échauffera pas et n'absorbera pas d'énergie, ce qui pose des problèmes de tenue des matériaux et engendre une production de NOx très importante dès que la moindre trace d'azote sera présente dans le four. Des techniques complexes de combustion étagée ou de dilution des réactifs dans des produits de combustion ($CO_2$-eau) avant combustion doivent être alors employées. Pour cela, une recirculation des produits de combustion est générée soit à l'intérieur de la chambre de combustion, soit à l'extérieur. Un avantage supplémentaire à cette technique est que toutes les impuretés sont capturées en même temps que le $CO_2$ en sortie de chambre, le procédé étant découplé des produits de combustion. L'optimisation de ce régime de combustion est encore au stade de recherche.

L'oxy-combustion ne requiert pas de modifications majeures de l'installation et peut être envisagée pour modifier une centrale existante. Pour les applications énergie dans le cas du charbon pulvérisé, des tests sur pilote (1.5 $MW_{thermique}$) avec recirculation des fumées ont prouvé la faisabilité technique du procédé.

Quelques problématiques spécifiques restent à résoudre telles que la formation des suies, l'oxy-combustion diphasique, l'oxydation des parois en milieu oxydant à haute température, la filtration des effluents, les couplages thermo-acoustiques ainsi que la maîtrise des instabilités de combustion (fluctuations de pression, bruit, détérioration du système) dans les turbines à gaz.

**c. Oxy-combustion du charbon pulvérisé (CP)**

Le combustible est brûlé dans une chaudière à charbon pulvérisé (CP) fonctionnant avec un mélange d'oxygène (environ 25 % volume, valeur qu'il reste encore à optimiser) et fumées recirculées (essentiellement du $CO_2$), un *rétrofit* est possible sans modification importante de la géométrie de la chaudière. Ce procédé permet une adaptation simple à la technologie actuelle du CP à l'air ; des gains énergétiques importants sont possibles sur les systèmes de post-traitement des fumées avec lavage aux amines. Les briques technologiques sont disponibles pour la séparation de l'air et le conditionnement du $CO_2$.

Un des verrous principal reste la production d'oxygène à grande échelle et à bas coût. L'ensemble production d'oxygène et le post-traitement du $CO_2$ représente environ 35 % de la production d'électricité de la centrale. L'injection du mélange $O_2/CO_2$ combinée à celle du CP reste également un verrou pour une application à grande échelle.

Des analyses technico-économiques préliminaires sont actuellement réalisées pour des unités de 450 $MW_{electrique}$ ainsi que pour le dimensionnement d'une installation à charbon pulvérisé en oxy-combustion supercritique de 1 200 $MW_{electrique}$.

**Commentaires et développement en Nouvelle-Calédonie**

Cette technique, quand elle sera disponible commercialement, sera adaptable à la centrale de lignite pulvérisé de Prony sans modification majeure de la chaudière, seul une unité de séparation d'air est à rajouter. Les fumées nécessiteront le cas échéant une épuration avant un conditionnement et leur transport vers le lieu de stockage.

Le délai de disponibilité commerciale de ce procédé est d'environ 10 ans. Mais il faudra probablement adapter les technologies à la relative petite taille des unités de l'usine de Prony (2 x 40 $MW_{electrique}$).

**d. Oxycombustion dans une chaudière à lit fluidisé circulant LFC**

Le domaine d'application de cette technologie reste identique : la production d'électricité avec capture *in situ* du $CO_2$ pour une récupération assistée et un stockage.

Le combustible (charbon, lignite, biomasse ou boues de stations d'épuration) est brûlé dans un LFC compact fonctionnant avec un mélange oxygène (70 %vol.) et de fumées recyclées (essentiellement $CO_2$). Seul, une adaptation simple de la technologie actuelle du LFC à l'air par extrapolation des lits extérieurs est nécessaire. Des gains importants peuvent être réalisés sur les coûts en raison d'une diminution importante de la taille de l'îlot chaudière comparée à une version LFC à l'air, ainsi que sur le système de post-traitement des fumées type lavage aux amines. Ce procédé utilise des technologies déjà éprouvées telles que la production d'oxygène par unité de séparation d'air et un système de traitement de gaz (pour produire un $CO_2$ compatible avec une application de récupération assistée).

Des analyses technico-économiques préliminaires ont déjà été réalisées pour des unités de 40 et 250 $MW_{electrique}$ et un développement est en cours pour le dimensionnement d'un LFC oxy-combustion supercritique de 400 $MW_{electrique}$ et de 600 $MW_{electrique}$..

Au niveau du LFC, l'extrapolation des lits extérieurs et le traitement des incondensables sont les priorités du développement.

**e. Commentaires et potentiels d'application à la Nouvelle-Calédonie**

Il n'y aurait pas d'obstacle à l'adaptation des installations industrielles calédoniennes à une oxy-combustion puisque ce procédé s'applique aussi bien sur une chaudière à charbon pulvérisé, à lit fluidisé ou une turbine à gaz. Des modifications de la géométrie interne de la chambre sont tout de même à réaliser, en particulier pour optimiser les recirculations internes ou externes permettant la dilution des réactifs dans les produits de combustion. Ce contrôle aérodynamique évite ainsi la formation les pics à hautes températures favorables à la formation des oxydes d'azote d'origine thermique.

L'implantation de l'option d'oxy-combustion sur les centrales électriques de Doniambo et Prony serait réalisable avec des adaptations modérées, mais une pré-étude économique et énergétique devra valider le procédé.

### *2.2.3. Les procédés de séparation et de captage*

Parmi les procédés de captage en post et précombustion, le $CO_2$ est séparé des autres constituants des fumées au moyen de techniques d'absorption (chimique et physique), d'adsorption, cryogénique ou membranes. Ces méthodes sont sélectionnées en fonction des caractéristiques des fumées (température, pression, concentration (5 % en volume sec pour une combustion au GN et 15 % en volume sec pour la combustion du charbon pulvérisé) et du débit volumique (tonnage de $CO_2$ à traiter quotidiennement).

#### 2.2.3.1. Séparation du $CO_2$ par absorption aux amines

Ce procédé consiste à capter le $CO_2$ au moyen d'un solvant physique ou chimique dans une phase d'absorption. Il s'applique préférentiellement au captage de 85 à 95 % du $CO_2$ présent dans les fumées, la pureté sera supérieure à 99,95 %. Pour optimiser le procédé, le choix de l'amine (mol $CO_2$/mol amine) s'effectue en fonction de sa concentration dans la solution aqueuse (limitation d'une corrosion excessive), de la chaleur de la réaction et de gazéification, de la cinétique chimique, du niveau de température de régénération, de la corrosion… L'optimisation du procédé découlera d'un compromis entre les différents solvants disponibles. Le solvant est ensuite régénéré par apport énergétique (augmentation de température ou abaissement de la pression). Le $CO_2$ libéré lors de la régénération est ensuite compressé puis dirigé vers son stockage. Le solvant régénéré est renvoyé pour la phase d'absorption. Des recherches sont conduites sur les amines en Australie (CSIRO Energy Centre 10 Murray Dwyer Circuit Steel River Industrial park Mayfield West).

Les solvants physiques utilisés sont du méthanol polyéthylène glycol froid, de l'oxyde de calcium de propylène carbonate, l'hydroxyde de sodium ou de potassium. Ces solvants sont plus actifs à haute pression que sur des fumées à pression ambiante. On citera le Rectisol de Lurgi, le Selexol d'UOP ou l'Ifpex 2 de l'IFP.

Les solvants chimiques, type_MEA (mono-éthanol amine) de Fluor Engineering sont mieux adaptés au traitement des fumées atmosphériques. Les animes KS-1, KS-2 et KS-3 développées par Kansai Electric Power Compagny and Misubishi Heavy Industries semblent présenter un bon potentiel par un différentiel de charge important, une température de régénération faible, une chaleur de réaction basse et une faible corrosion de l'acier à 130 °C en présence d'oxygène.

Pour espérer le déploiement du procédé de captage aux amines, il faudra améliorer les techniques permettant de réduire fortement l'énergie de régénération (trouver de nouveaux

solvants ayant une faible chaleur de réaction et récupérer de la chaleur du système), de réduire la taille (actuellement, ce procédé ne peut s'appliquer que sur de petites unités) et le coût énorme des installations de capture, de limiter les pertes de solvants (coût du produit, pollution) et enfin résoudre les problèmes de corrosion dus à la présence d'oxygène et de $CO_2$. Il faut également prendre en considération la dégradation du solvant par la présence d'oxygène, des SOx (réaction irréversible avec le MEA), des NOx (corrosion et destruction), des cendres volantes (agglomeras corrosifs et abrasif dans le solvant), des suies (brume d'amine au-dessus de la zone d'absorption) et enfin des déchets d'animes dégradées à éliminer.

Ce procédé est le plus attractif pour une capture du $CO_2$ sans modification du procédé de combustion.

#### 2.2.3.2. Séparation du $CO_2$ par adsorption sur un solide

Le procédé consiste à adsorber le $CO_2$ contenu dans les fumées sur un solide en mode continu (technologie type FCC) ou discontinu (PSA, TSA). Ce dernier est alors régénéré par un apport énergétique caractérisé par une élévation de la température ou par une baisse de la pression. Le $CO_2$ libéré lors de la régénération est dirigé vers son stockage. Le solide régénéré est ensuite réutilisé en adsorption. La limitation principale de ce procédé tient à la sélectivité et à la capacité des absorbants ainsi qu'à la réduction des surfaces adsorbantes afin de diminuer la taille des installations.

La recherche des solides destinés à la captation du $CO_2$ fait toujours l'objet d'intenses recherches, aussi bien au Japon avec l'utilisation d'orthosilicate de Lithium $Li_4SiO_4$ à une température de 700 °C, qu'aux États-Unis, Battelle avec des silices greffées avec des groupements amines ou de polyamides particuliers appelés dendrimères. La mise en œuvre envisagée est aussi celle du TSA. L'IFP (Institut français du pétrole) possède une solide expérience de ce type de solides pour des applications autres que la capture du $CO_2$. Alstom envisage l'utilisation de solides greffés de formulation $[CU_3(TMA)_3(H2O)_3]_n$ où TMA est relatif à un groupement triméthylamine.

Comme précédemment, des recherches restent indispensables pour minimiser le coût énergétique de la régénération, la dégradation de l'absorbeur en présence de CO2 et d'oxygène, et pour réduire la taille des installations et le prix de l'adsorbeur.

#### 2.2.3.3. Séparation du $CO_2$ par membranes

Ce procédé consiste à effectuer une séparation par perméation membranaire. Ces dernières sont composées de matériaux polymères ou métalliques, ou zéolithiques et ont une épaisseur pouvant varier de quelques nanomètres à quelques millimètres d'épaisseur. Cette technique peut être considérée comme une sorte d'absorption avec la réalisation d'aires interfaciales importantes ce qui permet de réduire la taille des équipements. Cette technologie est difficilement applicable pour la séparation du $CO_2$ dans des fumées atmosphériques du fait de la trop faible pression partielle du $CO_2$. Pour devenir compétitive, ce système doit être utilisé sur des fumées riches en $CO_2$ correspondant par exemple au cas d'une combustion à l'air enrichi.

Les contacteurs membranaires ont été étudiés par le GTI aux États-Unis et par Kvaerner et le TNO en Europe. Le GTI a pu mettre en œuvre ce type de contacteur sur des unités pilote de décarbonatation et de déshydratation du gaz naturel. Kvaerner a étudié ce type de contacteur sur une installation pilote en Norvège (pilote de Kårst opéré par Statoil). Dans ce cas, il s'agissait d'un traitement de fumées. Le solvant utilisé était la MEA (mono-éthanol amine) et la membrane était réalisée en téflon. Le TNO Néerlandais a réalisé des études de

décarbonatation de fumées à l'échelle du laboratoire sur la base de solvants de type acides aminés et d'une membrane en polypropylène.

Les verrous restent liés au développement de nouvelles membranes plus perméables au $CO_2$ dont le prix et à la tenue mécanique (percement), thermique (tenue aux hautes températures) et chimique (corrosion) de la membrane seraient améliorés. Ce procédé devient compétitif dès que la différence de pression et de concentration entre les côtés de la membrane augmentent.

#### 2.2.3.4. Séparation du $CO_2$ par procédé cryogénique (procédé givrage/dégivrage Armines)

Ce procédé développé par Armines consiste à givrer le $CO_2$ à pression atmosphérique sur des surfaces à basse température (-120 °C) après avoir condensé la vapeur d'eau présente dans les fumées. Ce procédé pour être économiquement performant doit être utilisé pour des fumées à haute teneur en $CO_2$.

L'avantage de ce procédé est d'être applicable à des installations existantes de combustion de tout secteur industriel, il assure une bonne pureté du $CO_2$ et permet le passage direct du $CO_2$ solide au $CO_2$ liquide qui peut être introduit dans les pipelines ce qui est un avantage important du point de vue énergétique.

#### 2.2.3.5. Unité de séparation de l'air - Technologies de production d'oxygène

Trois principales technologies sont disponibles pour la production d'oxygène : la distillation cryogénique, l'adsorption (avec régénération par variation de pression ou sous vide) et les membranes polymères. Les critères de choix portent sur la pureté requise et le débit à produire.

Pour les applications « énergie » la distillation cryogénique apparaît aujourd'hui comme la seule voie susceptible d'être appliquée pour des unités commerciales d'oxy-combustion à l'horizon 2015. En effet, les débits requis sont très importants (ordre de grandeur : 1 000 $tO_2$ par jour pour une centrale au charbon de 50 $MW_{electrique}$), ce qui rend impensable actuellement l'utilisation des autres procédés. Les technologies cryogéniques existantes atteignent des tailles de 5 000 $tO_2$/jour, et des études de conception en cours ont établi que des tailles de l'ordre de 7 000 $tO_2$/jour (grâce à un train de compression d'air) seront atteintes dans les années à venir sans rupture technologique majeure. L'accès à la production d'oxygène sur le sol calédonien est donc envisageable.

La maîtrise de la technologie de production d'oxygène pour la production d'énergie est primordiale, mais d'autres aspects jouent un rôle non moins important et doivent être intégrés à la feuille de route pour la capture du $CO_2$ :

- la fiabilité, la disponibilité et la maîtrise de l'opération, en particulier si l'on envisage d'équiper les technologies de capture du $CO_2$ à des unités de production électrique de base ;
- la maîtrise des risques liés à l'utilisation d'oxygène ;
- la possibilité d'intégration plus ou moins importante de l'unité de production d'oxygène dans le schéma global de production d'énergie (par exemple, valorisation de l'azote).

Bien que très attrayante, vraisemblablement écologique (cycle naturel) et plus efficace que la captation du $CO_2$ par les végétaux supérieurs, l'utilisation des algues n'est qu'à une étape de faisabilité. Des PBR doivent être conçus et des surfaces très importantes doivent être

mobilisées pour une capture en temps réel des émissions des centrales thermiques. Cette technique n'a pas atteint un degré de maturité pour être envisagée sur le territoire calédonien avant une vingtaine d'années.

#### 2.2.3.6. Conclusions sur les techniques de piégeage du $CO_2$ en Nouvelle-Calédonie

Pour le procédé de capture du $CO_2$ en postcombustion, toutes les techniques de capture présentées précédemment (membranes, cryogéniques, absorption aux amines ou adsorption sur un solide) sont connues, mais aucune d'entre elles n'a atteint un degré de maturité suffisant pour être implantée sur une unité industrielle. Leur validation nécessite encore le développement de plateformes et de démonstrateurs. Leurs limitations ont été connues et des efforts de recherche doivent encore être fournis. Les constructeurs devront proposer des solutions pour 2015 en livrant des centrales thermiques *$CO_2$ Capture Ready*.

*En ce qui concerne la N.-C. et étant donné la quantité relativement faible de $CO_2$ rejetée dans l'atmosphère (Prony : 2*40$MW_{electrique}$ : 4270t$CO_2$/jour soit ~1,0Gt$CO_2$/an et Doniambo : 3*70$MW_{electrique}$ 11200tCO2/jour soit ~2.8GtCO2/an, (pour les rejets annuels, le coefficient de disponibilité a été évalué à 0,7 de la puissance maximale)), le déploiement de telles technologies de capture ne peut pas être décidé avant leurs validations sur des installations industrielles.*

## Bibliographie

FERON P.H.M., HENDRIKS C.A., 2005 – $CO_2$ Capture Process Principles and cost, Oil & Gas Science and Technology, Rev. IFP, Vol 60, n° 3, pp 451-459.

METZ B., 2005 – *Piégeage et stockage du dioxide de carbone*, Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique, Rapport spécial du Giec, ISBN 92-9169-219-0.

TONDEUR D., 2004 – *Capture par adsorption de $CO_2$ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole*, Rapport final de Programme Énergie du CNRS.

VGB – $CO_2$ Capture and storage, VGB Report on the State of the Art, Published by VGB Power Tech e.V., http://www.vgb.org/

ZEP, 2008 – European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, Zero Emission Platform : CO2 capture and storage matrix of technologies, 28 july (V5), http://www.zero-emissionplatform.eu/

#### 2.2.3.7. Les filières innovantes de captage du $CO_2$

Le piégeage du $CO_2$ est considéré comme l'étape de la CCS dont le coût est le plus important. D'autres technologies que celles présentées plus haut sont actuellement envisagées. Parmi celles-ci, le procédé de cycle thermochimique ou *chemical looping* possède des atouts certains, en particulier sur le sol calédonien qui pourrait devenir un véritable terrain d'expérimentation et de validation de la méthode.

**a. Captage du $CO_2$ par cycle calcium**

Le procédé consiste à effectuer un cycle du calcium qui absorbe le $CO_2$ contenu dans les fumées pour former un carbonate de calcium. Ce dernier est régénéré sous forme de chaux après craquage dans un réacteur à LFC fonctionnant en oxy-combustion. Une simple condensation de l'eau conduit ensuite à un courant de $CO_2$ pratiquement pur qui peut ensuite

être comprimé et transporté vers le lieu de stockage. Il est possible de produire un ciment de type bellite à partir des pertes de produits calciques. Les nombreux avantages sont liés au faible prix du calcaire, à une technologie LFC bien maîtrisée, une quantité d'oxygène faible à disposer. L'adaptation sur une installation existante est aisée.

Le procédé est encore à l'état de la recherche. Les verrous restent liés au dépôt de calcaire sur un métal (Cu, Ni…) pour en assurer sa tenue mécanique lors de la réaction, à la durée de vie du composé calcique, le contrôle de la porosité lors des boucles chimiques, les écoulements de solides dans les réacteurs et les barrières d'azote.

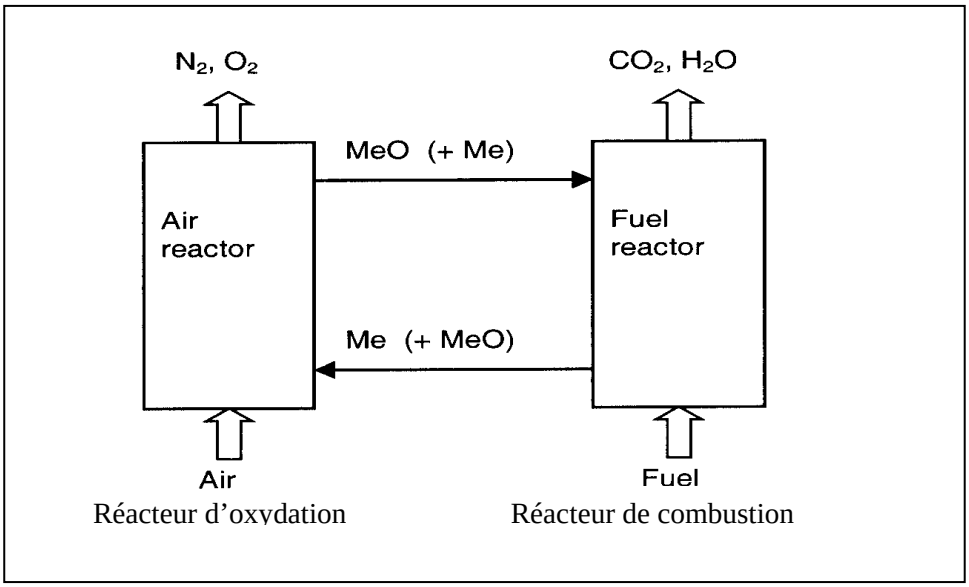
**b. Cycle chimique (lit fluidisé circulant)**

Le domaine d'application de cette technologie est la production d'électricité avec capture *in situ* du $CO_2$ pour une récupération assistée et un stockage du $CO_2$.

Le principe de ce procédé (figure 22) est une combustion indirecte du charbon (ou du gaz naturel) par cycle chimique. Des solides vecteurs d'oxygène, qui pourraient être des oxydes de nickel, de fer ou de manganèse par exemple, réalisent l'oxydation complète du combustible dans un LFC (réacteur de combustion) en un mélange gazeux contenant principalement $CO_2$ et $H_2O$. Une simple condensation de l'eau conduit ensuite à un courant de $CO_2$ pratiquement pur qui peut ensuite être conditionné et transporté. Les solides appauvris en oxygène subissent une oxydation complète dans un second LFC fonctionnant à l'air (réacteur d'oxydation) avant d'être réinjectés dans le réacteur de combustion.

Le nickel pourrait être ce vecteur d'oxygène.

**Figure 22 – Le procédé de cycle chimique *chemical looping***




Cette technologie présente un avantage économique clairement identifié. La technologie du LFC avec cycle chimique ou *chemical looping* est très proche de la technologie actuelle du LFC. L'oxygène est apporté au réacteur de combustion sans la pénalité énergétique d'une unité de séparation d'air. Le coût d'investissement associé à l'unité de production d'oxygène (séparation d'air ou membrane) est ainsi supprimé.

Les principaux verrous identifiés de la technologie résident dans la mise au point d'une barrière de carbone entre les deux LFC, la durée de vie des oxydes (tenue mécanique et

tenue aux impuretés charbon) et la méthode d'élaboration de ces oxydes à grande échelle. L'adaptation au charbon constitue un pas important du développement et de l'intérêt de la filière. Le procédé est à un stade initial de développement, une application commerciale résidus lourds/charbon est envisagée vers 2015.

## Bibliographie

DENIS J.S., 2009 – Chemical Looping Combustion: One answer to sequestering carbon dioxide, Review, 4th European Combustion Meeting, Vienne Univ. of Techn. 14-17th April 2009.

ZEP, 2008 – European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, Zero Emission Platform: $CO_2$ capture and storage matrix of technologies, 28 july 2008 (V5), http://www.**zero-emissionplatform**.eu

### *2.2.4. Conclusion générale concernant le captage du $CO_2$ en Nouvelle-Calédonie sur les sites de production d'électricité et de traitement du nickel*

L'adjonction d'unités de capture de $CO_2$ sur les sites de Prony et de Doniambo sera couteuse étant donné la faible puissance des centrales, même en tenant compte des décisions prises et des investissements engagés (Prony : deux fois 40 $MW_{electrique}$;soit 80 MW électrique ; Doniambo : trois fois 70 MW, soit 210 $MW_{electrique}$). En comparaison les nouvelles centrales dans le monde sont de 1 200 $MW_{electrique}$. Les coûts de la tonne de carbone évitée risquent donc d'être supérieurs à ceux des permis d'émission ou des prix de vente de la $tCO_2$. Cela ne doit pourtant pas empêcher de dessiner des perspectives d'équipements envisageables.

Des technologies existent et sont potentiellement adaptables sur des installations existantes en N.-C. ; il devra être effectué une veille scientifique et une participation active à des programmes de recherches nationaux, européens ou mondiaux dans ce domaine.

Les paragraphes suivants sont « à dire d'expert », c'est-à-dire que les idées émises sont le résultat d'une rapide prise de connaissance avec les données de la N.-C., confrontée aux expériences de l'expert.

#### 2.2.4.1. Adaptation sur les installations actuelles

**Pour la centrale de Prony à charbon pulvérisé**, malgré l'emploi de lignite pauvre en soufre, la capture par absorption aux amines ou ammoniaque conduirait, sans installation de dénitrification et de désulfuration, à une pollution et une dégradation rapide du solvant. Un résultat identique sera obtenu avec des membranes qu'il serait difficile à régénérer.

La seule solution envisageable serait d'effectuer une oxy-combustion. Pour cela, il est nécessaire d'ajouter une unité de séparation de l'air en amont des brûleurs à CP et d'effectuer un re-design du foyer de la chaudière ce qui permettrait de favoriser les recirculations internes ou externes des produits de combustion afin de diluer les réactifs et de s'affranchir ainsi de la présence de zones trop chaudes. On stabiliserait ainsi un régime de combustion diluée. Les effluents privés d'azote, pourraient, après conditionnement (compression, épuration) être directement transportés vers leur lieu de stockage.

**Pour l'usine pyrométallurgique de Doniambo**, il semble difficile de capter les effluents du four rotatif. Par contre, des systèmes de réchauffage fonctionnant au fioul

pourraient être transformés en chauffage à induction électriques, la récupération de chaleur des scories conduisant à une température trop faible du liquide caloporteur pour assurer la coulée du minerai. Le chauffage électrique n'a de sens que si la centrale thermique est équipée d'une unité de captage du $CO_2$ pour ne pas augmenter encore ses rejets et qu'elle valorise l'ensemble des déchets de chaleur par préchauffage des réactifs. Les options concernant le recours massif à l'électricité dans les prochaines années sont souvent évoquées afin de concentrer plutôt que de multiplier les sources d'émission de $CO_2$.

#### 2.2.4.2. Développement d'un cycle chimique sur la future centrale thermique à charbon pulvérisé de Doniambo avec zéro rejet de $CO_2$

La future centrale thermique à charbon pulvérisé de Doniambo présente, quant à elle, de bonnes opportunités pour intégrer un captage du $CO_2$.

**Configuration actuelle de la centrale en projet**

Il s'agit d'un foyer à lit fluidisé circulant. Le combustible et le comburant (air) sont introduits dans la chambre de combustion dont les parois sont constituées de matériaux réfractaires. Une gazéification du charbon se produit alors et il y a combustion entre ces produits de dégradation du charbon et l'air ambiant à une température de l'ordre de 920 °C. Les effluents chauds passeront alors dans une chaudière pour élever la température de la vapeur qui servira à faire fonctionner la turbine à vapeur. On rappellera que ce type de combustion est particulièrement bien adapté à une centrale ilienne (puissance adaptée pour un LFC, flexible au combustible utilisé – charbon, biomasse (bois, déchets verts), boues d'épuration…) peu polluante grâce à l'injection de calcaire broyé qui piège les oxydes de soufre, peu de rejets de NOx étant donné la faible température de combustion, rejets de $N_2O$ satisfaisant aux normes européennes… Malheureusement, le rendement devrait être légèrement plus faible que celui d'une chaudière à flamme CP car le cycle thermodynamique s'établit avec une température légèrement plus faible.

**Modification innovante pour la transformation du LFC en une unité de captage intégré de $CO_2$**

Rappel de la technique du cycle chimique ou *chemical looping*

La technique proposée est celle du cycle chimique ou *chemical looping* présentée précédemment et qui est particulièrement bien adapté au LFC de Doniambo. Le cycle thermochimique a pour principe d'oxyder dans le réacteur de combustion, un combustible gazéifié (charbon…) par un oxyde métallique (typiquement un oxyde de nickel). Cette oxydation du combustible s'effectuant en absence d'air, les produits de combustion sont essentiellement de l'air et de la vapeur d'eau, les effluents peuvent donc être amenés vers le lieu de stockage après séchage et conditionnement. L'oxyde de métal est donc réduit en métal (le nickel) qui est amené vers un réacteur d'oxydation où le métal s'oxyde avec l'air à haute température avant d'être à nouveau amené vers le réacteur de combustion, le cycle est ainsi bouclé.

**Innovation vers une centrale thermique à charbon à zéro émission de $CO_2$**

Le cycle chimique nécessite donc :

- un réacteur d'oxydation de type LFC ;
- un réacteur de combustion, également de type LFC mais de taille 3 à 4 fois plus petite que le premier ;

– un procédé de transport du métal et du métal oxydé pour effectuer la boucle chimique ;

– un métal (ou calcium) transporteur, les meilleurs étant le nickel, le cobalt, le fer, le cuivre, le manganèse, etc. ou les composés calciques CaS.

Un pilote industriel est déjà opérationnel à l'université de Chalmers, en Suède, sur un cycle $CaS/CaSO_4$ (pilote d'environ $1MW_{thermique}$). Ce composé calcique devrait être bientôt abandonné au profil du nickel plus efficace, mais cancérigène !

Les atouts de la future centrale de Doniambo sont donc de posséder déjà le premier LFC (le plus grand et le plus cher) qui pourrait devenir le futur réacteur d'oxydation. Il suffirait de lui adjoindre un second LFC, identique mais de plus petite taille, pour disposer du réacteur de combustion et enfin un système de transport d'un composé calcique ou d'un métal et de chaleur entre ces deux unités. Quant au transporteur d'oxygène, en N.-C., ce serait le nickel, il est déjà disponible sur le site et est de loin le plus efficace, seul son prix serait un inconvénient en cas de non recyclage.

Un premier verrou pour cette technique, encore à l'état de recherche et de validation sur pilote, est la dégradation des sites d'oxydation et de réduction sur le métal, d'où une diminution des rendements du transport d'oxygène. Ce verrou est facile à lever à Doniambo si l'on intègre dans la boucle la régénération périodique du nickel dans les fours pyrométallurgiques. Un second verrou est lié à la mise au point de la barrière d'azote entre les deux réacteurs.

Les atouts pour une transformation de la future centrale de la SLN en cycle chimique avec zéro émission de carbone sont donc très importants :

- Pas de remise en cause des choix technologiques déjà faits, mais un réaménagement, de la future centrale thermique de Doniambo en système à cycle chimique, les technologies LFC sont connues mais à adapter.
- La présence de nickel sur le site avec possibilité de sa régénération sur le site.
- Faible impact sur le rendement énergétique du procédé global.
- Diminution des rejets de $CO_2$ grâce à sa capture sans unité de séparation, le rendement de captage est élevé, de l'ordre de 97 % (Alsthom).
- Les perspectives de coût énergétique et économique de cette technologie sont les plus faibles en comparaison des autres procédés de capture (absorption, adsorption, membranes, cryogénique) à la tonne de $CO_2$ évité (Alstom).
- L'équipement complémentaire n'est ni d'une taille ni d'un coût qui le rendrait inenvisageable.
- La participation d'Eramet au développement d'une technique de captage du $CO_2$.
- L'offre d'un nouveau débouché international à l'usine pyrométallurgique ou hydrométallurgique pour la régénération de nickel pollué par des produits de combustion dans le réacteur de combustion d'une centrale fonctionnant avec un cycle chimique.

Si une action forte contre les changements climatiques est décidée dans le monde et que la N.-C. envisage effectivement de réduire ses émissions de $CO_2$ dans l'atmosphère, des actions concrètes peuvent donc être effectuées aussi bien à Prony qu'à Doniambo. Des aides

incitatives de recherche et de développement de l'Europe, de l'État et des différents gouvernements calédoniens pourraient aider aux développements de cette technique innovante jamais testée sur une unité industrielle, à sa validation en pilote, à sa viabilité économique et au rayonnement international de l'île.

### *2.2.5. Le transport du $CO_2$*

Là encore la filière complète doit être considérée entre le lieu de production du $CO_2$ et son stockage. Les seules solutions envisageables, étant donnés les volumes à transporter, sont les gazoducs (pipelines), et par voies maritimes (navires) en cas de stockage off shore ou dans un site extérieur à la Grande Terre (par exemple, dans les aquifères Australiens).

Pour son transport

- Les gazoducs : le procédé de construction des gazoducs est maintenant pleinement maîtrisé mais des spécifications techniques pour le transport du $CO_2$ doivent être prises en considération. Si le $CO_2$ est sec et purifié, de l'acier au carbone standard est suffisant, par contre de l'acier inoxydable peut être nécessaire dans des conditions spécifiques pour éviter la corrosion. La pression de fonctionnement pour le transport sera de 100 à 150 bars, ce qui permet d'utiliser les technologies employées pour le gaz naturel (90 à 100 bars). Un contrôle terrestre ou aérien et des mesures de pression, température, permet de surveiller le gazoduc. Le $CO_2$ est alors acheminé soit en phase dense sous pression (supercritique-pression supérieure à 74 bars), les épaisseurs doivent alors être importantes avec des stations de recompression, soit à l'état liquide (température et pression adaptées par exemple de 10 bars et -40 °C) ce qui impose des isolations thermiques et de re-compressions intermédiaires. Ces technologies sont déjà utilisées industriellement pour le transport sur de longues distances de $CO_2$ en Amérique du Nord et en Norvège. Les techniques de construction des gazoducs sont opérationnelles.
- Voie maritime : le $CO_2$ est généralement transporté à l'état liquide à pression modérée et à basse température (-50 °C et 7 bars) en employant la technologie des méthaniers. Les CO2niers seront calqués sur les LNGniers existants qui ont actuellement des capacités de 20 000 $m^3$. Le transfert de chaleur avec l'environnement au travers des parois du réservoir favorisera l'évaporation du $CO_2$ et augmentera la pression, d'où la nécessité de le refroidir en permanence. Des recompressions peuvent être nécessaire pour l'acheminement du $CO_2$ vers le lieu de stockage géologique.

Des contraintes sont inhérentes à ce transport

- La corrosion des métaux par le $CO_2$ qui devient très importante en présence d'eau, ce qui exige que les produits de combustion soient parfaitement déshydratés.
- La compression et le refroidissement.
- La toxicité du $CO_2$ lors d'une fuite dès que la concentration deviendra supérieure à 5 % dans l'air.
- La faible teneur tolérée en impuretés (NOx, SOx, H2S, particules, eau, oxygène, trace de solvants, etc.). Il faudra vérifier l'adaptabilité de ce captage à des centrales dont les émissions ne sont ni dénitrifiées ni désulfurées.

Pour l'évaluation du coût du transport, les données suivantes sont citées dans la littérature

- ZEP – European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants - Zero Emission Platform : CO2 capture and storage matrix of technologies, 28 July 2008 (V5), http://www.zero-emissionplatform.eu

- Le coût du transport par pipeline, selon le terrain pourrait être compris entre 0,5 et 10 €/100 km/t$CO_2$.
- Par bateau, le coût est plus réduit sur des longues distances, mais des stockages intermédiaires sont nécessaires.

**Conclusions du transport du $CO_2$**

Dans l'hypothèse d'une capture du $CO_2$ produit par les centrales thermiques de N.-C. et compte tenue des faibles tonnages annuels émis, il devra être envisagé de regrouper les émissions et de centraliser en un point du territoire. De là, un gazoduc conduira vers les lieux de stockage vers les sites de péridotites ou/et vers un terminal gazier pour un transport vers un site de stockage hors de l'île.

Les technologies de conditionnement et de transport terrestre ou maritime existent mais seront immanquablement assez onéreuses à mettre en place. De plus, l'effet d'échelle n'est pas bénéfique pour ces petites unités d'émission de $CO_2$.

La CCS ne pourra être opérationnelle en N.-C. sans un engagement mondial pour une réduction massive des émissions des GES, en particulier le $CO_2$, qui met à un prix élevé la tonne de $CO_2$ évitée.

### *2.2.6. La bioconversion du $CO_2$ par les algues*

Signalons également la possibilité de valorisation des émissions de $CO_2$ des centrales *via* la bioconversion par les algues. Cela réduit les coûts de captage du $CO_2$ et supprime les besoins directs de stockage géologique du $CO_2$ émis par les centrales. Pour optimiser le rendement de la photosynthèse, les algues des bassins ou des bioréacteurs ont besoin d'un rayonnement solaire adéquat et de $CO_2$ en grande quantité. Or les rejets gazeux des centrales thermiques classiques productrices d'électricité (centrales au charbon, par exemple) ont une teneur moyenne en $CO_2$ de 13 % contre moins de 0,4 ‰ dans l'atmosphère. Ce $CO_2$ est mis à barboter dans les bassins ou réacteurs, puis assimilé par les algues. Les algues peuvent ainsi produire plus de biomasse par unité de surface au sol. Cela permet de traiter en même temps des eaux usées. Les biomasses ou molécules ainsi produites par les algues peuvent ensuite être utilisées pour réduire les consommations d'énergie fossile, donc indirectement les émissions nettes de $CO_2$. Mais cela ne permet pas de réduire directement les émissions de $CO_2$. Il ne s'agit donc pas ici d'une voie d'élimination du $CO_2$ comparable stockage géologique du $CO_2$, mais d'une voie de bioconversion de l'énergie solaire analogue à celle des plantes terrestres cultivées puis récoltées. Le métabolisme des algues peut aussi être orienté pour optimiser la fabrication de molécules éventuellement utilisables directement comme biocarburant. S'il n'y avait que du gaz carbonique pur à la sortie des centrales, les mêmes réacteurs pourraient être utilisés pour fabriquer des molécules à haute valeur ajoutée ou des aliments. On explore ces voies depuis le deuxième choc pétrolier. Les triglycérides que les algues peuvent produire peuvent théoriquement être transformées en huiles végétales brutes ou en biodiesel. Le rendement de bioconversion par hectare est toutefois plus élevé que pour les végétaux supérieurs de plein champ, mais suppose des investissements également plus élevés. Ces filières n'ont jusqu'ici encore jamais pu être mises en œuvre industriellement pour la production d'énergie, faute d'avoir pu devenir économiquement compétitives avec les productions classiques de biomasses végétales. L'intérêt renouvelé pour ces filières orientées vers la production de biocarburants est cependant réapparu récemment dans plusieurs pays industrialisés. Un nouveau bioréacteur permettant également de piéger une partie des émissions de NOx dans les algues a été mis au point (cf. le paragraphe consacré à « la valorisation énergétique des algues » dans « Les nouvelles technologies en matière de production et de stockage d'énergie »). Divers types d'algues sont sélectionnées pour leur

aptitude à capter le $CO_2$ et en même temps pour leur résistance aux poisons que peuvent contenir les effluents de combustion des centrales. Des améliorations techniques devront cependant encore être apportées pour se rapprocher des limites de rendements de la photosynthèse et améliorer la conversion de ses produits. S'il faut recourir à la transgénèse pour accroître les rendements, le risque éventuel de diffusion de ces organismes dans l'environnement devra également être pris en considération. Les diverses étapes de la mise au point de cette technologie en sont encore aux premiers stades de la recherche fondamentale. Avant de pouvoir être diffusée, cette filière devra encore bien progresser. Un prix élevé de la tonne de $CO_2$ non émise pourrait cependant aider à la rendre plus rapidement compétitive.

Ce concept de bioconversion du $CO_2$ est en cours d'évaluation sur des sites pilotes ou industriels dans de nombreux pays. Entre autres, des photo-bio-réacteurs (PBR) de GreenFuel Corporation (http://www.greenfuelonline.com/news/Biofutur.pdf) sont couplés à la centrale de cogénération de 20 MW du MIT (Boston), des tests équivalents sont effectués par le groupe RWE en Allemagne ! Plusieurs types et techniques de PBR sont étudiées afin d'optimiser à la fois la capture du $CO_2$ (type d'algues, risques de contamination, réacteurs ouverts (bassins) ou fermés (tuyaux), volume, rapport surface/volume, évaporation, contrôle du procédé, éclairement, concentration en biomasse…). Les algues formant un écran absorbant à la lumière, cette dernière est bloquée en surface, il faut alors avoir recours à des rapports surface/volume du PBR élevés, de l'ordre de 350. Un second défi consistera à accroître le rendement thermodynamique de la conversion lumière/algues. Le tableau ci-dessous compare les potentiels d'absorption du $CO_2$ par les végétaux supérieurs et les algues dans un PBR. Les surfaces d'échange lumière solaire/algues restent encore considérables, mais bien inférieures à ce qu'exigent les végétaux supérieurs pour capter la même quantité de $CO_2$.

**Tableau 4 – Surfaces et volumes nécessaires pour la séquestration d'une tonne de $CO_2$ par jour (PBR= photo-bio-réacteurs)**

| Type de Système | Flux incident $q_o$ (W/m²) | Volume V (m³) | Surface captation S (ha) | Biomasse maximale atteinte (kg/m³) |
|---|---|---|---|---|
| **Végétaux supérieurs** - Plein champ (moyenne Europe) | 100 | Non significatif | 37 | Non significatif |
| **PBR actuels extensifs et solaires** (données de la littérature) | 100 | 2500 | 2,5 | 0,1 à 0,5 |
| **PBR intensifié en couche mince** | 100<br>400 (après concentration) | 250<br>140 | 2,5<br>5 pour le captage, concentré sur 1,3 de culture | 2<br>5 |
| **PBR avec distribution interne de la lumière** (limite thermodynamique, réacteur idéal) | Captation à 400 et utilisation à 4 | 80 | 0,2 | 15 |

**Ce tableau exprime la masse de matière organique journalière théorique pouvant être obtenue en fonction du flux de lumière incident et des caractéristiques du PBR. Les valeurs montrent la nécessité d'un échange optimal entre le flux de lumière et la solution d'algues, l'absorption de lumière limitant la croissance des microorganismes.**

## Bibliographie

Le bulletin « Greenhouse Issues » de l'Agence internationale de l'énergie (IEA Greenhouse Gas R&D Programm) publie chaque année plusieurs numéros d'un bulletin, de 20 à 30 pages, qui permet de s'informer régulièrement de l'avancée des connaissances techniques, économiques et juridiques relatifs au captage et au stockage géologique du $CO_2$, http://www.ieagreen.org.uk

BAUKAL C.E. Jr, 1998 – Oxygen-enhanced combustion, CRC Press LLC.

BAUKAL C.E., 2000 – Heat Transfer in Industrial Combustion CRC Press LLC.

FERON P.H.M., HENDRIKS C.A., 2005 – CO2 Capture Process Principles and cost, Oil & Gas Science and Technology, Rev. IFP, Vol 60 n° 3, pp 451-459.

GIEC, 2005 – *Piégeage et stockage du dioxide de carbone, Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique*, Rapport spécial du Giec, B. Metz, 2005, ISBN 92-9169-219-0, 52 p. Carbon capture and storage (Rapport complet seulement en anglais).

GOEL M., Kumar B. *et al*. éditeurs, 2008 – *Carbon Capture and Storage. R& D Technologies for Sustainable Energy Future*, Narosa Publishers, 242 p.

LAHAYE G. – Prado Nato Fundamentals of the physical-chemistry of pulverized coal combustion, J ASI Series, Series E: Applied Sciences, n° 137.

TONDEUR D., 2004 – *Capture par adsorption de $CO_2$ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole*, Rapport final de Programme Énergie du CNRS.

VGB – $CO_2$ Capture and storage, Report on the State of the Art, Published by VGB Power Tech e.V., http://www.vgb.org

ZEP, 2008 – European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, Zero Emission Platform : $CO_2$ capture and storage matrix of technologies, 28 july 2008 (V5), http://www.zero-emissionplatform.eu

Différentes études ont été engagées ou sont prévues, notamment dans le cadre des projets européens du 6e PCRD (projet Encap, propositions Cachet et Dynamis consultables sur le site http://www.encapco2.org

## 3. Comment la Nouvelle-Calédonie pourrait-elle tirer parti de son contexte géologique en matière de recherche et d'expérimentation sur les technologies de stockage de $CO_2$ ?

### 3.1. Les trois formes de stockage géologique du $CO_2$

Le stockage non biologique du $CO_2$ peut être envisagé sous trois formes : dans les océans, dans les roches par carbonatation et dans les formations géologiques de la croûte terrestre. Nous mentionnerons, dans le texte qui suit, les atouts de la N.-C. pour ces diverses formes de stockage.

**L'immersion de $CO_2$ (liquide) dans l'océan profond –** Elle soulève des difficultés quant à son efficacité, son coût et son impact sur l'environnement. Les techniques en sont encore au stade de la recherche, et il n'y a pas encore eu vraiment de démonstration (projet

pilote). Les effets que pourrait avoir l'injection de $CO_2$ sur les écosystèmes, à des échelles de temps importantes, ne sont pas connus. Il est donc difficile d'envisager cette option de stockage dans ou près d'une zone où les récifs coralliens et les écosystèmes associés sont inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco. De plus, le Giec (2005) signale une « *forte opposition* » du public envers de telles expérimentations dans l'océan Pacifique.

**Le stockage par séquestration minérale ex situ (carbonatation minérale à partir de déchets)** – Ce procédé, qui consiste à fixer industriellement le $CO_2$ dans des carbonates inorganiques, en est au stade de la démonstration (site pilote) : il demande beaucoup d'énergie et la construction d'usines de carbonatation. Il pose aussi des problèmes environnementaux, car il faut en stocker les déchets (*2,6 à 4,7 t de carbonates par tonne de* $CO_2$ ; source Giec (2005).

**Le stockage dans les formations géologiques** – Cette option propose des pistes plus prometteuses sur le plan environnemental et industriel. Le Giec souligne que « *Le potentiel du stockage géologique est à l'échelle du défi planétaire puisqu'il est à comparer avec les émissions totales de* $CO_2$ *estimées entre 2000 et 2050 qui sont de l'ordre de 2 000 Gt* » (scénario *Business as usual*/Projection IS92a du Giec). On considère que le stockage géologique du $CO_2$ pourrait se développer à une échelle industrielle d'ici 10 à 15 ans. Il est la solution de stockage la plus retenue par la plupart des pays industrialisés. L'Australie, pays voisin de la N.-C., fait partie des cinq pôles importants qui développent des recherches sur le stockage géologique.

Nous allons montrer dans ce rapport pourquoi le contexte géologique de la N.-C. est particulièrement favorable à la séquestration de $CO_2$, et quelles pistes peuvent être proposées. Les projets recommandés sont des projets à moyen ou long terme, nécessitant des recherches qui auront une portée internationale et permettront de faire avancer les études sur les technologies innovantes réalisées un peu partout dans le monde.

## 3.2. Bref aperçu du contexte géologique de la Nouvelle-Calédonie

L'archipel de la N.-C. se situe dans la zone de transition entre le domaine continental australien et le domaine océanique de la plaque Pacifique. L'île de la N.-C. (Grande Terre) correspond pro parte à la partie émergée et septentrionale de la ride de Norfolk (figure 23) qui n'est autre qu'un lambeau de la marge orientale du supercontinent Gondwana s'étant séparé de l'Australie il y a environ 100 millions d'années. Plus au nord, la Ride des Loyauté est constituée d'anciens édifices volcaniques ennoyés et recouverts par d'importants dépôts carbonatés récifaux. Ces deux unités insulaires sont jalonnées de bassins sédimentaires ayant un potentiel économique en cours d'évaluation.

### *3.2.1. Une chaîne de montagne, la présence de massifs de péridotites et de basaltes*

L'histoire géologique de la N.-C., quoique complexe, est relativement bien connue (Aitchison *et al*., 1995 ; Avias, 1967 ; Chardon *et al*., 2006 ; Cluzel *et al*., 2001 ; Collot *et al*., 2008 ; Dubois *et al*., 1974 ; Maurizot et Lafoy, 2003 ; Paris, 1981). La Grande Terre résulte de l'émersion d'un prisme orogénique (chaîne de montagne) qui s'est formé entre 36 et probablement 28 millions d'années, en se propageant vers l'ouest dans un contexte géodynamique de subduction-obduction. Cette obduction s'est manifestée de façon spectaculaire par le chevauchement vers le sud-ouest de la lithosphère océanique du bassin des Loyauté sur la Grande Terre. Les témoins de ce chevauchement correspondent aux restes d'une nappe de péridotites qui s'enracine sous le bassin des Loyauté, et que l'on retrouve donc sous une faible épaisseur de sédiments le long de la côte est. Cette nappe de péridotites recouvre encore aujourd'hui une partie de l'île de la N.-C., et en fait sa richesse et son

originalité. Les péridotites constituent aujourd'hui d'importants massifs qui représentent un tiers de la Grande Terre (5 500 km²), et sont répartis dans le sud et sur la côte ouest (figure 24). Le massif du sud (figure 25) est le plus grand massif du monde après celui d'Oman ; il pourrait atteindre par endroit 3 000 m d'épaisseur.

Cette abondance exceptionnelle de roches ultrabasiques est non seulement à l'origine de réserves considérables de nickel (20 % des ressources mondiales) et de cobalt, mais peut aussi contribuer – nous le verrons ultérieurement – au stockage géologique de $CO_2$.

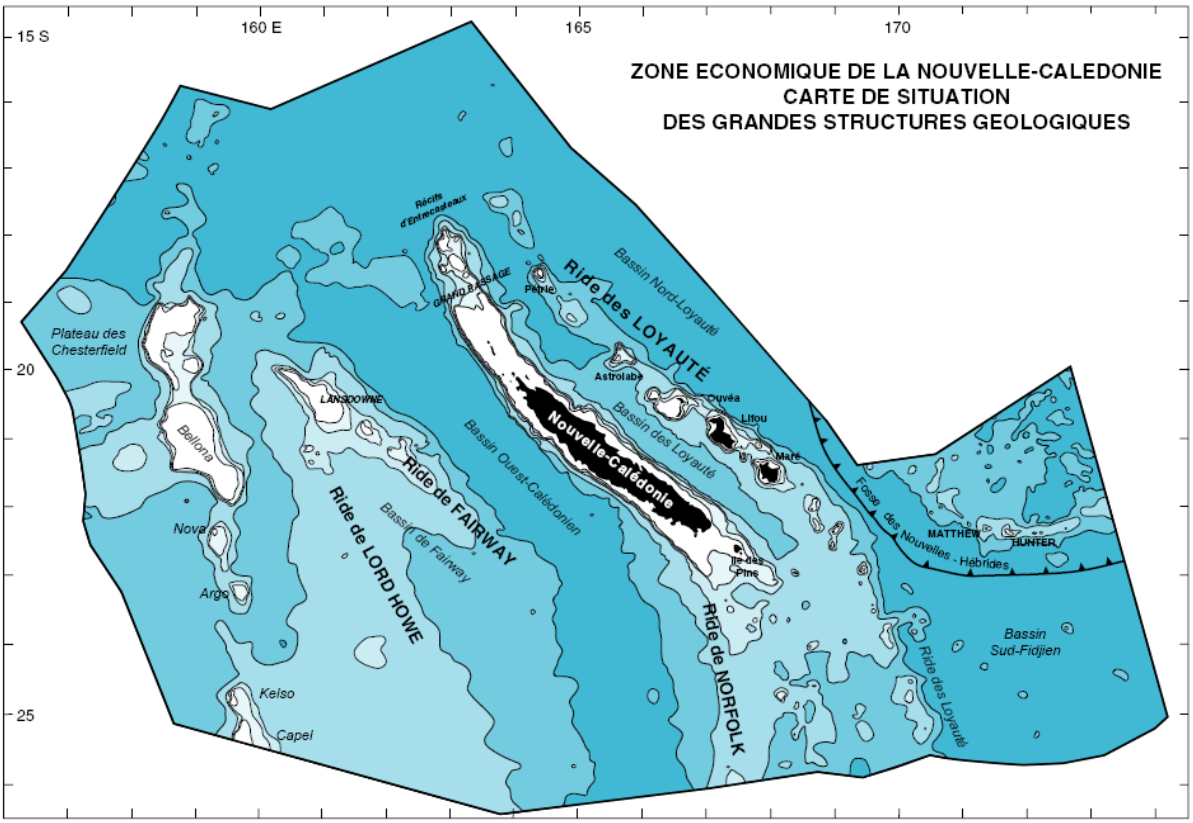
Sur la côte ouest, la nappe des péridotites chevauche l'unité géologique de Poya qui correspond à un empilement d'écailles chevauchantes de croûte océanique et est constituée à 95 % par des basaltes (cette unité est appelée aussi nappe des basaltes, figure 26). Ces basaltes ont une extension importante et affleurent sur la moitié nord de la côte ouest (figure 24). Nous verrons qu'ils peuvent constituer, au même titre que les péridotites, des roches d'importance capitale pour le stockage de $CO_2$.

### *3.2.2. Des bassins sédimentaires importants et peu connus*

Sur la bordure ouest, et à l'ouest de la Grande Terre, les bassins sédimentaires associés à l'orogénèse néo-calédonien, et bien que reconnus pour leur potentiel pétrolier (cf. « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie » et figure 26), restent sous-explorés. Ainsi en *deep* off shore, le bassin de N.-C. est considéré comme un bassin frontière pour l'exploration pétrolière du XXIe siècle (Vially *et al*., 2003), et la bordure occidentale du bassin de Farway (Ride de Lord Howe) a été présentée récemment comme une cible pétrolière à moyen/court terme (Schéma Minier, gouvernement de la N.-C., 2009).

Ces bassins sédimentaires sur la côte ouest de la N.-C., ou à proximité, représentent un important potentiel pour le piégeage de $CO_2$ puisqu'ils sont susceptibles de renfermer de futurs gisements pétroliers et des aquifères salins.

**Figure 23 – Les unités morphostructurales de la ZEE de Nouvelle-Calédonie (d'après Lafoy *et al.*, 1996)**




**On voit que la Grande Terre est entourée d'importants bassins sédimentaires qui constituent des zones favorables pour le piégeage de $CO_2$.**

**Figure 14 – Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie (d'après Pierre Maurizot, BRGM-Dimenc, 2001). Les massifs de péridotites représentent un tiers de la surface de la Grande Terre et sont situés à proximité des centres d'émission de $CO_2$. L'unité de Poya qui jalonne une grande partie de la côte ouest comprend essentiellement des basaltes (95 %), propices eux aussi au stockage de $CO_2$.**

## 3 - Les émissions et les réductions d'émissions de GES en Nouvelle-Calédonie

P. BABY, P. COUTERON, J.-M. MOST, A. RIEDACKER

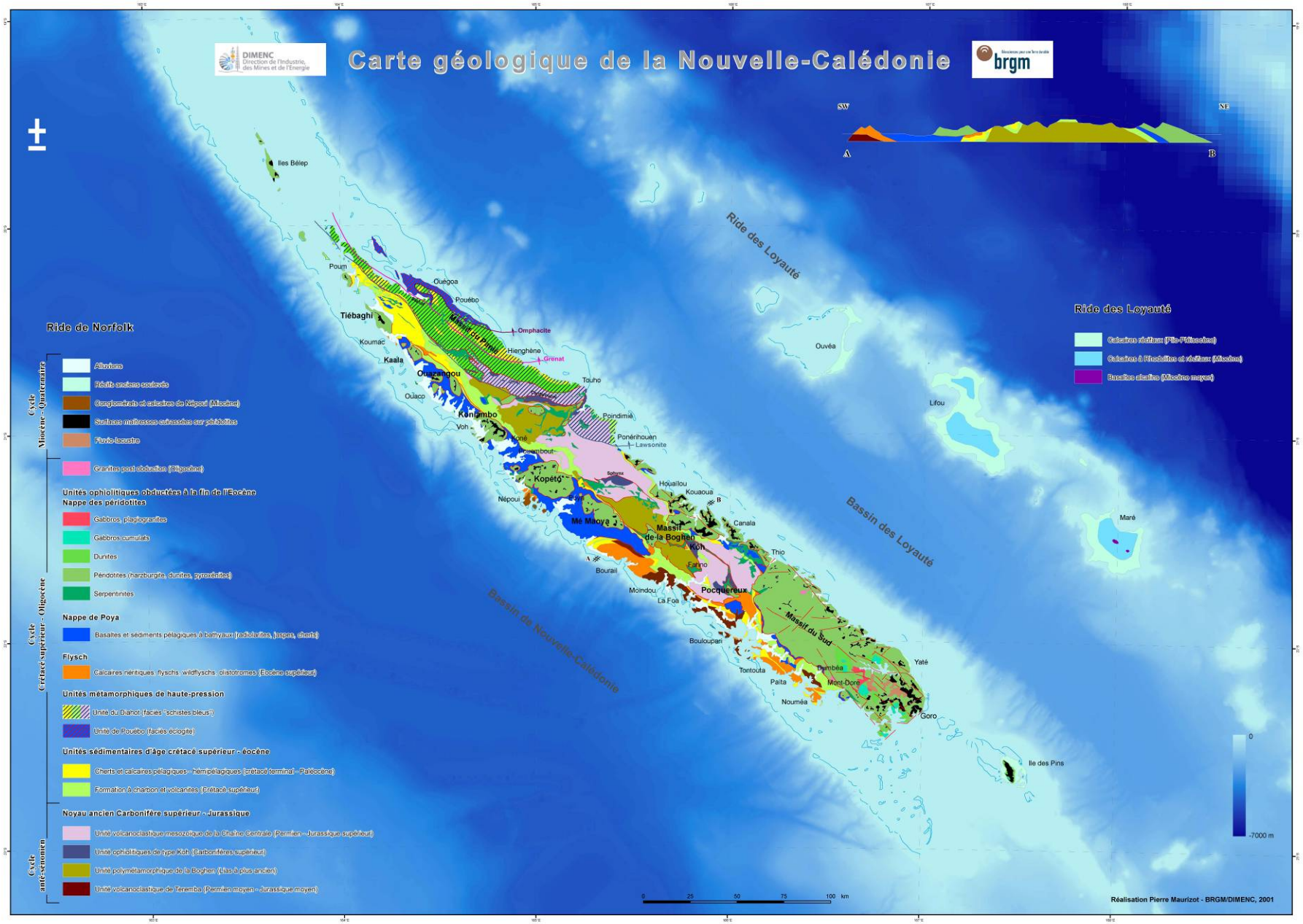
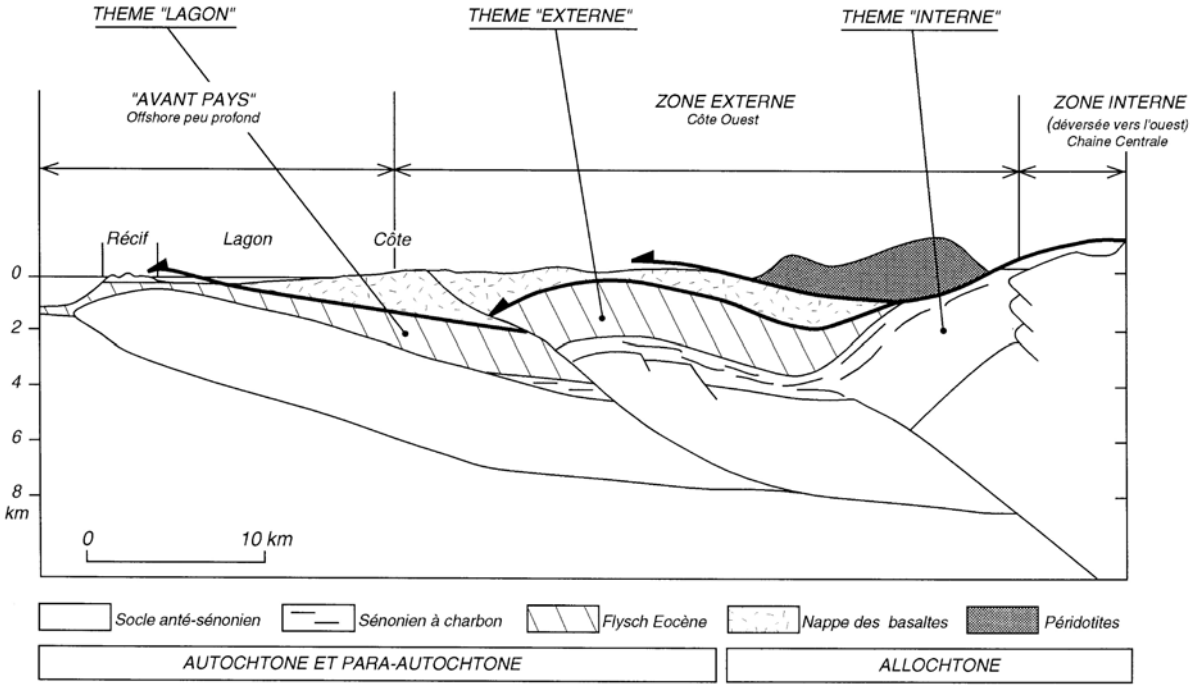


**Figure 25 – Aperçu de l'extrémité nord du massif de péridotites du Sud de l'île (exploitation minière de Thio). Ce massif est le deuxième plus grand massif de péridotites au monde après celui d'Oman. Il se poursuit en mer sous le bassin des Loyauté. (Photo P. Baby).**

**Figure 26 – Style structural et thèmes d'exploration pétrolière sur la côte ouest de Nouvelle-Calédonie**

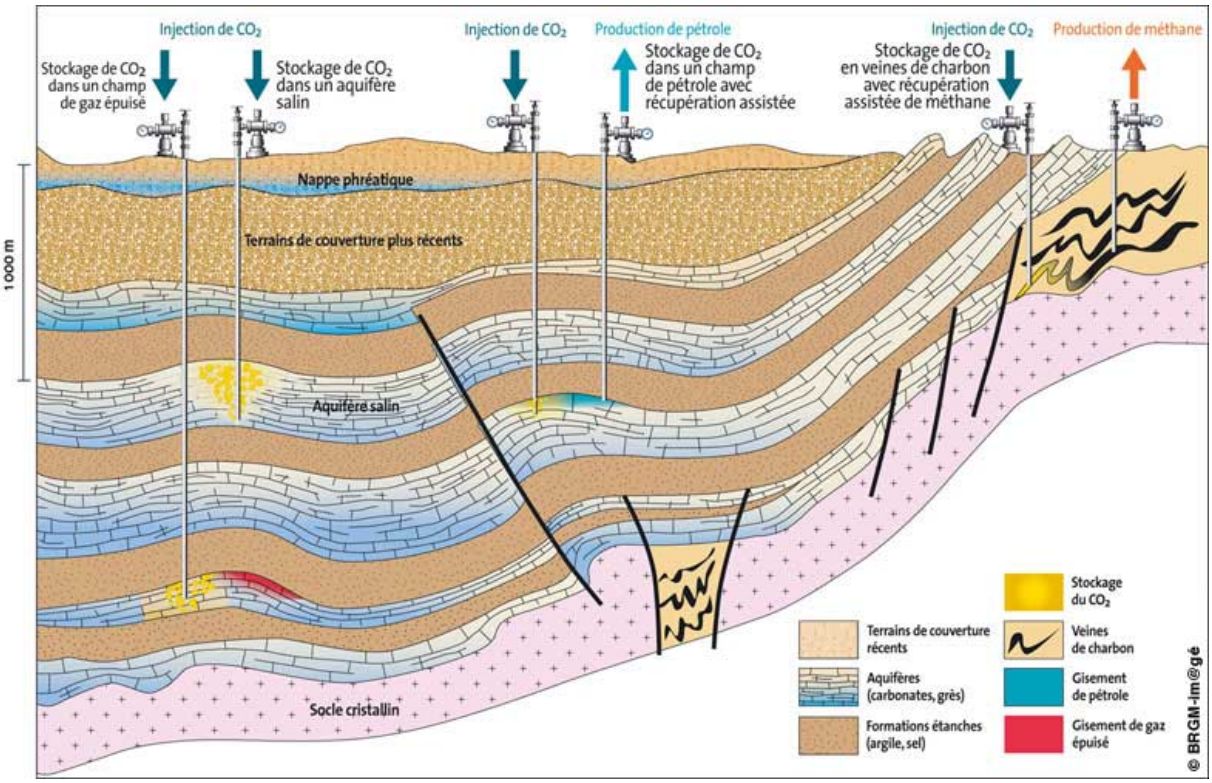



**Source : d'après Lafoy *et al.*, 1996 ; modifié de Vially et Mascle, 1994.**

## 3.3. Le stockage de $CO_2$ dans les formations géologiques : état de l'art

La figure 27 illustre les solutions de stockage géologique de $CO_2$ les plus conventionnelles, que l'on trouve dans les **bassins sédimentaires** et qui en sont déjà au stade commercial dans certaines conditions. Parmi ces solutions, on peut d'emblée éliminer en N.-C. la récupération assistée de méthane dans une couche de houille (RAMCH), en effet les gisements de charbon n'y sont pas assez importants pour appliquer ce procédé.

**Figure 27 – Solutions de stockage géologique de $CO_2$ les plus conventionnelles**




**Source : document BRGM.**

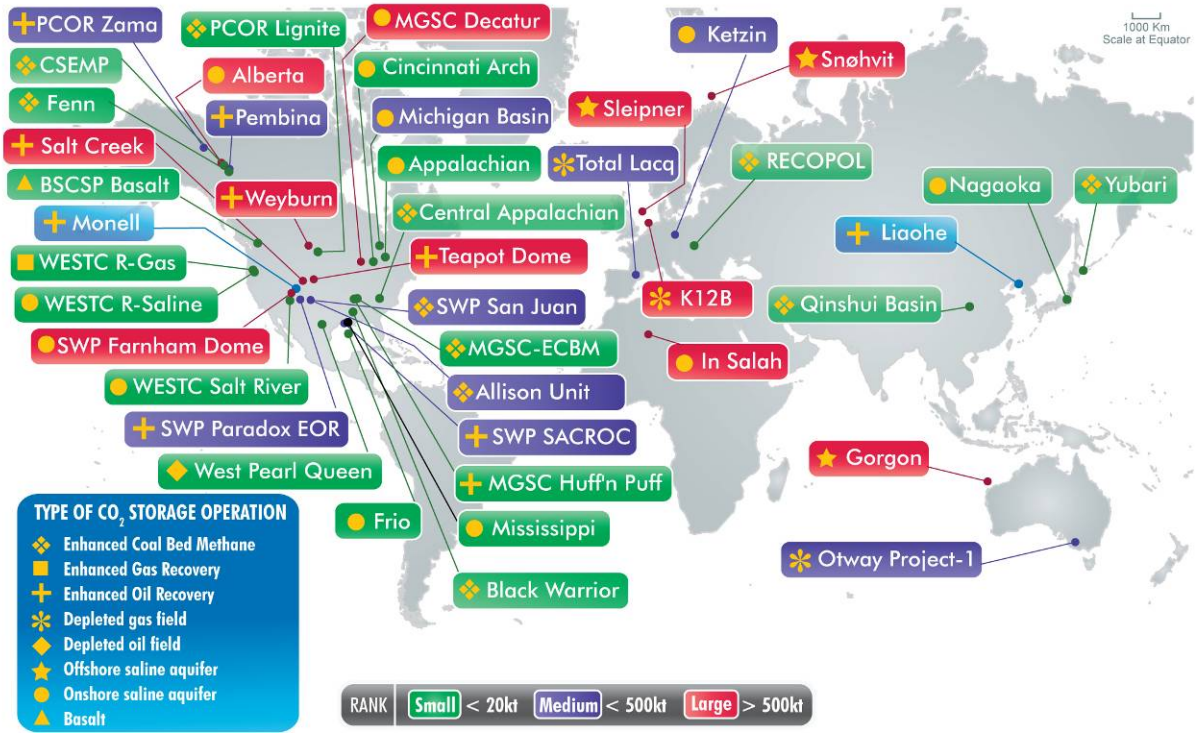
On peut par contre ajouter aux options de stockage géologique envisageable en N.-C. **la séquestration minérale *in situ*** dans des roches basiques (basaltes) ou ultrabasiques (péridotites). Cette option, moins conventionnelle, en est au stade de la recherche et de la démonstration (deux sites pilotes au monde), et pourrait trouver en N.-C. un excellent terrain d'expérimentation, dont les résultats pourraient alimenter les réseaux de recherche internationaux.

### *3.3.1. Séquestration géologique dans les bassins sédimentaires*

Les bassins sédimentaires représentent de nos jours le potentiel de stockage le plus important à l'échelle planétaire. Ils sont répartis un peu partout dans le monde autour des centres d'émission de $CO_2$. Des projets commerciaux ou de démonstration ont été mis en route ces dernières années par l'industrie pétrolière en partenariat avec des réseaux de recherche nationaux et internationaux. La répartition de ces projets à travers le monde (figure 28) est assez hétérogène, ils se situent souvent près d'installations pétrolières déjà existantes.

Une grande partie des données présentées ici provient du Giec, du Club $CO_2$ français, de l'AIE, du CO2CRC australien, et des informations rendues accessibles (sites web) par les grandes compagnies pétrolières.

**Figure 28 – Localisation des projets commerciaux ou de démonstration de stockage géologique de $CO_2$ à travers le monde (© CO2CRC 2008)**




### *3.3.2. Gisements d'hydrocarbures*

#### a. Recherches en cours

Les réservoirs de pétrole et de gaz (roches poreuses) ont prouvé leur étanchéité pendant plusieurs millions d'années, ils sont donc susceptibles de pouvoir être utilisés pour le stockage de $CO_2$. On connait d'ailleurs des gisements naturels de $CO_2$ découverts lors de forages d'exploration pétrolière et exploités industriellement (gisement de Montmirail dans la Drôme). Les gisements d'hydrocarbures constituent pour le moment l'option de stockage géologique la plus facile à mettre en œuvre et la plus économique.

**Le stockage de $CO_2$ dans un champ de pétrole avec récupération assistée**

La technologie d'injection du $CO_2$ est déjà connue par l'industrie pétrolière qui pratique la récupération assistée de pétrole (RAP) depuis le début des années 1970. Le $CO_2$ est injecté dans les gisements en cours d'exploitation pour réduire la viscosité du pétrole. À la fin du cycle de récupération, le gaz peut être emprisonné au lieu d'être libéré dans l'atmosphère. Parmi les sites de stockage en cours d'activité (figure 28), on peut citer un des plus importants, le projet commercial Weyburn au Canada, projet international lancé en 2000 sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie, où 3 000 à 5 000 t de $CO_2$ sont injectées chaque jour. Ce projet, auquel participent aussi l'Union européenne et Total, doit durer 15 ans et permettre de stocker définitivement plus de 20 Mt de $CO_2$ tout en récupérant 130 millions de barils de pétrole.

**Le stockage de $CO_2$ dans les anciens champs de gaz épuisés ou déplétés**

Les anciens gisements de pétrole ou de gaz épuisés ou en phase de déclin (déplétés) constituent aussi des sites de stockage économiquement très intéressants (existence des équipements, milieu géologique bien connu). Plusieurs projets pilotes sont en cours

d'expérimentation au niveau mondial pour essayer de démontrer la fiabilité et la pérennité de ce type de stockage géologique à long terme. En France, le premier projet pilote vient de démarrer dans l'ancien gisement de gaz de Lacq (Pyrénées), où le $CO_2$ sera injecté pendant deux ans dans un réservoir déplété (150 000 t de $CO_2$ seront injectés pendant deux ans). Ce projet est piloté par Total, qui s'est entouré de la communauté scientifique française (IFP, BRGM, Cregu, CNRS, Université). Dans le même ordre de grandeur, l'Australie a démarré en 2008 le projet pilote de Otway (CO2CRC Otway Project) considéré alors comme l'un des plus démonstratifs au monde par l'AIE pour la qualité du *monitoring* mis en place (100 000 t de $CO_2$ seront injectés pendant deux ans). Les gisements d'hydrocarbures épuisés ou déplétés, très intéressants du point de vue économique, ne sont pas répartis sur toute la planète à proximité des sources de $CO_2$. Leurs capacités de stockage seraient de 920 Gt de $CO_2$ selon l'Agence internationale de l'énergie.

Les recherches en cours, financées par les compagnies pétrolières et le domaine public, mettent l'accent sur les outils et techniques de surveillance de l'étanchéité des sites de stockage (fuites dans les forages, étanchéité de la couverture). Les interrogations portent sur les durées de stockages et la quantité de fuites qui seraient acceptables. On estime actuellement que les fuites ne doivent pas dépasser 1 % du $CO_2$ total stocké pendant 1 000 ans.

#### b. Avantages de la Nouvelle-Calédonie

Les bassins sédimentaires on shore et off shore de N.-C. présentent un potentiel pétrolier considérable et des activités d'exploration sont prévues à moyen/court terme (cf. « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie »). Si des gisements d'hydrocarbures sont découverts, des stockages géologiques de $CO_2$ pourraient être envisagés à moindre coût : RAP dans un premier temps, puis gisements déplétés. La localisation géographique de ces gisements conditionnera les coûts. La découverte de gisements d'hydrocarbures sur la côte ouest de la N.-C., près des centres d'émission de $CO_2$, n'est pas exclue. On connait déjà l'anticlinal de Gouaro, où il a été détecté une petite accumulation de gaz dans des réservoirs de faible qualité (cf. « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie »). Cette structure se trouve entre le futur site d'émission de $CO_2$ de Koniambo et le site de la SLN de Nouméa, elle mérite sans aucun doute qu'on s'y intéresse d'assez près. D'autres structures comparables doivent exister sur la côte ouest, mais ne pourront être mises en évidence que par de nouvelles campagnes d'exploration. Dans le cas de gisements plus lointains, qui restent à découvrir dans les bassins sédimentaires off shore (bassin de la N.-C. ou bassin de Farway), il faudra envisager des moyens de transport de $CO_2$ sous forme liquide par voie maritime, ce qui est aussi réalisable, mais à des coûts plus élevés. Une distance de 300 km entre le site d'émission et le site de stockage reste raisonnable d'après le Giec.

### *3.3.3. Aquifères salins*

#### a. Recherches en cours

Les aquifères salins profonds se rencontrent dans les bassins sédimentaires en mer et en terre ferme au même titre que les gisements pétroliers, mais ils sont beaucoup plus nombreux, et à des profondeurs moins importantes. Le $CO_2$ injecté dans le réservoir reste séquestré par piégeage hydrodynamique (sous la couverture sédimentaire du piège structural ou stratigraphique), par solubilité dans les fluides en place, et par minéralisation. Les aquifères doivent se situer à plus de 1 000 m de profondeur, afin de permettre le stockage de $CO_2$ à l'état supercritique. Les programmes de recherche sont moins avancés que ceux qui concernent les gisements d'hydrocarbures. Plusieurs projets de démonstration sont en cours (figure 28) pour mieux connaître ces aquifères. Une première expérience commerciale à

grande échelle de stockage a été lancée en mer du Nord en 1996 (projet européen Sleipner) par le pétrolier norvégien *Statoil*, où 1 Mt de $CO_2$ sont injectées chaque année. Le second projet commercial le plus connu est celui de In-Salah en Algérie (BP, Sonatrach, Statoil), initié en 2004, où le $CO_2$ provenant de l'exploitation du gaz naturel est réinjecté (1,2 Mt/an) dans l'aquifère du champ de gaz en production, ce qui en fait l'unique projet de ce type au monde. En France, c'est le bassin sédimentaire de Paris qui a été retenu pour réaliser une première évaluation du potentiel de stockage du $CO_2$ en aquifère (68 % des émissions de $CO_2$ produites par les industries en France sont situées autour du bassin de Paris ; sources Club $CO_2$, 2006) avant de lancer un projet de démonstration.

Comme pour les gisements d'hydrocarbures, les recherches sur les aquifères salins portent surtout sur le comportement à long terme du stockage, mais les incertitudes sur l'étanchéité sont plus importantes. Les aquifères profonds correspondent aux capacités mondiales de stockage de $CO_2$ les plus importantes (estimées entre 400 et 10 000 Gt d'après l'AIE.

#### b. Avantages de la Nouvelle-Calédonie

La présence de bassins sédimentaires sur la côte ouest de la N.-C. est incontestablement un avantage. Ces bassins se trouvent relativement près des centres d'émission de $CO_2$ ; ils contiennent forcément des aquifères salins, mais restent sous-explorés. Le contexte géologique est relativement bien connu, mais il faudra attendre de nouvelles campagnes d'exploration pétrolière pour avoir une bonne évaluation du potentiel de stockage.

### *3.3.4. Séquestration minérale in situ dans les roches basiques et ultrabasiques*

L'idée de transformer le $CO_2$ par minéralisation s'appuie sur l'observation du processus de formation des roches carbonatées dans la nature, qui se déroule sur des échelles de temps géologiques. À la suite d'interactions entre fluides aqueux et fragments de roches silicatées, le calcium et le magnésium dissous dans un premier temps précipitent ensuite en présence de gaz carbonique sous forme de carbonates (calcite, CaCO3) et magnésite (MgCO3). On sait reproduire artificiellement ces réactions naturelles, ce qui a conduit aux différentes pistes de recherche de séquestration minéralogique de $CO_2$.

La séquestration minéralogique *in situ* consiste donc à injecter du $CO_2$ dans des roches basiques (basaltes) ou ultrabasiques (péridotites), de manière à ce qu'il reste piégé naturellement sous forme minérale par carbonatation (transformation des roches en carbonates). D'importantes études expérimentales sont en cours pour quantifier les vitesses de minéralisation et l'efficacité du procédé. Les recherches portent aussi sur le potentiel de micro-organismes vivant à grande profondeur et pouvant améliorer la minéralisation (biominéralisation). S'il fonctionne, ce procédé aura l'avantage d'être un des plus économiques, et la séquestration du $CO_2$ restera stable sur des millions d'années. On s'affranchit, avec cette option de stockage, des risques de fuites qui constituent le problème majeur de la séquestration gazeuse dans les gisements pétroliers ou les aquifères salins.

#### a. Dans les basaltes

*Recherches en cours*

Les premières études sur la séquestration minérale *in situ* se sont intéressées aux roches basiques, et en particulier aux basaltes, qui sont les roches les plus réactives pour la séquestration minéralogique de $CO_2$. On sait que les roches basaltiques affleurant sur la planète consomment à elles seules par processus d'altération 30 % du $CO_2$ atmosphérique,

bien qu'elles ne représentent que 5 % des surfaces continentales (Dessert *et al*., 2003). Il existe actuellement deux sites pilotes au monde où le $CO_2$ est injecté dans des basaltes contenant des aquifères. Le premier, le BSCSP Project (http://www.bigskyco2.org/)se situe aux États-Unis (État de Washington) ; il a démarré en 2008, mais rencontre actuellement des problèmes opérationnels. Le deuxième est situé en Islande, pays constitué à 90 % par des basaltes, et comparable par son nombre d'habitants à la N.-C. Ce deuxième projet de démonstration (Hellisheidi $CO_2$ injection pilot study) est financé par la compagnie Reykjavik Energy qui en fait bénéficier un consortium de recherche constitué de laboratoires islandais, nord-américains et français (LMTG, Toulouse, http://www.lmtg.obs-mip.fr/co2/hellisheidi.htm). Le $CO_2$ provenant d'une centrale géothermique (sous forme gazeuse dans les vapeurs) appartenant à Reykjavik Energy est réinjecté (forme dissoute dans le l'eau froide) dans les basaltes (aquifères) à une profondeur de 400 à 800 m en réutilisant des forages d'exploration (Matter *et al*., 2008). Il est prévu d'injecter 32 000 t de $CO_2$ par an dans ce laboratoire naturel, à partir d'aout 2009. Cette technologie, si elle s'avère effective, pourra être exportée dans d'autres régions basaltiques du monde.

#### *Avantages de la Nouvelle-Calédonie*

Il existe une surface de basaltes importante en N.-C. (unité géologique de Poya, appelée aussi nappe des basaltes, cf. figure 24) répartie sur la moitié nord de la côte ouest. Le projet Koniambo (KNS) est situé tout près des affleurements de basaltes.

### b. Dans les péridotites

#### *Recherches en cours*

Les péridotites sont des roches ultrabasiques, moins riches en calcium que les basaltes, mais contenant une grande quantité de magnésium rentrant aussi dans le processus de carbonatation.

Les recherches réalisées sont beaucoup moins avancées que dans le cas des basaltes, probablement car les massifs de péridotites sont beaucoup moins importants dans le monde que les épanchements de basaltes. Il n'existe pas aujourd'hui encore de projet pilote type Hellisheidi, mais de récentes découvertes scientifiques réalisées par le Lamont–Doherty Earth Observatory de l'université de Columbia (États-Unis, New York) dans le massif de péridotites d'Oman montrent l'importance du potentiel de la séquestration minéralogique des roches ultrabasiques. En effet, les travaux publiés par Kelemen et Matter (2008) – impliqués aussi dans le projet Hellisheidi – montrent que les péridotites d'Oman et leur produit d'altération, les serpentinites, séquestrent en surface par carbonatation naturelle (processus d'altération) $10^4$ à $10^5$ tonnes de $CO_2$ par an. Cette carbonatation des péridotites déjà remarquable peut être accélérée en augmentant la température et la pression. À partir d'études théoriques, les chercheurs de l'université de Columbia proposent d'injecter le $CO_2$ concentré (état supercritique) dans des péridotites situées à 3 km de profondeur, après avoir fracturé hydrauliquement la zone de stockage et l'avoir porté à 185 °C par injection d'eau chaude. Une fois la carbonatation initiée, la température de 186 °C serait maintenue par sa réaction exothermique et la séquestration se produirait en continue et à vitesse accélérée sous un flux de $CO_2$ maintenu seulement à 25 °C. Ils estiment que ce procédé, très économique après son initialisation, pourrait permettre de stocker jusqu'à 1 Gt de $CO_2$ par an dans le massif de péridotites d'Oman. Ils insistent sur le potentiel des péridotites de N.-C. et de Papouasie-Nouvelle-Guinée, qui comme en Oman, se prolongent en mer sous une faible tranche de sédiments, et sont accessibles à 3 km de profondeur (profondeur requise pour avoir une température et une pression initiales suffisamment élevées). Il est évident que ce procédé ne

pourra pas être testé en laboratoire et nécessitera la réalisation d'un site pilote dans une de ces trois régions du monde.

Par rapport à la séquestration minéralogique ex-situ, cette option nécessite moins d'énergie, pas de transport de matériel (roches), et s'avère donc beaucoup plus économique.

*Avantages de la Nouvelle-Calédonie*

Elle possède le deuxième plus grand massif de péridotites au monde (massif du Sud, cf. figure 24), après celui de l'Oman. Ce massif se prolonge en mer sous le bassin des Loyautés où les péridotites peuvent être atteintes à 3 km de profondeur dans une zone où le procédé proposé par l'université de Columbia pourrait être appliqué.

## 3.4. Comment la Nouvelle-Calédonie peut-elle tirer parti de son contexte géologique ?

Les trois recommandations proposées se situent à différents stades de maturité dans les réseaux de recherche internationaux. Nous avons choisi de les présenter par ordre décroissant en matière de recherche et de démonstration, mais chacune d'elle montre des intérêts pour la N.-C. et doit être analysée dans le contexte économique et sociétal. Chaque recommandation implique des efforts d'investissements qui devront être conduits en synergie avec les initiatives françaises, européennes et de la région Asie-Pacifique (en particulier avec l'Australie).

### *3.4.1. Recommandation 1 : séquestration géologique dans les bassins sédimentaires*

Selon le Giec (2005), *« Le PSC (Piégeage et stockage de dioxyde de carbone) pourrait être envisagé dans les pays qui détiennent d'importantes sources d'émissions de $CO_2$ susceptibles d'être piégées, qui ont accès à des sites d'entreposage, qui détiennent une expérience en matière d'exploitation pétrolière et gazière, et qui cherchent à se développer tout en respectant la limitation des émissions ».*

Il n'y a pas d'expérience en matière d'exploitation pétrolière et gazière en N.-C., mais il existe un réel potentiel de sites d'entreposage dans les bassins sédimentaires de sa côte ouest et de sa ZEE *deep* off shore (cf. « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie »). Il est fort probable que des campagnes d'exploration s'effectuent à moyen/court terme. Ces campagnes impliqueront la réalisation de forages qui découvriront des gisements ou, dans le pire des cas, des aquifères salins. Dans le cas de gisements, le $CO_2$ pourrait être stocké lors de RAP (récupération assistée de pétrole), et/ou dans les aquifères salins qui se situent au contact des hydrocarbures (cf. projet pilote In-Salah en Algérie). **La N.-C. doit être prête à négocier avec les compagnies pétrolières internationales cette option de stockage géologique (gisements et/ou aquifères salins) dès que des campagnes d'exploration seront lancées dans sa ZEE.** Le stockage en aquifère salin nécessitera une phase de démonstration, les éventuels projets pourront faire appel à des financements européens et à des labellisations internationales (AIE). Le CO2CRC d'Australie pourrait être un excellent partenaire pour mener ces recherches, en particulier sur la Ride de Lord Howe (figure 23), cible d'exploration commune à l'Australie et à la N.-C.

Avant cela, la N.-C. peut continuer à promotionner le potentiel pétrolier de ses bassins sédimentaires, **mais aussi leur potentiel en termes de stockage géologique de $CO_2$**, qui peut intéresser les pays voisins. Ainsi, le Service de la géologie de N.-C. (Dimenc), qui a su très bien mettre en valeur l'intérêt économique de ses bassins sédimentaires, devrait inclure dans ses actions de promotion cette plus-value. Elle pourrait, pour cela, intégrer les réseaux

recherches nationaux (Club $CO_2$), européens (CO2GeoNet), et de la région Asie-Pacifique (CO2CRS australien).

Les bassins sédimentaires les plus attrayants du point de vue économique sont les bassins de la côte ouest (terre et lagon), puisqu'ils sont relativement proches des sites d'émission de $CO_2$ et facilement accessibles. L'anticlinal de Gouaro (région de Bourail), qui a déjà été foré (cf. « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie »), peut être une cible de stockage intéressante malgré l'évaluation pétrolière peu encourageante qui en a été faite. Une étude à moindre coût pourrait être envisagée en révisant et synthétisant les données acquises jusqu'à maintenant, pour tenter éventuellement des modélisations prédictives de stockage en collaboration avec l'IFP et le BRGM qui deviennent des spécialistes mondiaux dans ce domaine.

Dans le cas de cibles de stockage off shore, se pose les problèmes de l'éloignement et des coûts de forages. D'après le Giec, l'éloignement des sites d'émission de $CO_2$ reste raisonnable s'il ne dépasse pas 300 km. Des installations et des moyens de transport maritime de $CO_2$ sous forme liquide pourraient être réalisables.

### *3.4.2. Recommandation 2 : séquestration minéralogique in situ dans les basaltes*

La séquestration minéralogique *in situ* dans des basaltes peut être envisagée en N.-C. puisqu'une importante unité de basaltes (unité de Poya ou nappe des basaltes) jalonne la moitié nord de la côte ouest de la Grande Terre (figure 24). Il faudra attendre les résultats des sites pilotes nord-américain (BSCSP Project) et islandais (Hellisheidi $CO_2$ Injection Pilot Study) pour voir si ce procédé est exportable à la N.-C. En attendant, il serait judicieux de commencer à évaluer le potentiel des basaltes de la côte ouest de la Grande Terre par des expériences en laboratoire. Ce type de recherche est à la hauteur des financements proposés par le programme ANR *Captage et stockage du $CO_2$* qui devrait relancer un appel d'offre prochainement sur la séquestration de $CO_2$. Ce projet pourrait impliquer la Dimenc, l'université de N.-C., le BRGM, l'IFP et des laboratoires de recherche français comme le LMTG (université de Toulouse) qui sont à la pointe dans ce domaine. Ils devront se faire avec l'appui financier de groupes comme Eramet et Xstrata.

Du point du vue maturité, l'option « basaltes » se situe entre les options « bassins sédimentaires » déjà au stade opérationnel dans certaines conditions, et l'option « péridotites » qui en est au stade de la recherche et attend un site pilote. Un des avantages de la séquestration dans les basaltes est qu'elle nécessite des forages moins profonds (400-800 m) que la séquestration dans les péridotites (3 000 m). Un second avantage est la situation de la future centrale de Koniambo (projet KNS) très proche des affleurements de basaltes (figure 24). Vu l'intérêt que porte la Province Nord aux problèmes environnementaux, cette solution devrait fortement intéresser la future centrale de Koniambo qui pourrait intégrer captage et stockage de $CO_2$. Le groupe Xstrata, actionnaire à 49 % du projet Koniambo, est partenaire du CO2CRC australien, et déjà impliqué dans les recherches sur le stockage de $CO_2$ de la région. Il a déjà investi 30 millions de dollars dans le Otway Pilot Project en Australie (figure 29).

### *3.4.3. Recommandation 3 : séquestration minéralogique in situ dans les péridotites*

La séquestration minéralogique *in situ* dans les péridotites est l'option de stockage la plus séduisante au niveau recherche et expérimentation. Les recherches dans ce domaine en sont à un stade de maturité beaucoup moins avancé que l'option « bassins sédimentaires » (recommandation 1), mais si ce procédé s'avère fiable et efficace, la N.-C. sera par son contexte géologique au premier rang mondial pour en bénéficier. L'opération pourrait même

être très rentable vu les capacités de stockage mises en évidence par l'université de Columbia dans les péridotites d'Oman (de l'ordre d'un Gt par an) comparables à celles de la N.-C. Comme le soulignent les chercheurs de cette université, il ne manque plus qu'un laboratoire naturel pour passer du stade de la recherche au stade de la démonstration. Avec son contexte géologique et ses sites d'émission de $CO_2$, la N.-C. réunit toutes les conditions pour mettre en place un site pilote collaboratif, comparable à celui de Hellisheidi (séquestration dans basaltes) en Islande. Ce projet pilote doit se faire sur la côte est de la Grande Terre si l'on en croit les spécialistes de l'université de Columbia qui préconisent des forages en mer pour trouver des zones de stockage dans des péridotites à 3 km de profondeur. L'enracinement des massifs de péridotites sur la côte est dans le bassin des Loyauté a déjà été montré par des campagnes de géophysique marine. Un tel projet doit être financé par le gouvernement et les industries responsables des émissions de $CO_2$ comme c'est le cas en Australie (projets du CO2CRC). À titre d'exemples, on peut mentionner que la compagnie Xstrata (49 % du projet Koniambo) est déjà un des nombreux partenaires industriels du CO2CRC australien. En Islande, c'est la compagnie Reykjavik Energy qui finance en grande partie le projet Hellisheidi impliquant aussi des universités et des centres de recherche locaux et étrangers. Au niveau européen, les électriciens producteurs de $CO_2$ n'hésitent pas à s'impliquer et à cofinancer des travaux sur toute la chaîne de capture et de séquestration.

Le Club $CO_2$ français précise que *« la réalisation d'un ou de pilotes de stockage géologique répond à des objectifs et des enjeux de différentes natures :*

- *objectifs scientifiques : le pilote doit permettre de tester et de valider les technologies développées pour caractériser, dimensionner, prédire le devenir du stockage et le contrôler. Il s'agit en fait d'un véritable laboratoire de terrain qui permet également d'acquérir des données pour la calibration des outils et des méthodes ;*
- *démonstration industrielle : le ou les démonstrateur(s) industriel(s) permet(tent) la démonstration de la faisabilité et de la maîtrise du stockage. C'est aussi une étape souvent indispensable avant le déploiement de la technologie à l'échelle commerciale ;*
- *communication : le pilote permet également de fédérer les actions de communication auprès des autorités (aspects réglementaires) et du public (acceptabilité). »*

Un projet pilote de séquestration de $CO_2$ dans les péridotites de la Grande Terre serait donc une occasion unique pour valoriser une fois de plus le contexte géologique de la N.-C., mais aussi pour apporter un nouveau site expérimental (le troisième au monde en séquestration minéralogique *in situ*, et le premier dans des péridotites) aux réseaux de recherche internationaux.

L'absence de données pétrophysiques et géophysiques sur ces formations rend actuellement délicate l'estimation de leurs capacités réelles en termes de volume de stockage pour le $CO_2$. Comme pour les basaltes, des études préliminaires pourraient être entreprises *via* les appels d'offre de l'ANR.

### 3.5. L'intérêt du stockage du $CO_2$ en Australie

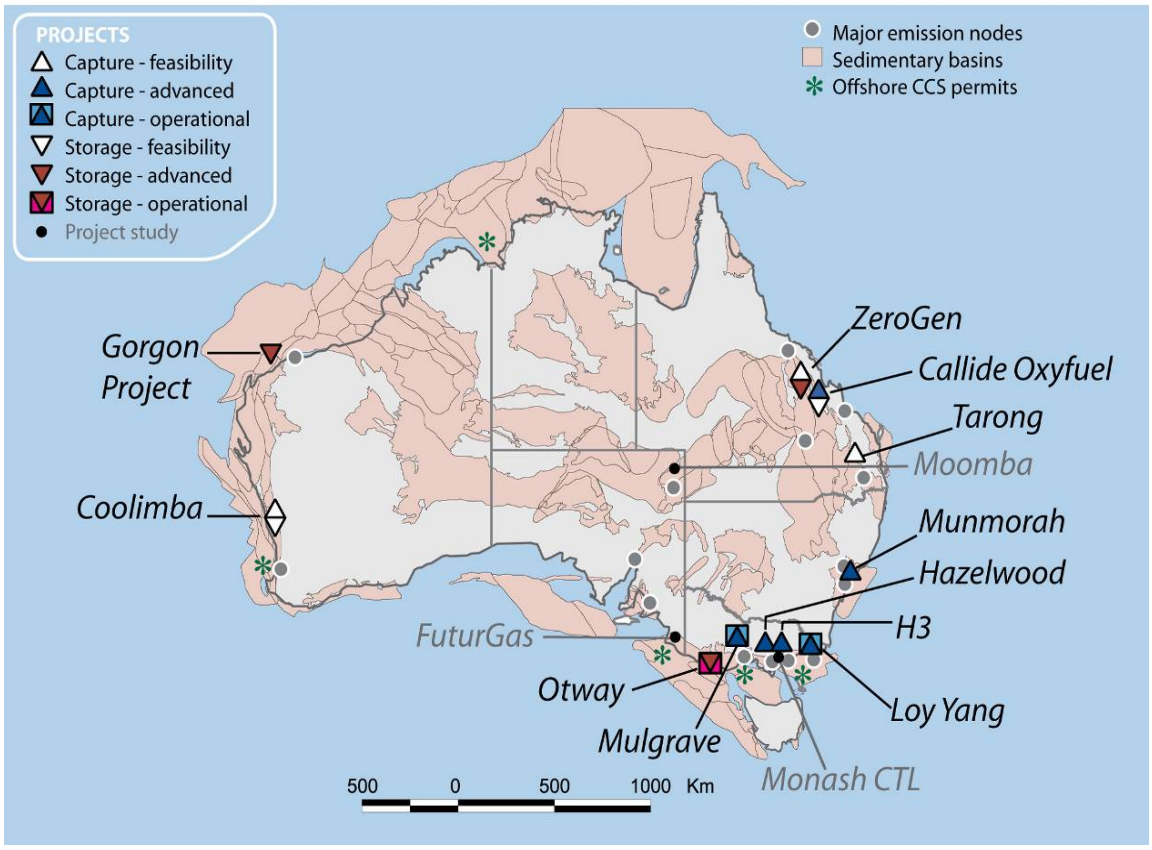
Avec les États-Unis, le Canada, l'Europe et le Japon, l'Australie fait partie des cinq pôles importants qui développent des recherches sur le stockage géologique. L'Australie fait du CCS (Carbone Capture and Storage) une priorité nationale et a créé le CO2CRC (The Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies) qui est une *joint venture*

entre industrie, gouvernement, universités et centres de recherches australiens et étrangers. Les recherches du CO2CRC ont pour but de réduire les coûts du CCS et de montrer sa fiabilité et son efficacité, en particulier en Australie et en Nouvelle-Zélande. Parmi les différentes options de séquestration de $CO_2$, l'Australie a choisi le stockage géologique dans les bassins sédimentaires à terre ou près de ses côtes (figure 7). Elle souhaite être à la pointe dans ce domaine et exporter son savoir-faire. L'Australie a un projet pilote opérationnel depuis 2008, qui est considéré comme un des plus démonstratifs au monde : le CO2CRC Otway Project où 100 000 t de $CO_2$ vont être injectés pendant deux ans dans un gisement de gaz déplété avec un important programme de surveillance. Le même type d'opération vient d'être mis en route par Total dans les Pyrénées françaises (gisement de Lacq) ; Total n'est pas rentré dans le réseau australien. Parallèlement, deux autres projets arrivés à maturité pour le stockage géologique devraient être lancés prochainement en Australie. Le premier projet australien « charbon propre » ZeroGen, projet de démonstration sur la côte est, capturera le $CO_2$ produit par la gazéification de charbon et le transportera grâce à un gazoduc de 220 km sur un site de stockage géologique plus à l'intérieur des terres (début du projet prévu pour 2012). Sur la côte ouest, un projet industriel de LNG (Gorgon Project), planifié par les compagnies Chevron (opérateur), Shell et Exxon, prévoit d'injecter 3,3 millions de t de $CO_2$ par an dans un aquifère salin près de l'île de Barrow, soit un total de 125 Mt pour toute la vie du projet ; la phase de construction des installations doit commencer fin 2009 et durer cinq ans.

L'Australie s'investit donc considérablement dans des projets de recherche et de développement sur le stockage géologique de $CO_2$ dans les bassins sédimentaires. Elle est en train de devenir un leader mondial dans ce domaine et **la N.-C. aurait tout intérêt à rejoindre le réseau CO2CRC où la Nouvelle-Zélande est également fortement impliquée**. Bien que se trouvant à un stade de connaissance beaucoup moins avancé, les bassins sédimentaires de la côte ouest de la N.-C. présentent un intérêt certain pour le stockage géologique au même titre que les bassins australiens.

Lors des probables campagnes d'exploration pétrolière qui seront réalisées sur la ride de Lord Howe, qui s'étend sur les ZEE d'Australie et de N.-C., le CO2CRC sera certainement intéressé pour évaluer les possibilités de stockage de $CO_2$.

**Figure 29 – Localisation des projets de capture et de stockage géologique de $CO_2$ en Australie (© CO2CRC 2008)**




### 3.6. Vers quelles autres parties du monde, l'expérience de la séquestration minéralogique dans les péridotites néo-calédoniennes pourrait-elle être transférée ?

Le CCS (Carbone Capture and Storage) est un défi planétaire où la France souhaite jouer un rôle important dans l'organisation de la recherche et la promotion de solutions technologiques.

Comme le souligne le Club CO2 (2006) : *« la France dispose d'équipes de recherche publiques (IFP, BRGM, universités) ou privées lui permettant de jouer un rôle de premier plan dans la mise au point de l'ensemble des équipements et services associés au captage, au transport et au stockage du gaz carbonique. La France a pour ambition de catalyser les efforts de l'ensemble des acteurs concernés pour constituer une vitrine de son savoir-faire en vue de faciliter l'exportation de biens et de services dans ce domaine prometteur. »*

La dimension internationale est toujours donc très présente dans les grands projets de démonstration. Si la N.-C. se lance dans la réalisation d'un site pilote de séquestration de $CO_2$ dans les péridotites, les résultats des travaux seront des éléments de référence dont bénéficieront les différentes équipes de recherche internationales et les industriels.

L'exportation du savoir-faire pourrait se faire en particulier avec l'**Oman**, où les péridotites pourraient stocker le $CO_2$ émis par de nouvelles centrales électriques fonctionnant au gaz naturel provenant du golfe. La côte ouest des États-Unis, qui comprend aussi des massifs de péridotites, est intéressée par cette option de stockage comme le montrent les travaux de l'université de Columbia. La **Papouasie-Nouvelle-Guinée** possède des massifs de péridotites comparables à ceux d'Oman et de la N.-C. par leur superficie et leur contexte

tectonique (présence de péridotites en mer sous faible tranche de sédiments, rendant accessible des zones de stockage à 3 km de profondeur). Elle pourrait également envisager cette option de séquestration le moment venu. D'autres régions du monde comme les Balkans présentent aussi d'importants massifs de péridotites.

### 3.7. Conclusions sur le stockage géologique du $CO_2$

La N.-C. par son contexte géologique – présence de bassins sédimentaires, de basaltes et de péridotites – a la possibilité de s'investir dans trois pistes de recherche pour la séquestration de $CO_2$.

- **Option bassins sédimentaires :** les bassins sédimentaires de la côte ouest de la Grande Terre présentent probablement des cibles de stockage (aquifères salins, gisements d'hydrocarbures à découvrir) facilement accessibles et près des centres d'émission de $CO_2$. Les recherches doivent se faire avec l'industrie pétrolière et seront donc conditionnées par la reprise de l'exploration de ces bassins. Elles peuvent être menées en partenariat avec le réseau CO2CRC australien qui se spécialise dans ce type de séquestration en mettant en place des sites de démonstration, et bientôt des projets commerciaux, dans les bassins sédimentaires des côtes australiennes.

- **Option séquestration minéralogique dans des basaltes :** elle serait particulièrement intéressante pour le projet Koniambo (KNS) situé non loin des affleurements de ces roches basiques. Il faudra attendre les résultats des deux sites de démonstration nord-américain et islandais pour confirmer la fiabilité du procédé. En attendant, des études préliminaires peuvent être menées pour étudier les potentialités des basaltes de la côte Ouest (études de terrain et de laboratoire).

- **La mise en place d'un site pilote collaboratif de séquestration minéralogique dans les péridotites** est envisageable et mettrait la N.-C. en avant sur la scène internationale. Ce site devrait se trouver sur la côte est pour obtenir les conditions optimales de séquestration (stockage dans péridotites à 3 km de profondeur). Il serait le troisième site de démonstration de séquestration minéralogique *in situ* au monde, et le premier dans des péridotites. Si ce procédé s'avère fiable et efficace, le savoir-faire est exportable dans plusieurs régions du monde, en particulier en Oman où l'industrie pétrolière installe des centrales électriques au gaz naturel.

## Bibliographie

AITCHISON J.C., 1995 – Eocene arc continent collision in New Caledonia and implications for regional southwest Pacific tectonic evolution, *Geology*, 23, 161– 164.

AVIAS J., 1967 – Overthrust structure of the main ultrabasic New Caledonian massives, *Tectonophysics*, 4, 531 – 541.

CHARDON D., CHEVILLOTTE V., 2006 – Morphotectonic evolution of the New Caledonia ridge (Pacific southwest) from post-obduction tectonosedimentary record, *Tectonophysics*, 420, 473 – 491.

CLUB $CO_2$, 2006 – *Capture, Transport et Stockage du $CO_2$*. Proposition de plan de travail réalisé par le Club CO2, Rapport, 127 p.

COLLOT J., GELI L. *et al.*, – 2008 – Tectonic history of northern New Caledonia Basin from deep off shore seismic reflection: Relation to late Eocene obduction in New Caledonia, southwest Pacific, *Tectonics*, V. 27, TC6006, doi:10.1029/2008TC002263.

DESSERT C., DUPRÉ B. *et al.*, 2003 – Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology* 202, 257-273.

DUBOIS J., LAUNAY J. *et al.*, 1974 – Uplift movements in New Caledonia-Loyalty Islands area and their plate tectonics interpretation, *Tectonophysics*, 24, 133 - 150, doi:10.1016/0040-1951(74)90134-6.

GIEC, 2005 – *Piégeage et stockage du dioxide de carbone*, Rapport spécial du Giec.

JUERG M., MATTER W.S. *et al.*, 2009 – Permanent Carbon Dioxide Storage into Basalt: The CarbFix Pilot Project, Iceland. *Energy Procedia*, Volume 1, Issue 1, 3641-3646.

LAFOY Y., AUZENDE J.M. *et al.*, 1996 – *Bilan des connaissances sur l'évaluation du potentiel pétrolier de la Nouvelle-Calédonie et de ses dépendances*, Rapport ZoNéCo, 67 p.

MAURIZOT P., LAFOY Y., 2003 – Notice explicative, Carte géol. Nouvelle-Calédonie (1/50 000), feuille Maré, îles Loyauté, Nouméa : Service des mines et de l'énergie, BRGM. Carte géologique par Maurizot *et al.*

PARIS J.P., 1981 – Géologie de la Nouvelle-Calédonie : un essai de synthèse, Bureau de Recherche géologique et minière, Orléans, France, 279 p.

VIALLY R., LAFOY Y. *et al.*, 2003 – "Petroleum potential of New-Caledonia and its offshore basins, paper presented at AAPG", International Conference, Barcelona, Spain.

## 4. Utilisations éventuelles des biomasses ligno-cellulosiques importées et produites localement pour substituer du charbon dans la production de nickel

On vient de voir ci-dessus les problèmes et perspectives liées au stockage géologique du $CO_2$. Nous regardons maintenant la possibilité de réduire les émissions de GES par remplacement du charbon par d'autres sources d'énergie, et en particulier par des biomasses ligno-cellulosiques. Celles-ci devraient sans doute être importées mais pourraient peut-être également, pour une petite part, être produites localement.

Shell avait sérieusement envisagé il y a quelques années d'installer une usine de production de biocarburant par le procédé Fisher Tropsch sur le port de Rotterdam. Une chaufferie à bois doit maintenant y être installée. L'approvisionnement devait provenir des différents pays de la mer Baltique. Mais son sait que la production de biocarburant liquide réduit environ deux fois moins les émissions de $CO_2$ par tonne de biomasses utilisée que la production de chaleur.

L'industrie du bois génère couramment son électricité avec du bois. Mais en dehors de ces industries, il existe aux États-Unis de nombreuses centrales électriques à bois, avec des puissances généralement plafonnées à 49 MW.

Il en existe aussi en Europe. Ainsi la centrale électrique de la ville de Liège, qui fonctionnait jadis au charbon pulvérulent, utilise maintenant des granulés de bois importés par

bateau. (Marchal *et al*., 2006 Ryckmans *et al*., 20006). À Copenhague on utilise des granulés de paille à la place du charbon. La ville de Liège en Belgique génère son électricité à partir de granulés de bois importés par bateau qui remplacent maintenant le charbon pulvérulent.

Les Pays-Bas étudient également très sérieusement les possibilités d'importation de bois pour améliorer leurs bilans de GES.

La centrale à charbon de Polaniec en Pologne, détenue par Electrabel aurait réalisé selon de Perthuis (2009) des investissements pour ajouter près de 20 % de bois au charbon, dont le coût est couvert sitôt que le prix de la tonne de $CO_2$ atteint 25 €. Ce qui a permis a cette centrale de remettre sur le marché 6 millions de quotas de $CO_2$.

### 4.1. Le nickel, une industrie très intensive en carbone

Le meilleur procédé de production de nickel émet presque autant de GES par tonne que la production d'une tonne d'aluminium qui, elle-même, émet dix fois plus de GES que la production moyenne d'une tonne d'acier.

**Tableau 5 – Émissions moyennes de $CO_2$ par tonne de produit issu des secteurs industriels intensifs en carbone [11]**

| | Émissions en t de $CO_2$ par tonne de produit | Remarques |
|---|---|---|
| **Nickel** | 20 en moyenne<br>de 28 (procédé Pyro) à 10 (procédé Hydro) | Valeurs pour la Nouvelle-Calédonie Eramet (2009) |
| **Aluminium** | 17 | Valeur moyenne mondiale calculée (1) |
| **Acier** | 1,77 | Valeur moyenne mondiale calculée (1) |
| **Produits chimiques de base** | 2,76 | Valeur moyenne mondiale calculée (1) |
| **Papier** | 1,37 | Valeur moyenne mondiale calculée (1) |
| **Ciment** | 0,5 | Valeur moyenne mondiale calculée (1) |

Les émissions de GES vont encore augmenter avec la mise en service de deux nouvelles unités. Il est donc important de trouver les moyens de réduire les émissions de GES par tonne de nickel.

Cela peut se faire par des améliorations dans le procès industriel. Ce point très important n'est cependant pas discuté ici. Il l'a été dans « Les nouvelles technologies en matière de production et de stockage d'énergie ».

Cela peut aussi se faire en adoptant des procès industriels plus performants comme le montre le tableau 5. On pourrait donc envisager, le moment venu, de remplacer les anciennes usines par des nouvelles usines plus performantes. Mais cela nécessite de nouveaux

[11] Sauf pour le nickel, ces valeurs *moyennes* sont calculées à partir du tableau 4.1 p 61 de T. Houser *et al.* (2008), où l'on tient compte des émissions mondiales directes et indirectes, c'est-à-dire aussi de l'extraction des minerais. L'intensité carbone peut fortement varier suivant les énergies utilisées ; l'aluminium fabriqué à partir du charbon, par exemple en Afrique du Sud, est beaucoup plus intensif en carbone que celui fabriqué avec de l'hydroélectricité au Canada, qu'avec l'énergie nucléaire en France, ou avec de l'électricité d'origine géothermique comme en Islande.

investissements et ne peut s'envisager que lorsque l'usine devra être remplacée, ou si la pénalité par tonne de $CO_2$ émise devenait très importante, au point de rendre rentable le renouvellement anticipé des anciennes installations.

Nous examinons ci-dessous les moyens de réduire les émissions de GES, en changeant partiellement de combustible, ce qui pourrait être envisagé dès maintenant.

Après 2020, cette filière pourrait être combinée avec le captage et le stockage géologique de $CO_2$ provenant pour partie du charbon et pour partie des biomasses végétales.

### 4.2. L'intérêt des biomasses ligno-cellulosiques par rapport au charbon dans les centrales électriques et dans les usines métallurgiques

Les émissions de gaz carbonique par tep d'énergie primaire varient avec les combustibles (cf. « Les nouvelles technologies en matières de production et de stockage d'énergie ») comme le montre le tableau 6 : à rendement de chaufferie identique, le charbon émet 40 % de plus de $CO_2$ que le pétrole, et 87 % de plus que le gaz naturel.

Toutes choses étant égales par ailleurs, les productions de chaleur à partir de déchets ligno-cellulosiques, de produits ligno-cellulosiques renouvelés (bois, herbes, etc.), de gaz naturel ou de pétrole sont donc beaucoup plus intéressantes qu'à partir du charbon. Le remplacement dans tout le processus industriel du charbon par des biomasses ligno-cellulosiques renouvelées permettrait d'éviter l'émission de 4 à 4,5 teq$CO_2$ par tep. Or une tonne de nickel nécessiterait actuellement entre 4,5 tep et 6 tep de charbon.

**Tableau 6 – Les émissions de $CO_2$ par tep d'énergie primaire des différents combustibles bord de chaufferie (extrait simplifié du Guide Biomasses énergie 2006, Riedacker, 2006)**

| Combustible | Composition élémentaire | Pouvoir calorifique inférieur | Émissions nettes en tonne de $CO_2$ | |
|---|---|---|---|---|
| | | kJ/kg de produit sec | par tep d'énergie primaire du combustible | par tep d'énergie primaire bord de chaufferie[12] |
| **Anthracite** | C | 33 472** | 4,5 | (supérieur à 4,7 ?)<br>1,34, 1,71 et 23,5 fois plus qu'avec le gaz, le pétrole ou le bois renouvelé |

[12] En tenant compte des dépenses énergétiques, pour le conditionnement et la mise à disposition du gaz, du pétrole et du bois, estimées respectivement à 0,14 tep, 0,22 tep et 0,05 tep d'énergie fossile par tep d'énergie primaire bord de chaufferie (ADEME 2003) ; les émissions en $CO_2$ du gaz, du pétrole et du bois doivent alors être majorées respectivement de 0,34, de 0,70 et de 0,16 t de $CO_2$ par tep utile. Le bilan final dépendra évidemment aussi des divers rendements de conversion des chaudières. Ces calculs sont effectués sans tenir compte des fuites de gaz naturel, parfois importantes, dans les conduites hors des pays consommateurs concernés. Or, il suffirait d'environ 4 % de fuites pour que le gaz naturel ait une émission, en équivalent $CO_2$ par tep d'énergie primaire, comparable à celle du fioul.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Gain en tonne de $CO_2$ par tep de charbon** | | | | 1,2 avec du fioul et 1,96 $tCO_2$ |
| **Pétrole brut** | $CH_2$ | 41 421 | 3,2 | >3,5<br>1,27 et 8,6 fois plus que le gaz naturel ou le bois renouvelé |
| **Méthane (Gaz naturel sans $CO_2$)** | $CH_4$ | 47 739 | 2,4 | 2,74 |
| **Bois ou biomasses renouvelés,**<br>**ou résidus industriels inévitablement décomposés à l'air*** | $CH_{1,66}\ O_{0,66}$ | 17 991 à 18 828 | 0 | 0,2 |
| **Bois non renouvelé**<br>**(par exemple suite à une surexploitation conduisant à la disparition de la forêt)** | $CH_{1,66}\ O_{0,66}$ | 17 991 à 18 828<br>(13 388 kJ/kg de bois à 20 % d'humidité sur brut) | 4 à 4,3<br>(4,5) | (4,7)<br>comme le charbon |

*** La mise en décharge conduit à la production de méthane, donc à un bilan négatif ** Certains charbons à haute teneur en cendre ont des pouvoirs calorifiques plus bas.**

L'électricité peut être produite à partir de différentes sources d'énergie : de lignite, de charbon de fioul, de gaz naturel, de biomasses, de l'uranium, du vent ou de centrales hydrauliques. Le tableau 7 montre que selon la source d'énergie primaire, les émissions peuvent passer de 400 g à 1 kg de $CO_2$ par kWhe.

**Tableau 7 – Émissions de $CO_2$ par kWh électrique - Tableau extrait du Guide Biomasse-Énergie, Riedacker, 2006**

| Type de production | Émissions en g de $CO_2$ /kWh électrique |
|---|---|
| Centrale à vapeur à lignite 800 MW | 1 040 (Strom Basiswissen n° 102) |
| Centrale à charbon<br>Centrale à vapeur à charbon 700 MW | 950* à 1022 [Mann et Spath (1999)]<br>820 |
| Centrale à fioul (rendement de 37 %) | 800* à 870** |
| Centrale à gaz (rendement 52 %) | 430 à 470* |
| Cogénération à gaz, turbine à combustion optimisée de 1 MW | 220 (déduction faite des émissions d'une chaudière classique produisant seulement de la chaleur)** |
| Cogénération à gaz, turbine à combustion optimisée de 10 MW | 260 (déduction faite des émissions d'une chaudière classique)** |
| Cogénération à gaz, turbine à combustion optimisée de 10 MW (standard bas) | 390 (déduction faite des émissions d'une chaudière classique)** |
| Centrale à biomasse | 46 (Mann et Spath, 1999) |
| Centrale nucléaire (avec la construction) | 6* à 25 (Strom Basiswissen n° 102) |

| | |
|---|---|
| Centrale éolienne (avec la construction) | 20 (Strom Basiswissen n° 102) |
| Construction d'une centrale hydraulique de 20 MW | 4 (Strom Basiswissen n° 102) |
| Émissions moyennes selon les pays | 40 en Suède, 80 en France, 188 en Autriche, 202 en Finlande, 269 en Belgique, 354 au Danemark, 425 en Espagne, 444 au Royaume-Uni, 453 aux Pays-Bas, 477 en Allemagne, 493 en Italie, 539 au Portugal, 712 en Irlande et 843 en Grèce (*) |

**Selon la source ou selon le pays (d'après des données fournies par les pays à l'AIE en 1999 (*), par l'ADEME (**) et d'autres sources).**

Les émissions des biomasses, par kWh électrique produit, n'atteignent que 4,4 % de celles du charbon (46 g de $CO_2$[13] contre 1 022 g de $CO_2$[14]).

La production d'électricité, avec gazéification et en cycle combiné à partir du charbon ou de la biomasse, est également plus favorable pour le climat lorsqu'on utilise de la biomasse renouvelée (Mann et Spath, 1999). Car cette dernière est non seulement quasiment neutre du point de vue du climat, mais encore parce que l'épuration des fumées d'une centrale à charbon demande plus d'énergie que celles des fumées issues des biomasses.

À raison d'un apport de 5 % ou 15 % de biomasses, on peut réduire les émissions de GES d'une centrale à charbon respectivement 6,7 % et de 22,4 % par kWh électrique produit (Mann et Spath, 1999).

La co-combustion du charbon avec des biomasses est déjà pratiquée en bien des endroits ; aux Pays- Bas des centrales à charbon de 250 MW utilisent, en complément du charbon (pour environ un dixième de la puissance), des bois de rebut et des fientes de poulets pulvérisés ; à l'île de la Réunion et à l'île Maurice, on utilise du charbon en complément de la bagasse, en dehors de la période de disponibilité de cette dernière.

### 4.3. La faisabilité technique d'une co-utilisation du charbon et des biomasses ligno-cellulosiques sèches

La co-combustion de bois et de charbon dans de grandes chaufferies reste théoriquement la solution la plus économique. Mais cela ne constitue pas la solution la plus performante sur le plan énergétique. Pour optimiser les rendements, mieux vaut brûler les combustibles solides différents dans des chaufferies différentes et centraliser la production de chaleur.

La société Arcelor, devenue Arcelor Mittal, a lancé dès 2000 un programme pour remplacer le charbon dans la production de fonte (Programme Ulcos pour Ultra Low $CO_2$ solution) brute par des biomasses carbonisées (A. Riedacker, 1999 ; P. Cricky, C. Rynikiewicz, 2006 ; Rynikiewicz C., 2007).

Les grandes chaufferies municipales de la Finlande, par exemple de la ville de Jyväksla, coproduisent de la chaleur et de l'électricité à partir de bois et de tourbe.

[13] Respectivement 28 g, 6 g et 12 g de $CO_2$ pour la production de la biomasse, son transport, les constructions. L'émission brute de 890 g de $CO_2$ lors de la production d'électricité dans la centrale n'étant pas comptée ici puisque ce gaz carbonique est repris lors de la croissance des biomasses.

[14] Respectivement 9 g, 17 g, 5 g et 991 g de $CO_2$ pour l'extraction du charbon, son transport, les constructions, le fonctionnement et la production de l'électricité dans la centrale.

**D'où proviendraient ces biomasses ligno-cellulosiques ?**

Celles-ci pourraient provenir des déchets, de coproduits de filières et de biomasses ligno-cellulosiques renouvelables de la N.-C., mais actuellement non récoltées. On peut estimer que les productions des taillis d'eucalyptus pourraient éventuellement fournir au moins 10 à 12 t de matière sèche par ha/an, soit environ 4 t tep d'énergie primaire. En fertilisant bien ces peuplements, on pourrait sans doute arriver à produire sur un ha l'énergie nécessaire à la production de 1 t de nickel. Pour la production des 200 000 t de nickel en 2007, il faudrait donc environ 200 000 ha de forêts très productives (500 000 t de matière sèche, un peu moins que les besoins d'une grande usine de pâte à papier) pour fournir l'énergie nécessaire à la production de nickel à très bas niveaux d'émissions. Or ne pourraient sans doute installer en N.-C., dans le meilleur des cas, que quelques centaines d'hectares de forêts très productives et exploitables mécaniquement. Pour le restant des besoins – qui augmenteront avec la mise en service prochainement des deux nouvelles unités – il faudrait s'appuyer sur des importations de biomasses et de charbon.

Comme les usines de pâtes à papier, ces unités de production pourraient importer du bois par bateau ; du bois rond, des plaques grises de bois (copeaux non écorcés)[15], ou encore des granulés ou des briquettes de bois. La Nouvelle-Zélande, le Canada et le Brésil et peut-être la Papouasie (Barnaba Suebi, 2007) pourraient sans doute fournir de tels produits le moment venu. Sous les tropiques, on ne sait en général que faire de certaines productions de biomasses ligno-cellulosiques. (Dameron *et al.*, 2005). Mais, là encore, la faisabilité réelle dépend du coûts de récolte des produits et de leur coût de transport jusqu'à l'usine (locale) ou jusqu'au port, quand on vise un marché mondial. Le coût de transport par bateau, dans le prix de revient final du produit rendu chez l'utilisateur, est en revanche, on le sait, en général très faible.

Quand les émissions de $CO_2$ pourront être stockées géologiquement (probablement pas avant 2020), par exemple dans les péridotites de la N.-C. ou ailleurs (cf. Plouchart et Fradet, 2006), cette filière permettrait en outre d'effectuer des prélèvements nets de $CO_2$ dans l'atmosphère. Au lieu d'avoir des émissions presque nulles comme avec le charbon, avec les biomasses végétales renouvelées, ou les déchets actuellement non valorisés, les émissions nettes seraient négatives. Il faudrait alors en tenir compte dans la rémunération des quantités de $CO_2$ ainsi capturées. Cette filière pourrait donc devenir intéressante en N.-C. le moment venu, même avec des biomasses non produites sur place.

Une étude de faisabilité serait donc à envisager afin de déterminer la possibilité de remplacer du charbon par du bois au cours de la prochaine décennie.

Il pourrait également être envisagé de cerner grossièrement dans cette étude à partir de quel prix de la tonne de $CO_2$ évitée et du prix du bois importé, il pourrait être intéressant de combiner la production d'énergie à partir des biomasses végétales importées avec le stockage géologique. Ces études de préfaisabilités puis de faisabilité pourraient être cofinancées par les industriels, Enercal et le gouvernement de la N.-C.

## Bibliographie

[15] Beaucoup de pays importent du bois rond pour la production de pâte à papier. Le Japon importe aussi des plaquettes blanches écorcées en vrac, dans de gros bateaux conteneurs.

BARNABA SUEBI, 2007 – From "Forest Crimes" to "Forests for life" The New policy for sustainable management in Papua by the governor of Papua Province. Document de 3 pages distribué à la COP de Bali.

CONVERY F., ELLERMAN D. *et al*, 2008 – The European Carbon Market in Action: Lessons Learned from the Firs Trading Period, CEEPR, Caisse dépôt.UCD, 42 p.

CRICKY P., RYNIKIEWICZ C., 2006 – Ulcos *Scenarios of energy and environment futures impacting the selection and diffusion of Ulcos technologies*, 2d Ulcos Seminar September 21-22 2006 Aveiro Portugal, cf. thèse Rynikiewicz.

DAMERON V., BARBIER C., 2005 – Les réductions potentielles d'émissions de $CO_2$ par des plantations forestières sur des terres agricoles dans le monde à l'horizon 2050. *Les Cahiers du Clip*, 41-92, http://www.iddri.org/

HOUSER T., BRADLEY R. *et al*., 2008 – "Leveling the carbon playing field International competition and US Climate Policy Design". Peterson Institute for International Economics and World Resources Institute, 95 p.

MANN M.K., SPATH P.L., 1999 – "The net $CO_2$ emissions and energy balances of biomass and coal power fired power systems". Proceeding of Fourth Biomass Conference of the Americas Oakland California, Edited by Ralph Overend and Estaban Chornet Elsevier Science 379 – 385.

MARCHAL D.R., CREHAY F. *et al*., 2006 – "Wood Pellets in Wallonia (Belgium): an evaluation of environmental impact", Pellets 225-227, conférence sur la biomasse Göteborg, Suède, mailto:marchal@cra.wallonie.be

PERTHUIS DE C., 2009 – *Et pour quelques degrés de plus*, Édité par Pearson, 306 p.

PLOUCHART G., FRADET A., 2005 – Évaluation du potentiel de capture et de stockage géologique de $CO_2$ dans le monde, *Les Cahiers du Clip*, 3-39, http://www.iddri.org/

RIEDACKER A., 1999 – L'acier vert du Brésil : des eucalyptus pour produire de l'acier, économiser des devises et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le Flamboyant spécial Eucalyptus *Bulletin du Réseau international Arbres tropicaux*, Édité par Silva, 53-55.

RIEDACKER A., 2009 – *Les biomasses dans le contexte du changement climatique et du développement durable*, pp 7-57 dans Guide Biomasse énergie, 389 p. sous la direction de Yves Schenckel et Boufeldja Benabdallah avec la collaboration d'A. Riedacker et de Y. Girard, Les publications de l'IEPF, Collection Point Repère 4.

RYCKMANS Y., MARCHAL D. *et al*., 2006 – "Energy balance and greenhouse gas emissions of the whole supply chain for the import of wood pellets to power plant in Belgium", Pellets 127-131, conférence sur la biomasse Göteborg, Suède, mailto:yves.ryckmans@laborelec.com

RYNIKIEWICZ C., 2007 – *Contraintes d'environnement global et changement technique induit : vers des trajectoires d'innovation radicales dans la sidérurgie*, thèse université Pierre-Mendès-France, Grenoble, II 270 p.

# 5. Les variations de stocks de carbone dans la végétation en Nouvelle-Calédonie

Au niveau global, la déforestation et la dégradation des forêts constituent une source d'émissions de GES supérieure au total du secteur mondial des transports. À l'inverse, la végétation et les boisements représentent un potentiel d'accroissement des stocks de carbone qui pourrait, sous certaines conditions et dans certaines limites, compenser une partie des émissions résultant de l'usage des combustibles fossiles et de la déforestation. Aussi, les aspects liés aux usages des sols, aux changements des sols et à la forêt ont été reconnus comme un « secteur d'activité » spécifique par la Convention sur le climat et par le protocole de Kyoto. Les questions relatives à la végétation et aux forêts sont donc intrinsèquement liées à l'inventaire et au bilan des GES, et sont ainsi susceptibles d'interagir de différentes manières avec les politiques énergétiques et industrielles.

Le but est ici de faire le point des connaissances – de fait, actuellement, très fragmentaires – sur la végétation forestière en N.-C.

La Convention sur le climat fait obligation aux États signataires de réaliser régulièrement des inventaires de la biomasse et du carbone stockés dans la végétation et les sols, en particulier au niveau des terres forestières.

Le protocole de Kyoto définit des obligations précises pour les pays industrialisés (dits de l'annexe I). La manière dont peuvent être prises en compte les variations de stocks de carbone des forêts et des changements d'utilisations des terres sous le protocole de Kyoto, notamment pour la première période d'engagement, est précisée ci-dessous ainsi que dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie ».

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons donc à la place de la forêt en N.-C., aux différents types de végétation forestière et aux processus, comme la déforestation ou le reboisement, susceptibles d'affecter le bilan des émissions de GES de la N.-C. Enfin, nous verrons quelle est la démarche d'inventaire forestier que la N.-C. devrait mettre en place pour suivre les obligations internationales dérivant de la Convention et du protocole de Kyoto sur le climat, soit dans le cadre de la France, soit de manière plus autonome, c'est-à-dire suivant l'une ou l'autre des options présentées dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie ». La précision des mesures demandée n'est pas la même dans les divers cas de figure.

## 5.1. Le contexte : les forêts et l'espace rural, aspects institutionnels et sociaux

### *5.1.1. Compétences respectives du gouvernement (Nouvelle-Calédonie) et des Provinces sur les questions forestières*

(éléments extraits de l'étude Davar, Hygen *et al*. 2006)

La N.-C. dispose d'un important domaine forestier public recouvrant la plus grande part des 11 900 km$^2$ constituant le « domaine privé » des collectivités publiques. Ce domaine des collectivités représentait (en 2001) 64 % de la surface totale de la N.-C., le solde étant constitué par 19 % de propriétés privées et 17 % de terres coutumières (inaliénables, incessibles, incommutables et insaisissables). La proportion de terres coutumières va de moins de 5 % dans les communes du Grand Nouméa à plus de 30 % dans plusieurs communes de la Province Nord. La gestion du domaine qui appartient à la N.-C. est une attribution du gouvernement (article 127 de la loi organique), gestion qui doit se faire « dans le respect des réglementations existantes, et notamment des réglementations provinciales dans les domaines relevant de la compétence des Provinces, et dans l'intérêt général ».

À la provincialisation (1989), le service des forêts de la N.-C. a été scindé, pour la Grande Terre, en un « service des forêts » en Province Nord (intégré dans la direction du développement économique et de l'environnement, DDEE), et en une « section forêt et bois » du service des productions végétales et des forêts en Province Sud (intégré à la direction du développement rural, DDR). Le gouvernement n'a conservé aucun service forestier (le service des Domaines n'opère aucune gestion technique), alors que la quasi-totalité du domaine forestier public reste sa propriété. Les Provinces sont investies de compétences réglementaires donnant la possibilité d'édicter des normes applicables à tout le territoire de la Province. Leurs agents assermentés ont la possibilité de constater les infractions faites sur le domaine privé de la N.-C. En pratique, le faible nombre de ces derniers, fait que la surveillance concrète n'est guère exercée.

Les opérations de reboisements actuelles sont réalisées par les Provinces, généralement sur les terres de la N.-C., ce qui entraîne la cession des terrains concernés. Plus de 7 000 ha de parcelles anciennement reboisées sont situées sur le domaine de N.-C., majoritairement en Province Nord, mais aussi en Province Sud.

L'exploitation forestière de la forêt naturelle par les sociétés privées se réalise sous forme de permis temporaires d'exploitation (PTE), délivrés par le service provincial compétent. Cela concerne 0,46 % du domaine de la N.-C. (Hygen *et al.*, 2006). Les prélèvements de moindre ampleur, opérés par des particuliers, relèvent de permis de coupe délivrés par les services provinciaux. Le fait que peu de demandes soient déposées signifie, qu'en pratique, les usages sont peu réglementés.

Plus du quart du domaine privé de la N.-C., soit 86 % des superficies sur terrains ultrabasiques, est d'ores et déjà grévé par des concessions minières. Cela pose la question des modalités de prise de décision, et notamment des rôles respectifs des collectivités publiques et des exploitants, quant aux futurs choix de défrichements sur ces superficies.

### *5.1.2. Les usages de l'espace rural*

Les contraintes de topographie et de qualité des sols pèsent fortement sur l'agriculture. Les meilleures terres sont occupées par l'arboriculture et le maraîchage. La surface agricole utilisée (SAU) correspondait à 13,5 % de la superficie du pays ; la surface agricole entretenue (SAE) représentait 57 % de la SAU, ce qui fait, par différence, une surface non utilisée ou peu entretenue de près de 110 000 ha, essentiellement des pâturages peu productifs (Recensement général agricole 2002, Davar-Isee, 2005). De fait, l'élevage, plutôt extensif (0,4 UGB/ha en moyenne) occupe 90 % de la SAU. Ce secteur est en déclin. À noter que si la SAU est passée, entre 1991 et 2002, de 12 % à 13,5 % de la superficie du pays (soit 20 000 ha d'après le RGA) la SAU entretenue a baissé de plus de 15 %.

Le prix du foncier privé semble devenir rédhibitoire (1 à 3 millions de FP/ha), pour le lancement d'activités agricoles (estimé à 3-4 fois ce qu'il devrait être pour des installations rentables), et ce même loin du grand Nouméa : en fait toute la côte ouest et même sa partie nord, suite à l'implantation d'une activité minière autour de Koné (Drafe, G. Beaudou et G. Falco, Comm. Pers.) Il y a une pression périurbaine pour les résidences secondaires, les domaines de chasse, etc. Il n'existe pas de mécanisme de préservation du foncier agricole, souvent vendu lors des successions en l'absence de retraite agricole : ce serait une des causes du déclin de l'élevage. Outil de réorganisation foncière, les Ogaf restent gérés par les services de l'État (Drafe) ; en N.-C., il s'agit de petites opérations qui n'ont jamais impliqué de volet de plantation à finalité forestière ou de production de biomasse. En 2002, la surface totale des exploitations comprenait, hors SAU, plus de 17 000 ha de friches non productives et près de

18 000 ha de « forêts naturelles », les reboisements ne s'élevant qu'à 632 ha dont la majorité a sans doute été réalisée avant 1990 (Davar-Isee, 2005).

### *5.1.3. Information sur les surfaces et les ressources forestières*

**a. Comment définir les terres forestières ?**

Parler de surfaces forestières impose de définir ce que l'on entend par « forêt ».

La définition retenue pour la mise en œuvre du protocole de Kyoto inclut simultanément trois critères, avec une latitude laissée à chaque « partie » (pays) pour fixer, une fois pour toutes, les valeurs minimales dans certaines plages. Ces critères sont la surface minimale de la formation classée (entre 0,05 et 1 ha), le couvert minimal de la végétation ligneuse (entre 10 % ou 30 % de la surface) et la hauteur potentielle minimale à maturité du peuplement (de 2 m à 5 m). Cette référence à une hauteur potentielle à maturité fait que tous les jeunes peuplements ligneux, appelés à croître par la suite, sont classables comme forêt. La même chose s'applique en cas de déboisement momentané : coupe avant régénération, etc. La définition de la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), très largement utilisée dans le monde, et retenue par l'étude récente du MAP en N.-C. (Durrieu de Madron, 2009)[16], inclut potentiellement des peuplements ouverts, de type savane ou pré-bois, qui ne relèvent ni de l'acception courante du mot « forêt » par les forestiers, ni de la plupart des typologies scientifiques de végétation. Cependant, la limite de 5 m exclurait une partie des formations arbustives basses, quoique parfois denses de type « maquis ».

Vis-à-vis du protocole de Kyoto, si chaque partie est libre de fixer une seule et unique valeur minimale pour chaque critère, ce choix est valable pour toute la durée de la première période d'engagement. Il fait partie intégrante du rapport de chaque Partie […]. Chaque Partie démontre dans son rapport que ces valeurs sont compatibles avec celles qui ont été communiquées par le passé à la FAO pour l'alimentation et l'agriculture ou à d'autres organismes internationaux et, si elles diffèrent, explique pourquoi et comment ces valeurs ont été choisies (Riedacker, 2005).

**b. Une information cartographique fragmentaire**

La seule couverture aérienne intégrale du Territoire remonte à 1954 ! Sur cette base, les travaux de l'inventaire forestier général de 1975 ont produit une carte des formations végétales de la Grande Terre et des Îles (CTFT 1975) qui distingue les formations suivantes : forêt dense sempervirente (23 %), formations à « Niaoulis[17] » (14 %), formations forestières diverses (1 %), maquis (25 %), fourrés (8 %), savane (22 %). Ces pourcentages se rapportent à la Grande Terre (la prise en compte des Îles ne les modifie que marginalement), à l'exclusion des surfaces agricoles ou habitées. Le complément correspondait, à l'époque, aux surfaces agricoles et habitées pour 5 % et 2 %, respectivement (Bavard, 1989). À noter, qu'en 2002, on arrive à une surface agricole entretenue (SAE) d'environ 7,5 % probablement comparable avec les 5 % mentionnés à l'époque.

*L'Atlas de la Nouvelle-Calédonie* (éditions IRD, 1981) présente une carte des principaux types de végétation qui est en cours d'actualisation.

La DTSI (service du territoire), qui a pour mission de centraliser et d'intégrer l'ensemble de l'information cartographique, vient de réaliser une cartographie complète de

[16] Ce dernier a retenu provisoirement comme critère de définition de la forêt une surface minimale de 0,05 ha et, à l'âge adulte, un couvert forestier de 10 % et une hauteur des arbres de 5 m. Mais on pourrait sans doute retenir une surface minimale de 0,5 ha ou de 1 ha.
[17] *Melaleuca quiquenervia* (Myrtacées).

l'occupation du sol et des principaux types de végétation (DTSI à paraître). La carte est faite sur la base d'une couverture complète impliquant 24 images satellitaires de type Spot5 (pixels de 10 m en mode multispectral), acquises principalement entre 2004 et 2006 (dates échelonnées à cause des problèmes de couverture nuageuse). La carte se veut générale et ne distingue que peu de classes concernant la végétation spontanée. Selon les auteurs (Y.-E. Boyeau et F. Guillard, Comm. Pers.), l'information Spot5 pourrait permettre d'aller plus loin moyennant un effort d'analyse/traitement de même ampleur que pour la carte générale (1 an d'ingénieur). Telle qu'elle va paraître, la carte distingue les types de peuplements végétaux suivants (les pourcentages s'entendent par rapport à l'ensemble du territoire) : forêt dense, sur sol volcano-sédimentaire ou ultrabasique (22 % et 9 %, respectivement), maquis dense para-forestier (8 %), végétation épaisse sur sol ultrabasique (4 %), maquis ligno-herbacé (9 %), végétation arbustive sur sols volcano-sédimentaire (14 %), savane (22 %).

Les différences de méthode et de nomenclature rendent les comparaisons impossibles avec la cartographie de 1975. Par exemple, la catégorie « forêt dense » occupe 31 % selon l'approche DTSI alors qu'elle ne recouvrait que 23 % selon la carte CTFT. La différence est probablement liée à des interprétations différentes des maquis hauts ou des savanes à boisements denses (Niaoulis). De fait, les continuums entre forêt dense et forêts dégradée, entre forêt ouverte et savane, entre maquis et fourrés de différentes hauteurs, rendent la recherche d'une cohérence intrinsèquement difficile, et exigent qu'une méthode de cartographie unique, robuste et reproductible soit définie et mise en œuvre pour le suivi multitemporel de la végétation, des surfaces forestières et de la biomasse. Nous y reviendrons.

## 5.2. La végétation de la Nouvelle-Calédonie

### *5.2.1. Principales caractéristiques du milieu physique*

La Grande Terre est divisée, sur toute sa longueur, par une chaîne centrale (altitude moyenne 1 100 m), qui culmine au Nord de l'île, au mont Panié à 1 628 m et au sud au mont Humboldt. Des chaînes secondaires se déploient selon des axes perpendiculaires, approximativement est-ouest. Les versants ouest sont prolongés par de larges plaines côtières, alors que les versants est sont abrupts et entaillés par des vallées profondes. Le sud de la N.-C. est un vaste plateau de roches ultrabasiques (altitude moyenne 250 m). La pente représente une contrainte forte pour la majorité des terres forestières domaniales de la N.-C.

### *5.2.2. Facteurs déterminant les variations de la végétation naturelle*

Trois facteurs expliquent les principales variations naturelles de la végétation de la N.-C., en particulier de la Grande Terre : l'opposition entre côte ouest (sèche) et côte est (humide), les variations d'altitude et les différences de substrat géologique. Les variations de précipitations résultent tout à la fois de l'opposition est-ouest et du gradient d'altitude. Dans les secteurs les plus élevés, une partie des précipitations s'effectue sous forme de brouillards.

L'influence de la géologie est flagrante au travers de l'opposition majeure entre roches ultrabasiques (encore dénommées ultramafiques, « péridotites ») et roches acides, de type volcano-sédimentaire. Les roches ultrabasiques occupent toute la partie sud de la Grande Terre, formant le « grand massif du sud » qui culmine à plus de 1 600 m au mont Humboldt. Ces roches se retrouvent sous forme de massifs particuliers dans la partie centrale et le long de la côte ouest de la Grande Terre. Les sols dérivés de ces roches, ferralitiques de type ferritiques, sont exceptionnellement pauvres en nutriments (Ca, P) et, à l'inverse, exceptionnellement riches en certains métaux (chrome, manganèse, nickel). D'où leur dénomination usuelle de « terrains miniers ».

Les îles Loyauté, relativement plates, ont un substrat caractéristique (calcaire corallien, plateau madréporique) et un relief karstique.

Ces facteurs naturels de variation de la végétation interagissent depuis au moins 4 000 ans avec l'impact – direct ou indirect –, des activités humaines, ces dernières s'étant diversifiées et amplifiées depuis l'arrivée des Européens. Parmi les effets anthropiques indirects, on peut citer l'introduction de nombreuses espèces végétales ou animales. Parmi ces dernières, le cerf rusa est en situation de surpopulation et représente, de ce fait, une contrainte systématique pour la végétation. Dans le même ordre d'idée, on peut aussi mentionner le bétail ensauvagé, en particulier les nombreux cochons.

Les feux dont la plupart sont d'origines anthropiques, sont sans doute la source d'impact humain parmi les plus anciennes et dont les effets sont parmi les plus étendus dans l'espace.

### *5.2.3. Une biodiversité exceptionnelle de par son originalité*

#### 5.2.3.1. Richesse et endémisme

La N.-C. est reconnue mondialement comme un des « point-chauds » de la biodiversité, dénomination qui exprime à la fois la richesse et l'originalité (endémisme) des formes biologiques, mais aussi les pressions et les risques qui pèsent sur les écosystèmes concernés. La vulnérabilité des espèces est accentuée en milieu insulaire, et les petites îles de la planète abriteraient environ un sixième du total mondial des espèces végétales menacées (Beauvais *et al.*, 2006). La N.-C. se signale avant tout par la richesse et la très grande originalité de sa flore. Sur 3 067 espèces indigènes (non introduites), 76 % d'entre elles sont endémiques, donc présentes nulle part ailleurs. L'endémisme se fait sentir au plus haut niveau taxonomique avec 5 familles et 107 genres strictement néo-calédoniens. Cette biodiversité exceptionnelle, héritage de l'histoire géologique (long isolement, spécialisation par rapport aux roches ultrabasiques), impose une attention patrimoniale particulière dans la gestion de la végétation forestière. Cette préoccupation s'est concrétisée par la création de réserves (notamment au cours des deux dernières décennies). Mais cela implique également l'adoption de « bonnes pratiques » concernant la gestion de l'ensemble du territoire, sans lesquelles la mise en réserve peut se révéler inopérante.

#### 5.2.3.2. La question des espèces potentiellement envahissantes

Parmi les devoirs patrimoniaux liés à la diversité de la N.-C., figure la vigilance face aux risques de prolifération d'espèces introduites dans les milieux naturels ou semi-naturels, ce qui définit la notion « d'invasion biologique » (Beauvais *et al.*, 2006). Ce devoir peut parfois entrer en contradiction avec des objectifs de foresterie intensive, visant à la production de biomasse ou au stockage du carbone. En effet, certaines espèces, dont la faculté de croissance très rapide est reconnue en Asie insulaire et dans le Pacifique, y sont aussi référencées comme envahissantes en dehors de leurs aires d'origine par la base de données de l'union internationale pour la conservation de la nature (UICN[18]). Parmi ces espèces peuvent être mentionnées *Paraserienthes falcataria*[19] et *Pinus Caribaea*, l'usage de ce dernier étant important dans les boisements forestiers en N.-C.

### *5.2.4. Principaux types de végétation*

Dans cette présentation rapide, nous présentons les forêts selon les grands types classiquement utilisés en N.-C., notamment dans les documents qui peuvent servir de

[18] *The Global Invasive Species Database of the Invasive Species Specialist Group* (ISSG), http://www.issg.org
[19] Synonymes : *Albizia falcataria, Falcataria moluccana.*

référence (Inventaire CTFT de 1975 ; Étude Davar 2006 (Hygen *et al.*, 2006) ; rapport MAP (Durrieu de Madron, 2009). Nous faisons ressortir quelques caractéristiques de structures forestières qui généralement influencent la biomasse sur pied et, indirectement, les stocks de carbone.

#### 5.2.4.1. Les forêts denses humides sempervirentes

Les versants de la chaîne centrale sont encore couverts par d'importants massifs de forêt dense humide sempervirente que l'on observe principalement sur roches acides (volcano-sédimentaires), soit environ 300 000 ha, dont les deux tiers en terrain domanial relevant de la N.-C., et, secondairement, sur roches ultrabasiques, soit près de 100.000 ha, dont plus de 4/5 en terrain relevant de la N.-C. (Hygen *et al.*, 2006). Indépendamment du substrat, ces forêts montrent aussi des variations en fonction de l'altitude au travers de leur composition floristique et, dans une moindre mesure, en termes de structure : densité d'arbres, hauteur de la canopée, etc. En dépit de ces variations, certaines constantes de ces forêts sont de présenter une canopée fermée, d'une hauteur d'environ 20 m en moyenne, composée principalement par des espèces à feuilles persistantes (sempervirentes[20]), d'où émergent nettement un nombre plus limités d'espèces : Araucarias, Kaoris, Houp (Nasi *et al.*, 2002). Une autre constante est l'abondance des palmiers, pandanus, fougères. La richesse spécifique et le niveau d'endémisme sont partout élevés, mais particulièrement marqués sur substrat ultrabasique et en altitude.

À moyenne altitude (300 à 1 000 m), les forêts s'observent surtout sur le versant ouest de la chaîne centrale, mieux protégé des vents et des cyclones, avec une majorité en Province Nord. Au-dessus de 1 000 m, la forêt est caractérisée par l'omniprésence des mousses et des lichens, par une canopée plus basse (dépassant rarement 10 m), la présence plus marquée de fougères et d'épiphytes, et par l'existence de sols (de type mor ou ranker) dont l'horizon organique superficiel épais atteint souvent plus de 20 cm. Les forêts de basse altitude sont aujourd'hui rares, limitées à la réserve de la Rivière bleue sur substrat ultrabasique et à quelques forêts très morcelées dans des vallées de la chaîne centrale ; les forêts de « chêne gomme », autrefois étendues sur la côte est à basse altitude ne sont plus représentées que par quelques peuplements ponctuels.

Les précipitations vont de 1 500 à 3 500 mm par an à moyenne altitude pour atteindre 4 000 mm au dessus de 1 000 m, avec quelques records (8-10 m) sur le versant est, près des crêtes. Ces forêts de montagne jouent donc un rôle important dans la régulation hydrologique, en réduisant les risques d'érosion, notamment grâce à la forte capacité d'absorption des sols ; elles augmentent la ressource en eau disponible en captant l'humidité des brouillards.

Sur roches ultramafiques, la forêt dense sempervirente est caractérisée par des espèces spécialisées, mais l'effet du substrat ne se traduit pas forcément sur la physionomie de la végétation en l'absence de perturbation humaine : hauteur modeste de la canopée, mais assez forte densité (la surface terrière est relativement forte dans les forêts primaires de la Rivière bleue). Une part importante de ces forêts a souffert de l'exploitation minière conjuguée aux incendies, notamment près des sommets de la côte ouest.

Les forêts denses des îles Loyauté sont observées sur plateaux madréporiques soulevés et leur strate arborée est généralement inférieure à 20 m ; *elles ne couvrent que de petites superficies, moins de 2 000 ha*, selon CTFT 1975, sur la base de photographies aériennes de 1954.

[20] En particulier, les genres *Metrosideros* sur roches acides et *Nothofagus* sur roches ultramafiques sont des constituants importants de la canopée.

#### 5.2.4.2. Les formations basses sur roches ultrabasiques (« maquis miniers »)

Il s'agit d'une formation basse, existant à l'état naturel, hors dégradation, avec faciès spécifique orophile près des sommets. Ces maquis sont composés d'une strate herbacée à cypéracées et d'une strate arbustive ou arborée (couvert fréquemment de plus de 10 %) pouvant parfois excéder 5 m de haut, sans compter la distribution lâche des *araucarias* et kaoris. Selon l'importance relative des composants on peut distinguer des faciès fortement herbacés, buissonnants ou arbustifs.

*Superficie : 450 000 ha (selon inventaire 1975, sur la base de photographies aériennes réalisées en 1954).*

#### 5.2.4.3. Les forêts sclérophylles

Il est probable que cette végétation, appelée aussi « forêt sèche », était autrefois répandue sur toute la côte ouest de la Grande Terre, à basse et moyenne altitudes (moins de 300 m), dans les zones de pluviométrie inférieure à 1 m/an. Ces forêts sont constituées par des arbres et arbustes sempervirents à feuilles adaptées à la sécheresse, petites, et à cuticules (sclérophylles). Les arbres sont de faibles dimensions (15 m de haut et 40 cm de diamètre pour les plus gros) et le sous-bois peut former des fourrés plus ou moins denses, avec peu d'herbacées. La richesse taxonomique n'égale pas celle de la forêt dense humide mais la flore de la forêt sèche est profondément originale avec de nombreuses espèces endémiques (10,4 % des espèces endémiques du pays). Comme presque partout dans le monde tropical, les formations végétales les plus sèches ont le plus souffert des activités humaines, des feux et de la pression des cervidés. On estime que les forêts naturelles sèches ne représentent plus que 1-2 % de leur aire naturelle d'origine. Elles font l'objet d'un programme de protection spécifique.

*Superficie : 4 000 ha (selon inventaire 1975, réalisé sur la base de photographies de 1954).*

#### 5.2.4.4. Savanes et formes de dégradation

Une savane est une formation végétale tropicale associant de façon durable strates herbacée et ligneuse, cette dernière pouvant être plus ou moins dense ou haute. Sous des conditions climatiques ou édaphiques favorables à la végétation ligneuse, comme c'est le cas sur l'essentiel du territoire de la N.-C., le contrôle de la strate ligneuse et la persistance de la strate herbacée sont généralement assurés par un régime de feux à faible temps de retour. Les savanes sont essentiellement observées sur la côte est de la Grande Terre, sous les conditions climatiques les moins arrosées ; elles peuvent être interprétées comme des formes de dégradation de la forêt sclérophylle sous l'effet historique de la coupe de bois, des feux et du pâturage par le bétail ou les cervidés. En N.-C., on ne relève pratiquement pas d'étude sur ces savanes et sur les déterminants – édaphiques ou dynamiques (feux) – de leurs différents faciès, et en particulier, sur les variations du couvert arboré, qui peut varier de moins de 10 % à plus de 60 % (CTFT 1975). Le Niaouli est généralement l'espèce arborée dominante même si son abondance locale est souvent décrite comme associée au caractère plus ou moins marécageux de la savane. Un autre aspect, peu documenté, bien qu'important pour la compréhension du régime des feux, concerne la nature et la composition de la strate herbacée. Les relations dynamiques entre forêts, fragmentées ou dégradées, et savanes restent très peu explorées bien que faisant l'objet d'études en cours (projet INC, financé par l'ANR) qui devraient apporter des éléments importants pour la compréhension des dynamiques en cours et de futurs choix de gestion.

*Superficies : sur la base des photographies aériennes de 1954, l'inventaire (CTFT 1975) fait état de 230 000 ha de formations savanicoles « à Niaouli », de 370 000 ha de « savanes » et de 220 000 ha de « fourrés » (dont 36 % dans les îles).*

#### 5.2.4.5. La contrainte des feux

Si l'écobuage est une pratique ancienne et courante de toutes les sociétés humaines, cette dernière devient particulièrement prégnante en contexte tropical, dès lors que le climat présente des saisons sèches et pluvieuses fortement contrastées. Les très fortes quantités de biomasses, notamment herbacées, produites en saison des pluies sont bien supérieures à ce que l'on peut observer en contexte méditerranéen ou tempéré. Une fois desséchée avec la fin ou l'espacement des pluies, la biomasse herbacée ou sous-ligneuse forme un combustible idéal. Les raisons de mise à feu sont multiples ; elles résultent souvent de la volonté de « dégager » le terrain d'une biomasse à bien des égards gênante – obstacle, présence d'insectes, fourmi électrique en N.-C., de serpents –, biomasse pouvant parfois être dangereuse en cas de feux accidentels. Les mises en cultures et la chasse sont aussi fréquemment évoquées comme justifications à la mise à feu dans le contexte néo-calédonien. Dans tous les cas, les surfaces effectivement brûlées peuvent parfois largement excéder les intentions initiales de la mise à feu. La facilité de propagation du feu invite aussi à la malveillance, en cas de litige foncier ou de conflits divers : restriction d'accès, interdiction de chasse, de coupe de bois, etc. Il s'agit alors de marquer son emprise sur une portion de territoire ou d'affirmer des droits d'usage implicites ou contestés. Ces motivations et comportements ne sont pas spécifiques à la N.-C.

Régime des feux et composition de la végétation sont intrinsèquement liés par des boucles de rétroaction. L'ouverture du couvert forestier et le développement concomitant des végétations herbacées ou sous-ligneuses, facilement desséchées, favorisent un régime de feux à forte fréquence de retour. Les caractéristiques de ce dernier vont influencer la composition floristique et la physionomie de la végétation en faveur d'espèces et de types biologiques « pyrophiles », à même de se perpétuer malgré les incendies récurrents. Réciproquement, ces espèces ont souvent des caractéristiques favorisant l'incendie au travers d'une biomasse accumulée à faible hauteur et se desséchant facilement : vigueur de la reproduction végétative après passage du feu (rejet de souche, tallage), aptitude à la production rapide de biomasse labile. À titre d'exemple, on peut citer les grandes graminées tropicales à souches pérennes (Andropogonées notamment) adaptées à une production élevée de biomasse (souvent 10 t/ha en quelques mois) grâce à une photosynthèse en C4. Un autre exemple est *Pteridium esculentum* (fougère) qui progresse grâce aux incendies dans le maquis sur substrat ultrabasique et, en retour, favorise ces derniers, avec le risque de substitution du maquis par une fougeraie pyrophile (Jaffré *et al*. 1998). D'autres végétaux se caractérisent par leur inflammabilité, notamment les résineux comme *Pinus Caribaea*, naturalisés à partir des plantations, et dont la dissémination représente une augmentation des risques de feu.

Les conséquences des feux sont différentes en fonction de la végétation. L'incendie des végétations forestières, sempervirentes comme sclérophylles, ouvre généralement un cycle de dégradation (série régressive) caractérisé par une perte de diversité et des physionomies végétales plus basses, plus ouvertes – donc plus favorable au feu – et à biomasse nettement plus faible. L'effet du déstockage de carbone se fait alors sentir à la fois sur la biomasse végétale aérienne (épigée), racinaire (hypogée) et sur la matière organique du sol. À l'inverse, les formations de type savane, peuvent souvent – mais pas toujours – présenter des faciès et des niveaux de biomasse en équilibre dynamique avec des régimes de feu à fort temps de retour. Le maquis ultrabasique (ultramafique) semble présenter un bon

pouvoir de reconstitution (grâce à l'efficacité de la reproduction végétative[21]), en composition comme en biomasse, après un incendie exceptionnel, tout en étant probablement très vulnérable face à des retours de feux rapprochés.

Les surfaces brûlées ont pu atteindre 50 000 ha certaines années, pour une moyenne de 20 000 ha parcourus par an (F. Guillard DTSI, comm. Pers.), mais il n'y a pas vraiment de bilan annuel consensuel. Les essais de cartographie à partir d'images satellite Modis, qui indiquent les foyers actifs et non directement les surfaces brûlées, ne concordent pas avec les estimations de la protection civile. Toute estimation de ces surfaces devra être relativisée en fonction des formations végétales affectées, puisque les conséquences d'un feu peuvent être très différentes, en termes écologiques comme en termes de carbone relâché.

Un programme de recherche sur la prévention des incendies, à laquelle participent les gestionnaires des forêts sèches et le WWF est en cours, en commençant par une analyse des causes des mises à feu**.**

#### 5.2.4.6. Une première tentative d'estimation des stocks de carbone dans la végétation de Nouvelle-Calédonie

**a. Principes de l'estimation** (d'après l'étude MAP, Durrieu de Madron, 2009)

- utilisation des volumes « fûts » (en $m^3$/ha), calculés par l'inventaire CTFT de 1975, par les inventaires des années 1980-1990 localisés dans les meilleures forêts, et par des inventaires spécifiques hors de la Grande Terre. Ces inventaires ne prenaient en compte que les arbres ayant plus de 30 cm ou 40 cm diamètre (« précomptage ») ;
- extrapolation à des volumes « fûts » (en $m^3$/ha) correspondant au seuil de précomptage de 10 cm, relativement classique en milieu tropical, en utilisant les références disponibles sur quelques distributions de fréquences par classes de diamètre (inventaires écologiques de l'IRD, dont Muzinger *et al*., 2007) ;
- passage du volume « tronc » (dit aussi « commercialisable ») en $m^3$/ha à la biomasse correspondante, *via* la densité spécifique du bois ; puis calcul de la biomasse épigée totale des arbres (souches, branches, etc.) par l'application d'un facteur d'expansion de la biomasse (FEB, Giec, 2006) ;
- passage de la biomasse arborée épigée à la biomasse totale, en incluant des estimations des autres composantes de la biomasse végétale (lianes, nécromasse ligneuse, racines, biomasse du sol) ;
- calcul du contenu en carbone de la biomasse totale Giec 2006[22] et ajout de la quantité de carbone de la matière organique du sol selon les ordres de grandeur spécifiques (Durrieu de Madron, 2009) mentionnés au tableau 8[23].

La grande pauvreté des informations spécifiques à la N.-C. a contraint l'auteur à de nombreuses approximations ou extrapolations de données provenant de la littérature mondiale, approximations incontournables en l'état actuel des connaissances[24].

---

[21] Logique d'autosuccession (Jaffré *et al.*, 1998).
[22] Ce ratio a été pris par l'étude citée à la valeur classique de 0,475 tC/tonne de matière sèche de biomasse.
[23] À noter que les valeurs retenues par l'auteur en fonction de la littérature sont supérieures à celles proposées par le Giec 2006, qui ne prennent en compte que les 30 premiers cm du sol.
[24] Les coefficients FEB utilisés couvrent des valeurs allant de 1,3 (conifères) à 3,1 (feuillus de la forêt dense) conformément à Brown (1997) ; les densités spécifiques sont majoritairement tirées de l'Atlas des bois de la N.-C. (CTFT) et de références mondiales, extrapolées par familles ou genres botaniques.

### b. Résultats des estimations

Les résultats obtenus par grands types de forêts (tableau 8) ne doivent donc être considérés, et avec prudence, que comme des ordres de grandeur. On peut noter que les valeurs estimées pour les forêts denses sont relativement élevées compte tenu des hauteurs de canopée relativement basses (rarement plus de 25 m) qui caractérisent les forêts de N.-C. Cette question pourrait être approfondie, mais cela demanderait un travail plus spécifique et des données (comme des estimations de la biomasse totale pour des arbres abattus) actuellement non disponibles. Quoi qu'il en soit, on peut sans doute retenir des valeurs de 180 à 190 t de matière sèche/ha pour la biomasse épigée comme une fourchette supérieure, correspondant à des forêts en bon état, pour la plupart non exploitées. Ces valeurs ne prennent pas en compte les surfaces exploitées depuis les inventaires de référence, qui traitaient majoritairement de forêts à biomasse relativement forte.

**Tableau 8 – Principaux résultats de l'estimation de la biomasse et des stocks de carbone dans les principales formations boisées de Nouvelle-Calédonie**

| | Volume inventaire fût (troncs) en $m^3$/ha | Biomasse arborée épigée en t/ha | Biomasse totale en t/ha | Quantité de carbone en tC/ha (dont quantité prise pour le carbone du sol entre parenthèses) |
|---|---|---|---|---|
| **Forêt dense sempervirente** | 100 | 190 | 230 | 210 (100) |
| **Forêt dense sempervirente sur calcaire (îles)** | 90 | 180 | 220 | 160 (60) |
| **Savanes à Niaoulis** | 40* | 140 | 160 | 140 (60) |
| **Forêt sclérophylle** | 40 | 90 | 110 | 130 (60) |
| **Peuplement à *Araucaria columnaris*** ** | 200 | 120 | 140 | 120 (60) |
| **Plantations pins** | 170 | 100 | 120 | 120 (60) |
| **Plantations (*Araucarias*, Kaoris)*** ** | 40 | 20 | 25 | 50 (40) |
| **Cocoteraie***** ** | 360 | - | 285 | 200 |
| **Mangrove** | - | 150 | 190 | 170 (80) |

*** Mais grande variabilité de densité des arbres donc de la biomasse ; ** dans les îles ; ***de moins de 20 ans pour la plupart ; **** extrapolation directe de l'estimation à Wallis.**

**Source : d'après L. Durrieu de Madron, 2009, étude MAP.**

Parmi les formations boisées décrites dans le tableau, les forêts denses et les savanes à Niaoulis, représentent, de loin, les superficies les plus importantes avec, respectivement, 59 % et 36 % dans la cartographie de 1975. Concernant les savanes, une grande incertitude subsiste

compte tenu du flou entourant leur définition (par rapport à la forêt dégradé et à d'autres formations) et aux fortes variations dans l'espace de la densité de leur strate arborée.

Moyennant les nombreuses incertitudes sur les valeurs intervenant dans les différentes phases du calcul, Durrieu de Madron (2009) retient une valeur moyenne de *183 tonnes de C par ha* pour les végétations naturelles de la Grande Terre. Ce chiffre s'entend hors plantation, ces dernières ne concernant pas de grandes superficies. L'extrapolation à une quantité totale, à l'échelle de l'ensemble des « végétations forestières » du territoire, est encore plus incertaine, compte tenu du manque de données actualisées sur les surfaces, mais en prenant les surfaces totales estimées par l'interprétation des photographies aériennes de 1954 (CTFT 1975), soit 630 084 ha, l'on obtiendrait 115 Mégat de C (115 Téra grammes). Au-delà de ce chiffre, fortement sujet à caution, il faut retenir que les données disponibles ne permettent pas de donner une estimation conforme aux normes internationales. En effet, sous la Convention, les signataires s'engagent à effectuer des inventaires des émissions par les sources donc en provenance des forêts et des absorptions par les puits pour contribuer au recensement des émissions de GES par pays. Les premières informations reprises ci-dessus sont donc largement insuffisantes pour déterminer *précisément* les variations de stocks de carbone en forêt néo-calédonienne. Dans la suite, nous allons analyser qualitativement les différents facteurs pouvant faire varier ce stock.

Sous la Convention, les signataires s'engagent à effectuer des inventaires des émissions par les sources donc en provenance des forêts et des absorptions par les puits pour contribuer au recensement des émissions de GES par pays. Ces premières informations sont donc totalement insuffisantes pour déterminer *précisément* les variations de stocks de carbone en forêt néo-calédonienne. Il n'est pas encore possible de donner une estimation précise du stock total de carbone dans les écosystèmes forestiers en N.-C.

On va maintenant tenter de voir les déterminants des variations des stocks de carbone.

## 5.3. Quelles capacités d'augmentations de stocks de carbone et quels risques de diminutions des stocks moyens dans ces diverses formations végétales ?

### *5.3.1. Augmentation : les reboisements forestiers et la revégétalisation*

#### 5.3.1.1. Les reboisements forestiers

En N.-C., les essais et programmes de reboisement remontent aux années 1970 avec le test d'espèces exotiques – eucalyptus (collaboration avec le CSIRO), pins tropicaux –, et autochtones – kaoris, araucarias, chêne gomme, la plantation de ces dernières se révélant possible sur substrat ultrabasique. Parmi les espèces introduites, le *Pinus Caribaea* (var. *Hondurensis*) et, à un degré moindre, le *Pinus elliottii* se sont alors révélés comme les plus adaptés et on été les plus utilisés. L'essentiel de ces reboisements « historiques » (années 1970-1980) en pins a été réalisé dans la Province Nord. Sur 4 600 ha réalisés, seulement 2 800 ha seraient dans un état acceptable ou dans des conditions satisfaisantes d'accessibilité (Hygen *et al*., 2006), essentiellement dans le secteur de Tango. (Des surfaces plus faibles sont mentionnées par Durrieu de Madron (2009).

Depuis la provincialisation, ce sont les services provinciaux (DDR et DDEE au sud et au nord, respectivement) qui sont en charge du suivi des plantations (pour la plupart situées sur le domaine foncier de la N.-C.), ainsi que de la création de nouveaux reboisements. Dans les deux Provinces, l'objectif principal est de proposer de l'activité en milieu rural et, si possible, fournir des produits à l'usage du marché intérieur. La N.-C. est très largement déficitaire en produits forestiers, en bois d'œuvre et bois de service, en particulier. On estime que le taux de couverture des besoins a reculé ces dernières années de 30 % à 20 % (F.

Mademba-Sy, Comm. Pers.), principalement sous l'effet de la hausse de la demande. Néanmoins, les taux de couverture mentionnés par Bavard (1989) semblaient déjà être dans cette fourchette. Les principales importations se font à partir de la Nouvelle-Zélande (*Pinus raddiata* notamment).

En **Province Sud**, la DDR affiche une politique ambitieuse (forêt parmi les filières « prioritaires », recrutement récent d'un ingénieur pour renforcer la « cellule forêt ») et estime à 1 300 ha les surfaces de terres forestières reboisées depuis 1989-1990 (F. Mademba-Sy, Comm. Pers.). Il semble que l'essentiel de ces reboisements ait été mené sur terrains publics non agricoles. Chaque opération de reboisement réalisée sur le domaine privé de la N.-C. fait l'objet d'une demande de cession (à priori toujours accordée) à la Province, ce qui contribue à la création d'un domaine forestier provincial. Les reboisements dans le sud de la Province étaient principalement en *Pinus Caribaea var. hondurensis*, maintenant arrêtés, compte tenu de la faculté de l'espèce à essaimer dans le maquis minier et à y augmenter les risques d'incendie (J. Muzinger Comm. Pers.). La DDR a d'ailleurs mené des opérations d'arrachements autour de certaines de ses plantations, dans les zones « d'intérêt écologique ». En même temps, elle assure la gestion (éclaircies, etc.) de boisements de *Pinus* « naturalisés » dans l'île des Pins (J. Muzinger Comm. Pers.). Le total des plantations en Province Sud est de 1 700 ha (dont 10-20 % d'araucariacées, relativement jeunes), dont 600 ha datent d'avant 1990 et sont en mauvais état, et 1 100 ha après 1990 (Durrieu de Madron, 2009, p. 24). Le temps de rotation des pins est d'environ 30 ans, de l'ordre du siècle pour les Kaoris et de 60 ans pour les *Araucarias*.

Les reboisements actuels et futurs sont plutôt tournés vers les essences locales (Kaoris, Araucarias), malgré encore quelques incertitudes techniques (F. Mademba-Sy, Comm. Pers.). Le système de fourniture de semences aux pépiniéristes privés, jusque-là entièrement assuré par l'IAC a été jugé peu satisfaisant, avec recrutement d'un ingénieur Inra détaché en appui aux pépiniéristes privés. La plus grosse pépinière privée est Siras Pacifique (Nouméa – Païta). Il n'y a encore que peu ou pas de reboisements privés. Un effet est attendu des nouvelles dispositions du code de l'investissement qui prévoient une aide à hauteur de 80 % pour les reboisements privés (F. Mademba-Sy, Comm. Pers.).

En **Province Nord**, les surfaces reboisées sont de l'ordre de 15 ha/an (M. Brinckert, Comm. Pers.), après avoir peut-être atteint 30 ha/an (R. Poutyela, Comm. Pers.), il y a quelques années. Le cumul planté, sur des terres forestières, depuis 1990 serait de l'ordre de 300 à 600 ha (Durrieu de Madron, 2009).

Dans l'absolu, les surfaces adéquates (couvert dégradé en contexte naturel pertinent) ne semblent pas actuellement limitantes, et sans doute moins qu'en Province Sud. Mais le montage de projets sur foncier coutumier (et ailleurs) est un processus lent impliquant des négociations. Les boisements concernent cinq à six essences susceptibles de valorisation économique (notamment bois d'œuvre), dont Agathis, *Araucaria*, Faux-Tamanou, Gaiac. Après quelques années, les surfaces suffisamment entretenues et protégées (feux, cerfs) pour donner un peuplement viable – donc une biomasse sur pied excédant substantiellement la végétation dégradée spontanée – semblent, là encore, ne pas dépasser la moitié des surfaces reboisées en forêt (150 à 300 ha).

Les perspectives de reboisement restent limitées. Outre le problème des essences utilisables – potentiel d'envahissement du *Pinus Caribaea*, maîtrise technique encore limitée des espèces locales –, la double contrainte de la disponibilité foncière et de conditions naturelles acceptables avec des précipitations supérieures à 1 200 mm par an et surtout de pentes pas trop fortes, restreint les reboisements envisageables.

Les superficies relevant du domaine privé de la N.-C. et présentant des caractéristiques naturelles favorables en vue d'une exploitation ne semblent pas excéder 1 000 ha en Province Sud, d'après les estimations de la Davar (Hygen *et al.*, p. 94).

En Province Nord, les surfaces potentiellement reboisables sont peut-être plus étendues, sans pour autant excéder quelques milliers d'hectares. Le potentiel reboisement en terrain privé est aujourd'hui encouragé et de développement récent. Il est plus difficile à cerner.

Il est tentant de porter son regard sur les superficies mentionnées comme « friches » dans les statistiques des exploitations agricoles, soit 17 000 ha selon Isee/Davar (2002). Mais ces surfaces relèvent probablement en majorité des zones peu arrosées de la côte ouest et il n'est, de plus, pas certains que les propriétaires souhaiteront y mener des activités de boisement. Il n'y a donc pas de garantie, en l'état actuel des informations, que la mobilisation de terrains privés pour le reboisement ait été significative. De plus, pour qu'il y ait des reboisements, il faut qu'il y ait des acteurs qui aient intérêt à le faire (Tiger, 1999).

Face aux limites imposées par les conditions naturelles, on pourrait objecter que des reboisements à seule finalité de « puits » de carbone, c'est-à-dire pour augmenter les stocks de carbone (il faut en effet toujours considérer les variations de stocks) pourraient concerner des conditions physiques relativement peu favorables, puisqu'il ne serait pas nécessaire de récolter le bois dans ces forêts. Ce serait oublier le surcoût des travaux (accès, regarnis) et de la maintenance (protection) dans des conditions plus difficiles, ainsi que le risque, *in fine*, que la quantité de carbone stockée dans des conditions de plantations marginales reste médiocre.

Comme les expériences passées l'ont montré, la réussite de toute plantation reste soumise aux aléas des feux, au broutage par les cerfs, à la question du foncier, et bien évidemment lorsqu'il s'agit d'inciter des particuliers à planter, à la rentabilité économique.

#### 5.3.1.2. Revégétalisation des sites miniers

Jusqu'à l'adoption récente du nouveau code minier, la revégétalisation des sites miniers restait liée à la bonne volonté des industriels. En Province Nord, il y a eu un cas d'annulation d'un projet ambitieux sans considération pour les petits pépiniéristes parties-prenantes. Le nouveau code minier joue sur l'incitation fiscale. Un travail spécifique de la DTSI estime à 20 000 ha le cumul des surfaces dégradées par l'activité minière. On parle de sites « orphelins » lorsque les exploitants actuels n'ont pas (ou plus ?) de responsabilité vis-à-vis des surfaces dégradées.

Actuellement, l'effort de réhabilitation dépasse à peine 100 ha par an sur l'ensemble de la N.-C. Il pourrait être porté prochainement à 200 ha (« Il y en aurait alors pour un siècle pour revégétaliser ces sites ! »).

*L'accroissement des stocks de carbone sur ces sites restera en général assez faible.*

En effet, les questions techniques sont loin d'être complètement maîtrisées face à des situations de très fortes contraintes édaphiques (Jaffré *et al.*, 1993), et le potentiel de croissance de la végétation réimplantée est faible (T. Jaffré Comm. Pers.). En outre le recours à des amendements risquerait de favoriser des espèces envahissantes (J. Muzinger, Comm. Pers.). La revégétalisation n'a pas pour objectif de constituer un boisement productif, juste de recréer un couvert végétal. Même en cas de succès – pas toujours acquis et longtemps fragile –, les augmentations de biomasses resteront modestes.

### *5.3.2. Causes de diminution des stocks*

#### 5.3.2.1. Défrichement et urbanisation

Nous avons vu que l'extension de la surface agricole utile a concerné 20 000 ha entre 1991 et 2002 (ce qui n'empêche pas que la surface agricole entretenue ait baissé de 15 % dans l'intervalle), soit sans doute nettement plus que l'extension des habitations et des infrastructures pour laquelle nous ne connaissons pas de chiffre global. Dans les deux cas, les défrichements se sont probablement faits au détriment de savanes ou de forêts dégradées et non de forêts denses, sans qu'il soit possible de préciser. À titre de comparaison, l'emprise des ZAC de Dombéa et Panda, opération d'extension urbaine d'une ampleur exceptionnelle, est de 400 ha (source : Province Sud).

#### 5.3.2.2. Exploitation forestière

En forêt naturelle, l'exploitation a toujours été de type sélectif, un nombre limité d'essences étant particulièrement recherchées, quatre espèces représentant 80 % de la production (Tamanou, Houp, Kaoris, « Hêtre » ; Bavard, 1989). L'instauration des permis temporaires d'exploitation (PTE) a permis un suivi assez précis des volumes et surfaces exploitées, et la mise en place de règles simples : diamètre minimal de coupe (environ 50 cm), identification, numérotation et consignation des arbres à réserver (c.a.d. à protéger pour l'avenir pendant l'exploitation), suivi et « recollement » de tous les arbres exploités par un agent. Bavard (1989) estime que, depuis la seconde guerre mondiale, l'exploitation forestière a parcouru 40 000 à 50 000 ha pour un prélèvement sélectif de 15 à 20 $m^3$/ha de grumes (volume fûts). À noter que ces valeurs de prélèvement, similaires à celles observées en Guyane (14 $m^3$/ha en moyenne ; Guitet *et al*., 2006) pour des biomasses épigées 1,5 fois plus élevées, semblent correspondre à un taux de prélèvement sensiblement plus fort. En Guyane, le prélèvement de 14 $m^3$/ha débouche sur une perte de biomasse épigée de 45 t/ha. Faute de référence spécifique à la N.-C., un ordre de grandeur de 50 t/ha pourrait permettre de fixer les idées sur le déstockage en forêt naturelle durant les dernières décennies.

Dans la décennie 1980, la production totale annuelle était d'environ 14 000 $m^3$ grume ; 700 à 900 ha étaient exploités annuellement. On peut donc penser que depuis les inventaires qui ont permis d'évaluer les valeurs de biomasse sur pied du tableau 8, environ 20 000 ha de forêts ont été exploités, et que, sur cette superficie, les valeurs de référence mentionnées pour la forêt dense (cf. tableau 8) ont pu être substantiellement diminuées, disons d'environ 25 %.

*Compte tenu d'une reconstitution relativement lente (cf. ci-après), on peut penser qu'une partie de la forêt n'est pas aujourd'hui revenue à une valeur d'équilibre et qu'il pourrait donc y avoir eu une diminution du stock moyen de carbone en forêt. Mais cela permettra d'augmenter les stocks par la suite.*

Le système des PTE n'a pas réussi à garantir la pérennité des prélèvements, et des inquiétudes on été exprimée concernant la résilience des écosystèmes de montagne calédoniens. De fait, aucun site exploité au cours des 30-40 dernières années n'a fait l'objet d'une seconde coupe. L'inventaire postexploitation du chantier pilote de l'Aoupinié (Province Nord) aboutit à des conclusions assez pessimistes, malgré un niveau de préparation et de suivi des travaux – notamment en ce qui concerne l'implantation des pistes – qui se voulait supérieur à la pratique courante. Cette étude menée en 1996 (Cirad-Forêt *in* Hygen *et al*., 2006) constate, pour un taux de prélèvement conforme à la moyenne calédonienne, une dégradation sanitaire des arbres réservés, l'absence de croissance significative en volume de ces derniers après exploitation, l'envahissement par les espèces héliophiles (23 % de la surface) qui bloque la régénération des espèces recherchées, et des signes nets d'érosion sur

les pistes (6 % de la surface). Sur cette base, le rapport (Hygen *et al*., p. 65) conclut : « Ce constat place les exploitations forestières (en forêt naturelle) menées en N.-C. dans la catégorie des exploitations typiquement "minières" qui laissent derrières elles des peuplements ruinés (tout au moins en termes des essences les plus recherchées), incapables de se reconstituer dans un laps de temps de quelques dizaines d'années, et qui présentent en de nombreux endroits des traces de dégradation irréversibles du milieu ». Cette prise de conscience conjuguée au contexte socio-économique (malgré une subvention des travaux), mène à un déclin de l'activité qui semble inexorable.

En Province Sud, l'exploitation de la forêt naturelle sera stoppée en 2012 **(**dernier permis en cours au col d'Amieu).

L'influence de la récolte en forêt naturelle sur les variations de stocks de carbone est en train de devenir négligeable. La reconstitution de la biomasse dans les zones anciennement exploitées pourrait peut-être conduire à un accroissement du stock.

#### 5.3.2.3. Les feux

Des modifications de régime d'El Niño dans la zone Pacifique pourraient aussi renforcer la fréquence des périodes et années sèches, ce qui pourrait accroître les risques de propagation des incendies. Les recherches en cours (projet ANR INC) en N.-C., avec des chercheurs de la N.-C. et le WWF, devraient améliorer les connaissances sur les causes des feux, notamment sur celles d'origines sociales, et sur les risques de feu.

#### 5.3.2.4. L'extension des surfaces minières

Dans la zone géologique ultrabasique, convoitée pour l'exploitation du nickel, une grande partie de la superficie forestière subsistante est grevée par des concessions minières. Ces dernières représentent environ 30 % de la superficie des forêts situées sur le domaine de N.-C., tous substrats confondus (Hygen *et al*., 2006).

En l'absence d'information plus précise sur le rythme de défriche dans les concessions, on pourrait donner une estimation des surfaces affectées annuellement, en faisant l'hypothèse que les 20 000 ha dégradés par l'exploitation minière l'ont été au cours des 50 dernières années, ce qui ferait un rythme annuel d'environ 400 ha.

Sous la comptabilité de Kyoto, les déstockages de carbone correspondant aux déboisements (pour causes agricoles, urbaines, ou minières) devraient être inventoriés obligatoirement sous l'article 3.3, tout comme les augmentations de stocks dans des boisements effectués sur des terres agricoles (définition plus restrictive que le sens que donnent les forestiers au terme « reboisement »).

### 5.4. Conséquences par rapport aux engagements demandés aux pays de l'annexe 1 sous la Convention et sous le protocole de Kyoto[25]

Nous retenons l'hypothèse que, conformément à son revenu par habitant, la N.-C. relève des pays « industrialisés » de l'annexe I. Le raisonnement ci-après se place dans l'hypothèse d'une éventuelle mise en conformité de la N.-C. par rapport aux exigences du protocole de Kyoto.

[25] Les variations de stocks dans les parcs naturels car d'origine non anthropique directe ne sont pas comptabilisées sous le protocole de Kyoto. En revanche les variations de stocks d'origine anthropique dans les parcs régionaux, qui relèvent des articles 3.3 ou 3.4, doivent être comptabilisées.

### *5.4.1. Les inventaires des variations de stocks demandés aux pays de l'annexe I sous la Convention*

L'article 4.1a relatif aux inventaires des émissions de GES précise qu'il faut recenser toutes les émissions par les sources et tous les prélèvements par les puits.

*Considérées dans le cadre de la France ces variations de stocks de carbone en forêt néo-calédonienne seraient faibles. Mais il faudrait tout de même les recenser précisément, d'où des coûts supplémentaires.*

### *5.4.2. Les inventaires sous l'article 3.3. du protocole de Kyoto*

Article 3.3 :

*« Les variations nettes des émissions de gaz à effet de serre par les sources et l'absorption par les puits résultant de l'activité humaine directement liée au changement d'affectation des terres et à la foresterie et limitées au boisement, au reboisement et au déboisement depuis 1990, variations qui correspondent à des variations vérifiables des stocks de carbone au cours de chaque période d'engagement, sont utilisées par les parties visées à l'annexe I (par les pays industrialisés), pour remplir leurs engagements (de limitation et de réduction des émissions de gaz à effet de serre) prévus au présent article. Les émissions des gaz à effet de serre par les sources et l'absorption par les puits associées à ces activités sont notifiées de manière transparente et vérifiable et examinées conformément aux articles 7 et 8. »*

Tout pays de l'annexe I ayant pris des engagements sous le protocole de Kyoto a l'obligation de faire ce bilan de carbone pour la période 2008-2012. On peut comptabiliser les accroissements de stocks des boisements d'origine directement humaine de terres non forestières effectués depuis 1990.

**Au débit du bilan**, défini par l'article 3.3. (déboisement) il faut noter la diminution des stocks de carbone, entre 2008 et 2012, résultant des activités suivantes :

– l'extension urbaine ou la création d'infrastructures ;

– le défrichement pour raisons agricoles, évalué à 20 000 ha entre les deux recensements agricoles de 1991 et 2002 (Davar/Isee) ;

– l'extension des surfaces d'exploitation minière (peut-être 400 ha par an).

**Au crédit du bilan** il faut relever (depuis 1990) : les augmentations des stocks de carbone, mais seulement entre 2008 et 2012, dans les boisements sur terres agricoles à partir de 1990 et de boisement des terrains miniers qui n'étaient plus considérées comme des forêts en 1990 (c'est-à-dire qui ont été défrichées avant et non reboisées avant 1990). Les boisements de terrains miniers forestiers, défrichés après 1990 puis reboisés, ne peuvent entrer dans cette catégorie.

Il faut cependant remarquer que l'essentiel des reboisements réalisés depuis 1990 l'a sans doute été sur des terrains publics non agricoles, même s'il s'agissait probablement de végétation dégradée. Ces boisements ou reboisements ne peuvent donc être considérés sous cet article 3.3.

La date de référence concernant l'affectation officielle des terres (forêt vs. non forêt) est 1990, ce qui pose le problème fondamental d'absence, en N.-C., d'information cartographique ou autres (photos aériennes) pouvant faire référence concernant l'affectation des terres à cette date. L'exploitation fine des résultats du recensement agricole pourrait être

utile. Encore faudrait-il pouvoir montrer que ce qui a été recouvert d'une couverture végétale n'est pas le résultat d'un abandon des terres, mais de réels boisements.

Le revégétalisation des terrains miniers entre 1990 et 2008 n'a sans doute pas toujours abouti à la création d'une végétation pouvant être déjà considérée comme forestière. Mais cela importe peu si, à terme, ces végétations remplissent les critères de la FAO pour pouvoir être considérées comme une forêt. Cependant si l'on estime que cet accroissement de stock entre 2008 et 2012 est trop faible pour mériter d'être mesuré précisément il suffira simplement de l'ignorer. Le bilan final « accroissements des stocks entre 2008 et 2012 – diminutions des stocks par déboisements entre 2008 et 2012 » sera simplement un peu plus faible. Au cas où l'accroissement des stocks entre 2008 et 2012 ne compenserait pas la diminution des stocks à recenser obligatoirement, le débit serait donc seulement un peu plus élevé.

Il faudra probablement s'attendre à un bilan négatif (diminution nette des stocks comptabilisés sous l'article 3.3) dans le cas de la N.-C., principalement sous l'effet, dans l'ordre, des défrichements agricoles, miniers et urbains. Il faudra donc mesurer les stocks de carbone des surfaces qui seront défrichées entre 2008 et 2012 (ou au cours des périodes d'engagement qui suivront, après 2012).

### *5.4.2. Les inventaires sous l'article 3.4. du protocole de Kyoto*

Article 3.4 :

*« Avant la première session de la conférence des Parties (...) chacune des Parties visées à l'annexe I fournit à l'Organe subsidiaire du conseil scientifique et technologique, pour examen, des données permettant de déterminer le niveau de ses stocks de carbone en 1990 et de procéder à une estimation des variations des stocks de carbone au cours des années suivantes. À sa première session, ou dès que possible par la suite, la conférence des Parties (…) arrête les modalités, règles et lignes directrices à appliquer pour décider quelles activités anthropiques supplémentaires ayant un rapport avec les variations des émissions par les sources et de l'absorption par les puits des gaz à effet de serre dans les catégories constituées par les terres agricoles et le changement d'affectation des terres et la foresterie doivent être ajoutées aux quantités attribuées aux Parties visées à l'annexe I ou retranchées de ces quantités et pour savoir comment procéder à cet égard, compte tenu des incertitudes, de la nécessité de communiquer des données transparentes et vérifiables du travail méthodologique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*[26] *, des conseils fournis par l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique conformément à l'article 5 et des décisions de la conférence des Parties. Cette décision vaut pour la deuxième période d'engagement et pour les périodes suivantes. Une Partie peut l'appliquer à ses activités anthropiques supplémentaires lors de la première période d'engagement pour autant que ces activités aient eu lieu depuis 1990.»*[27]

Cet article définit des dispositions facultatives jusqu'à la fin de la première période d'engagement, donc jusqu'en 2012. Ces dispositions devraient devenir contraignantes ensuite. Par rapport à l'article 3.3 précédent, elles offrent, dès 2008 et pour les pays de l'annexe I, la

[26] Rapport spécial du Giec sur l'Utilisation des terres, les changements d'utilisation des terres et la foresterie, approuvé par les gouvernements en 2000.

[27] Notons que sous l'article 3.4 on peut également considérer, d'une part, les variations de stocks de carbone dans les espaces agricoles (cultures et prairies) et, d'autres part, les variations de stocks de carbone liés à la « végétalisation » et à la « dévégétalisation » des espaces non forestiers ou agricoles donc non déjà considérés sous les articles 3.3 et 3.4. La comptabilité spécifique pour ces dernières est évoquée dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie ».

possibilité de bénéficier de quelques crédits de carbone supplémentaires. Encore faut-il que le bilan soit avantageux pour le pays, ce qui n'est pas toujours le cas. C'est ainsi que le Canada n'a pas retenu la gestion forestière sous l'article 3.4, car les stocks moyens de carbone de ses forêts risquaient de diminuer entre 2008 et 2012

Cela concerne les réductions d'émissions de GES (absorptions nettes notamment de $CO_2$) résultant notamment :

(1) de la gestion et la croissance des forêts non considérées sous l'article 3.3 ;

(2) des cultures et des prairies ;

(3) de la revégétalisation (par des formations non forestières, au sens de la définition retenue).

Seulement une petite fraction de cet accroissement des forêts (une valeur d'environ 15 %) peut être prise en compte dans la comptabilité pour la première période d'engagement. On ne sait pas encore comment cette proportion sera modifiée après 2012.

Cette option permet éventuellement de compenser un bilan de carbone négatif sous la comptabilité de l'article 3.3.

Dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie » nous indiquons les comptabilités pour les deux dernières catégories.

*Nous nous intéressons ici aux mesures de l'accroissement, entre 2008 et 2012, des forêts existantes (avant 1990).*

Il est fort possible, mais pas certain, que l'accroissement des forêts existantes en N.-C. soit positif sur la période considérée, compte tenu de la production des plantations anciennes (avant 1990) et, surtout, du ralentissement progressif de l'exploitation forestière.

Mais il faut également tenir compte des feux et des causes de dégradation qui ne relèvent pas de l'exploitation formelle (coupes « individuelles » sans permis, etc.)

Il est permis de penser que les 50 000 à 60 000 ha exploités durant les 50-60 dernières années (près de 20 % de la surface totale des forêts denses) soient dans une logique de reconstitution et de recapitalisation lente de la biomasse. Cet accroissement peut aussi être annulé par la dégradation de la forêt dense par des processus qui ne relèvent pas de l'exploitation forestière formelle. Compte tenu de l'absence d'informations précises, il ne s'agit que de pistes de réflexion.

Pour aller plus loin, il faudra déterminer les variations de stocks des forêts existantes **(**hors 3.3**)** par une procédure d'inventaire, conforme aux demandes de la Convention sur le climat, et du protocole de Kyoto. Les lignes directrices pour ces inventaires sont évoquées au point suivant.

Rappelons que tout changement de stocks mis en avant se devra d'être étayé par des informations fournies de façon transparente et vérifiable.

### 5.4. Influence du périmètre considéré sur la précision des mesures demandées d'ici à 2012

La précision des mesures demandées dépend du périmètre considéré. Considérée dans l'ensemble français (métropole DOM + Com + N.-C.) les variations de stocks en N.-C. sont relativement mineures. Cependant, il serait néanmoins cohérent de rechercher un niveau de précision conforme à celui qui est assuré sur le territoire métropolitain pour des ensembles

territoriaux de surfaces comparables à celle de la N.-C. Une évaluation coût bénéfice serait à réaliser.

En revanche quand ces variations sont considérées isolément de l'ensemble français les conséquences, sous la comptabilité de Kyoto seraient différentes. Les mesures doivent alors être plus précises notamment pour éviter des débits sous l'article 3.3 dès 2008 et sans doute aussi, à partir de 2012, sous l'article 3.4, si sa prise en compte devenait obligatoire comme le cours des négociations le laisse prévoir.

La situation de la N.-C. est à première vue apparemment paradoxale : ses obligations sont celles d'un pays relevant de l'annexe I, alors que son système d'information sur l'occupation du sol en général et, plus précisément, sur les ressources forestières est peu développée. Du point de vue de l'information sur la végétation forestière, la situation en N.-C. n'est pas différente de celle de nombreux pays tropicaux pour lesquels le système d'inventaire et de suivi des stocks de carbone doit être pensé et construit quasiment *ex nihilo*. Cela peut s'expliquer dans une large mesure par l'absence de réels intérêts industriels de la forêt. Si les pays industrialisés ont mis en place de tels inventaires forestiers – dont le coût n'est pas négligeable – c'est d'abord pour pouvoir déterminer l'évolution de la disponibilité en bois pour les industries. Il n'empêche que, sur le territoire métropolitain, des forêts guère rentables (méditerranéennes, montagnardes) sont inventoriées par l'Inventaire forestier national (IFN) au même titre que des boisements nettement plus productifs.

## 5.5. Les perspectives post 2012 sous le protocole de Kyoto

Pour cela, la logique d'inventaire doit être cohérente avec les principes définis par le Giec (2006). Compte tenu de la faible expérience des opérations d'inventaire en N.-C., les réflexions générales de l'ouvrage GOFC-Gold (2008) peuvent être une source d'inspiration même s'il n'offre pas de solution « clés en main ». L'expertise de l'IFN pourrait certainement être sollicitée de façon régulière dans la période de construction et de lancement des protocoles de mesures et de suivi. Pour satisfaire de façon efficace les obligations d'inventaire et de suivi des surfaces forestières et des stocks de carbone, une approche à deux niveaux est souhaitable. Celle-ci couplerait l'observation par télédétection (sensu lato, c'est-à-dire incluant potentiellement les photos aériennes), et des mesures au sol pour la vérification de l'approche de télédétection (vérité-terrain) et la prise de mesures complémentaires. Mais il faut signaler que pour l'article 3.3 les approches sont encore un peu plus compliquée : il faut en effet pouvoir distinguer les variations de stocks d'origine directement humaine des variations ayant d'autres causes. Il faut également pouvoir indiquer si les boisements on été réalisés ou non sur des terres agricoles.

### *5.5.1. Les enjeux de la cartographie pour le suivi*

- Définir une nomenclature des divers types de végétation qui puisse être appliquée sous forme cartographique de façon cohérente, dans l'espace et dans le temps, et qui soit en adéquation avec les moyens d'observation qui pourront être mobilisés de façon récurrente (disons, tous les 10 ans). Pour la première période d'engagement sous le Protocole, il faudrait disposer d'informations pour une période de cinq ans, par exemple entre 2008 et 2012, soit directement soit par interpolation entre des inventaires réalisés avant 2008 et en 2012.

- La nomenclature devra intégrer la dichotomie fondamentale entre « forêt » et « non forêt », selon la définition qui sera officiellement adoptée par la N.-C., et permettre des subdivisions raisonnables à l'intérieur de ces deux classes pour qualifier les

changements d'affectation des terres, et quantifier leurs conséquences en termes de capture et de stockage de carbone.

- À l'intérieur de la classe « forêt », les subdivisions (sous-classes) devront constituer des strates d'échantillonnage pertinentes par rapport aux campagnes de mesures au sol qui viseront à l'estimation de la biomasse et du carbone.
- La « dégradation », au sens de la baisse des stocks de carbone sur des terres restant dans la classe « forêt » (« *forêts restant forêts* », GOFC-Gold 2008) devra pouvoir être évaluée par des variations de surfaces entre sous-classes « forestières » de la cartographie (premier niveau d'approximation) avant d'être affinée par des informations de terrain.

### *5.5.2. Rôle de l'observation spatiale aérienne ou satellite : intérêts et contraintes des différentes techniques et des diverses sources d'information*

Compte tenu des objectifs, une dichotomie fondamentale existe entre informations spatiales à résolutions moyenne à haute (pixels de l'ordre de 10-20 m ou plus) et très haute (pixels d'une taille effective inférieure à 4-5 m). Ces valeurs s'entendent pour des « images » optiques multispectrales, c'est-à-dire donnant des informations dans plusieurs canaux du spectre visible et un à deux canaux du spectre infrarouge. Pour un même capteur, la résolution en mode panchromatique (« noir et blanc ») est généralement plus élevée, et descend en dessous de 1 à 2 m pour les capteurs à très haute résolution. À noter que l'offre d'observation satellitaire se diversifie rapidement.

La photographie aérienne moderne, par exemple telle que fournie par l'IGN à partir des années 1970, possède un grain suffisamment fin pour relever de la très haute résolution, que l'interprétation finale soit visuelle ou semi-automatique, après numérisation. L'information correspondant au proche-infrarouge (photographies en « fausses couleurs » ou « infrarouge »), importante pour la caractérisation des variations de végétation, n'est, par contre, pas toujours présente : les photographies livrées par l'IGN à l'IFN comportent cette information, alors que les couvertures IGN de la Guyane côtière n'y donnent pas accès. En mode panchromatique, les images satellitaires à très haute résolution (THR) autorisent aujourd'hui une qualité d'interprétation visuelle se rapprochant de celle obtenue à partir de photographies aériennes.

Selon GOFC-Gold (2008, p.17), des coûts de 0,1 à 0,5 $/km² et de 2 à 40 $/km² sont avancés, respectivement pour une couverture HR et THR (ou photographies aériennes). La différence de coût est donc sensible[28]. Cependant, il ne semble pas qu'une information de type HR puisse correspondre aux besoins et aux conditions propres de la N.-C. considérée isolément dans un périmètre restreint, à savoir un territoire relativement petit (18 000 km²) au couvert végétal très varié pour des raisons à la fois naturelles et humaines. Au demeurant, la plupart des pays européens ne font pas jouer un rôle important à ce type d'information dans leurs procédures récurrentes d'inventaire forestier. Le contexte d'un grand territoire, au couvert relativement peu contrasté, et à l'accessibilité au sol problématique – la Guyane, par exemple –, appellerait une conclusion sans doute différente. À noter néanmoins que la Guyane côtière, d'une superficie comparable avec la N.-C., fait l'objet d'une couverture aérienne (IGN) relativement régulière (dernières couvertures en 1992 et 2001). Dans le contexte des DOM-COM, l'acquisition de données THR n'est donc pas inenvisageable dans une logique d'actualisation cartographique décennale.

[28] 0,5 $/km² pour Spot-5 HRVIR, qui peut être vu comme offrant une résolution intermédiaire entre HR et THR.

Pour être plus précis sur l'enjeu d'une résolution spatiale suffisante, on peut dire qu'il n'est pas démontré que l'approche cartographique à base d'images Spot5, telle que déployée par la DTSI pour sa récente cartographique générale, puisse déboucher sur une typologie en sous-classes forestières, à la fois suffisamment fine et robuste dans le temps : la distinction de catégories pertinentes le long des continuums forêt dégradée/savane ou selon les gradients de hauteur allant du maquis bas à la forêt sera difficile. L'usage de couvertures THR est nécessaire pour avoir accès à l'information texturale (grain de la canopée ; cf. Couteron *et al*., 2005 ; Proisy *et al*., 2007) pour interprétation visuelle ou semi-automatique. Cette contrainte de résolution sera particulièrement forte si l'on souhaite interpréter des variations de densité, de couvert ou, indirectement, de hauteur dans des formations impliquant des arbustes ou des arbres à couronnes relativement petites (savanes boisées, maquis para-forestier, forêt dégradée, etc.)

Pour le futur, des pistes existent concernant une estimation directe de la biomasse à partir de données de télédétection radar, en particulier sur la base du satellite radar japonais Alos[29] et du programme « Alos Kyoto & Carbone initiative ». La gamme des valeurs de biomasse épigée (AGB) observées, qui n'excèdent pas substantiellement 200 t/ha, laisse à penser que les problèmes de saturation de ce type de signal (Proisy *et al*., 2000) ne seraient peut-être pas rédhibitoires pour une application en N.-C. Cependant, une étude de préfaisabilité serait nécessaire et imposerait des travaux de calibration par rapport à des biomasses mesurées au sol.

### *5.5.3. Les mesures récurrentes au sol et le suivi de la croissance des arbres*

Bien menée, l'observation spatiale peut permettre le suivi des changements d'affectation des terres (information de base par rapport à l'article 3.3) et la cartographie diachronique de sous-classes à l'intérieur de la classe « forêt ». Elle ne peut permettre, à elle seule, de réaliser des bilans de carbone dans ces différentes classes (flux), ni même donner des valeurs précises de leurs biomasses épigées moyennes (stocks). Pour cela, il est nécessaire de réaliser des inventaires de terrain selon un plan de sondage systématique dans l'espace et de façon répétée dans le temps (cycle d'inventaire). Les points de sondage font l'objet d'une vérification sur le terrain de l'interprétation réalisée à partir des documents de télédétection et, surtout, donnent lieu à un inventaire des arbres présents sur une surface de référence (placette), à leur identification botanique et à leur mesure au travers d'une variable simple, le diamètre du tronc. Il s'agit d'une approche classique d'inventaire forestier qui pourra s'inspirer (taille de la placette, taux d'échantillonnage), moyennant des ajustements à de nouvelles finalités, des protocoles qui ont été utilisés par le passé en N.-C. (inventaire de 1975, inventaires locaux des années 1980-90). La visite des points de sondage sur le terrain peut être l'occasion d'un relevé d'informations supplémentaires concernant la végétation et le milieu (sol, pentes, etc.).

Des mesures plus lourdes doivent être envisagées sur un sous-ensemble de placettes de terrain pour établir un système de relations allométriques permettant, *in fine*, l'estimation de la biomasse épigée totale d'un arbre à partir de la mesure de son diamètre. De telles relations sont actuellement inexistantes pour la N.-C., elles peuvent être construites directement ou indirectement (en fonction de la hauteur de l'arbre ; voir Chave *et al*., 2005). Comme il s'agit de mesures destructrices, nécessitant abattage et tronçonnage des arbres, il pourrait être intéressant de profiter de l'opportunité des quelques chantiers d'exploitation encore en cours, même s'il faudra probablement rééquilibrer la logique d'échantillonnage pour mieux couvrir

[29] Advanced Land Observation Satellite (capteur Alos Palsar mesures en bande – L) de l'Agence spatiale japonaise (Jaxa).

la diversité des forêts de N.-C. En l'absence de technique simple et opérationnelle de mesures *a posteriori* de la croissance des arbres tropicaux, la caractérisation de la croissance demande que des superficies de référence (« placettes de croissance permanentes ») soient suivies durablement. Celles-ci devront être localisées de façon à couvrir les principales classes de formations forestières, y compris dans les plantations.

L'ensemble de ces travaux, nécessaires au suivi des variations de stocks de carbone dans la végétation forestière, ne pourra être mené qu'au travers de la mise en place d'une cellule d'inventaire des « ressources forestières » (sensu lato) qui n'existe pas aujourd'hui. Il s'agirait donc d'un investissement de la part des collectivités publiques. Cette cellule pourrait être composée de trois à quatre agents permanents pour les travaux de terrain et d'un à deux agents pour les travaux relevant de la cartographie, pour ces derniers en relation étroite avec la DTSI. Les effectifs évoqués correspondraient à une « pression d'observation » par unité de surface similaire à celle qui est assurée sur le territoire métropolitain par l'IFN, ou tout au moins pour pouvoir déterminer des ordres de grandeurs, avec une précision satisfaisante, des variations d'émissions résultant de la gestion de l'espace rural. C'est ce que demande la Convention. Sous le protocole de Kyoto il faudra en outre, pour la période post 2012, pouvoir définir les variations de stocks conformément aux découpages de l'espace envisagé sous l'article 3.4. Un inventaire déterminant seulement les variations de stocks pour l'ensemble de la N.-C. ne sera pas suffisant. Il faudra en particulier, on l'a déjà vu, un suivi administratif des changements d'utilisation des terres plus précis.

Au-delà de la mise en conformité avec les engagements de la Convention sur le climat, les résultats régulièrement obtenus par une cellule pérenne d'inventaire contribueraient utilement à la gestion des ressources forestières menées par les services techniques des provinces. Comme c'est le cas en métropole, ils pourraient aussi constituer une contribution utile à la caractérisation des habitats et à la conservation des biotopes.

## 5.6. Le stockage de carbone dans le bois des constructions

L'augmentation du stock de carbone dans les constructions n'a pour le moment pas encore été retenue. Mais on peut inventorier les variations de stocks sous la Convention. Il est cependant difficile de les déterminer avec une précision suffisante.

## 5.7. Conclusions - Recommandations

### *5.7.1. Les quantités de carbone en jeu dans le « secteur » de l'utilisation des terres et de la foresterie ne peuvent couvrir ce qui sera émis par la métallurgie*

Bien qu'il soit difficile, en l'absence de données précises pour la N.-C., d'indiquer quel est le bilan de carbone au sens du protocole de Kyoto, il semble néanmoins utile de situer les enjeux, en termes d'ordre de grandeur par rapport aux autres sources d'émission de GES en N.-C.

Supposons que le bilan des émissions sous l'article 3.3 soit égal à zéro pour la période d'engagement considérée, par exemple entre 2008 et 2012, ou entre 2012 et 2020. Cela revient à considérer que le déstockage de carbone dû aux défrichements de forêts (en zone urbaine et en zone minière avec changement d'affectation des terres) serait compensé par des augmentations de stocks de carbone dans des boisements de terres agricoles effectués depuis 1990. C'est une hypothèse sans doute trop optimiste, compte tenu de la faiblesse du niveau des boisements de terres agricoles, mais nous la retenons provisoirement.

*Quelle serait alors la contribution sous l'article 3.4 ?*

Supposons que l'accroissement moyen annuel net des forêts de N.-C., dont les sols sont relativement peu favorables, puisse atteindre 1 t de carbone par ha (2 t de MS/ha ou 4 $m^3$ de bois « commercialisable ») – ce qui est vraisemblablement optimiste – et capter ainsi 3,67 $tCO_2$ par ha pendant un certain nombre d'années. En prenant les règles de comptabilité sous l'article 3.4 (15 % des augmentations de stocks) cela conduirait à l'octroi de 0,55 t de $CO_2$ par ha. La production de nickel émettant environ 20 t de $CO_2$ par tonne, il faudrait environ 36 ha de forêt pour compenser les émissions d'une tonne de nickel. La production de 200 000 t de nickel contenu demanderait alors 7,2 millions d'ha, chiffre qui excède largement la superficie du territoire de la N.-C. (1,8 million d'ha). En supposant que les règles de comptabilités changent en 2012, et qu'on puisse prendre en compte non plus 15 %, mais 50 % de l'augmentation des stocks de carbone en forêts[30], il faudrait encore une surface d'environ 11 ha de forêt par tonne de nickel, soit 4,4 millions d'ha au total.

En d'autres termes, même avec des hypothèses d'accroissements des stocks de carbone et de comptabilisation très favorables, les forêts de la N.-C. ne pourront compenser les émissions que d'une petite partie de la production actuelle de nickel.

*D'où l'importance de réaliser non seulement des économies d'énergie dans les industries métallurgiques, (cf. « Les nouvelles technologies en matière de production et de stockage d'énergie »), mais également des substitutions de charbon par des biomasses ligneuses, forestières ou non, ou herbacées (miscanthus ou autres espèces herbacées à fortes potentialités de production et non envahissantes).*

Il faut donc replacer ces travaux dans une perspective d'aménagement du territoire et ne pas se focaliser uniquement sur l'augmentation des stocks *via* des formations forestières ou boisées. D'autre part les reboisements de terres agricoles peuvent entrer en concurrence avec des productions de biomasses alimentaires.

Quand on cherche également à améliorer la balance commerciale, à créer des emplois, à accroître l'autonomie énergétique et à limiter les émissions de GES au niveau planétaire, c'est une meilleure vision des potentialités agricoles et forestières des espaces néo-calédoniens qu'il faut acquérir afin de pouvoir faire des choix non seulement pour l'environnement, mais également pour le développement. D'où la suggestion de faire réaliser une telle étude prospective par une équipe néo-calédonienne s'appuyant sur la recherche agronomiques et forestière local, par exemple par un pôle adossé à l'IAC (Institut agronomique calédonien).

### *5.7.2. Quelques recommandations relatives aux relations entre forêts et GES en Nouvelle-Calédonie*

**Sous la Convention des Nations unies sur le changement climatique**

Dans la mesure où la N.-C. est considérée dans l'ensemble français, c'est le Citepa[31] qui rapporte les émissions sur les sources et les puits de GES conformément aux règles en vigueur pour l'ensemble des territoires dont elle doit fournir les émissions ; la métropole, les DOM, les COM et la N.-C. (cf. inventaires des émissions dans le chapitre 1). Mais ce n'est pas le Citepa qui réalise les inventaires. En France, cet organisme s'appuie par exemple sur l'Inventaire forestier national.

[30] Il est peu probable que les futures règles retiennent plus de 50 % des augmentations de stock, car cela pourrait mettre en péril, dans de nombreux pays, les activités liées à l'exploitation et à la transformation du bois. À long terme cela serait même contreproductif dans la lutte contre le changement climatique.
[31] Centre technique interentreprises d'études de la pollution atmosphérique (http://www.citepa.org).

Les précisions sur les sources et les puits peu significatifs n'ont pas besoin d'être améliorées. Seules les précisions des sources « clefs » doivent être améliorées prioritairement. L'amélioration de la mesure des variations de stocks de carbone en N.- C. ne serait donc, tout au moins dans ce cadre, pas une grande priorité.

Si les inventaires des émissions de GES de la N.-C. devaient être fournis uniquement pour ce territoire, les priorités pourraient changer. De nouvelles mesures, parfois relativement coûteuses, pourraient alors s'imposer. Mais cela ne pourrait être précisé qu'après la fourniture d'un inventaire plus détaillé des émissions de GES, notamment par le Citepa, par des experts forestiers et surtout par des entreprises spécialisées dans les inventaires comme l'IFN.

**Sous le protocole de Kyoto**

Pour le moment, la N.-C. n'a pas d'obligations sous le protocole de Kyoto. Si elle désirait adhérer au Protocole *via* la France, elle devrait réaliser les inventaires imposés sous les articles 3.3 et 3.4, même si les contributions des variations de stocks de carbone au bilan de GES de la N.-C. restent minimes.

Pour l'article 3.3, on pourrait sans doute se contenter de recenser les diminutions de stocks résultant des déboisements de terrains miniers, pour l'urbanisme et pour l'augmentation des surfaces agricoles. Les augmentations de stocks dues aux boisements des terres agricoles pourraient sans doute être négligées. On aurait ainsi un bilan sans doute un peu moins favorable qu'en mesurant tout, mais sans doute beaucoup plus facile à réaliser et beaucoup moins coûteux.

Pour l'article 3.4, il faudrait faire des mesures de variations de stocks de carbone en forêts restant forêts. Mais, compte tenu du fait que la France a de la marge (n'utilise pas toutes les augmentations de stocks réalisées dans les forêts), il suffirait de faire des mesures d'accroissement des stocks avec un faible taux de sondages. On pourrait alors facilement montrer, même en cas d'accroissement négligeable des stocks de carbone en N.-C., que cela n'a pas d'incidence notoire sur les engagements de la France en y incluant la N.-C. En cas de diminution des stocks, il faudrait être un peu plus précis, mais surtout déterminer des valeurs peut-être par excès, pour bien montrer que l'augmentation des stocks sous l'article 3.4 en France reste toujours au-dessus de la valeur z (c'est-à-dire au dessus des 15 % d'augmentation des stocks prévus en 2000, pour 2010). Tant que l'augmentation du stock reste supérieure à la valeur z, cela ne changera rien au bilan final.

Comme la France a pris en compte le volet « forêt » de l'article 3.4 dès 2008, on pourrait donc, sans doute, sauf modification du Protocole d'ici à 2012, satisfaire aux articles 3.3 et 3.4 dès 2012. On pourrait donc simplement recommander la mise en place de mesures un peu plus précises qu'aujourd'hui, tendant à se rapprocher progressivement du niveau de précision des mesures assuré sur le territoire métropolitain.

Si la N.-C. désirait prendre des engagements de nature différente, par exemple de manière autonome, comme envisagé dans l'un des scénarios examinés dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie », il faudrait qu'elle se dote de moyens de mesures propres, plus performants, pour évaluer les variations de stocks de carbone, notamment dans ses forêts.

En conclusion, nous sommes conduits à faire les recommandations suivantes :

**Recommandation n° 1**

Mise en place d'un inventaire forestier, doté des moyens adéquats pour assurer sa mission de façon conforme aux lignes directrices du Giec pour le volet « terres forestières » des inventaires nationaux de GES (Giec, 2006). La précision des mesures exigées dépendra cependant du périmètre considéré et de l'évolution des règles d'application des articles 3.3 et 3.4.

**Recommandation n° 2**

En vue d'une gestion et d'un développement durable des ressources forestières, en tant que contribution, forcément modeste, à une amélioration du bilan GES de la N.-C., on peut proposer :

– l'augmentation de l'effort de plantations de bois d'œuvre : sur la base des Araucariacées locales, mêmes si les surfaces reboisées ne se seront sans doute pas très étendues (quelques milliers d'ha). Pour cela, il y a nécessité de rebâtir une cellule de recherche forestière appliquée, en relation étroite avec les services des provinces et la mise en place de politiques forestières volontaristes ;

– la reconstitution des stocks dans les forêts naturelles plus ou moins dégradées, si possible *via* des méthodes de régénérations peu coûteuses par hectare, par exemple des semis direct de graines pré-germées. Cela impliquera la mise au point de nouvelles techniques, donc des programmes de recherche bien orientés vers cet objectif ;

– des luttes plus efficaces contre les feux, en particulier pour protéger les formations forestières denses des risques de dégradation à partir des savanes ou des formations ouvertes.

**Recommandation n° 3**

Créer un pôle néo-calédonien étudiant les potentiels de production des espaces agricoles et forestiers et de valorisation des biomasses alimentaires et non alimentaires en N.-C. Ce pôle pourrait par exemple être appuyé et piloté par l'IAC, et prendre en considération simultanément les aspects économiques, sociaux et environnementaux de ces productions, et établir des scénarios prospectifs d'utilisation des terres qui permettraient aux décideurs d'effectuer des choix en ayant un éclairage plus précis sur ces questions.

La mise en œuvre des seules recommandations forestières ne permettra sans doute pas de modifier notablement le bilan des émissions et de captage de $CO_2$ *via* les forêts, mais pourra avoir des bénéfices connexes pour l'aménagement du territoire et la protection de la biodiversité.

## Bibliograhie

BAVARD D., 1989 – Forêt et filière bois en Nouvelle-Calédonie, *Revue Forestière française*, 3 : 231-244.

BEAUVAIS M.L., COLENO A. et coll., 2006 – *Les espèces envahissantes dans l'archipel néo-calédonien. Un risque environnemental et économique majeur*, Coll. Expertise collégiale, IRD, 135 p. (version bilingue).

BROWN S., 1997 – *Estimating biomass and biomass changes of tropical forests: A primer*, Rome, FAO, Forestry Paper n° 134, http://www.fao.org/docrep/W4095E/w4095e00.htm

CHAVE J., ANDALO C. *et al*., 2005 – Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests, *Oecologia*, 145 : 87-99.

COUTERON P., PELISSIER R. *et al.*, 2005 – Predicting tropical forest stand structure parameters from Fourier transform of very high-resolution remotely sensed canopy images. *Journal of Applied Ecology*, 42: 1121-1128.

CTFT, 1975 – *Inventaire des ressources forestières de la Nouvelle-Calédonie – reconnaissance générale et inventaires des blocs pilotes*, Nogent-sur-Marne, Centre technique forestier tropical.
Fascicule 1 : *Méthodes et Réalisation*. 141 p. + annexes.
Fascicule 2 : *Résultats et Commentaires*, 227 p.
Fascicule 3 : *Inventaires des peuplements de Niaoulis*, 39 p. + annexes.

DAVAR-ISEE, 2005 – *Recensement général agricole 2002/Principaux résultats*, Nouméa, Davar-Isee, Notes et Documents n° 94.

DURRIEU de MADRON L., 2009 – *Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour les forêts de St-Pierre-et- Miquelon, de la N.-C. et de Wallis-et-Futuna*. Convention n° G 13 ; 2008 entre le ministère de l'Agriculture et de la Pêche et l'ONF, Rapport provisoire.

JAFFRE T., VEILLON J.M., 1994 – *Les principales formations végétales autochtones en Nouvelle-Calédonie : caractéristiques, vulnérabilité, mesures de sauvegarde*. Nouméa, Orstom, Rapport de synthèse sciences de la vie n° 2, 12 p.

GIEC, 2006 – Lignes directrices 2006 du Giec pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Publié au nom du Giec par l'Institut des stratégies environnementales mondiales (Iges), Hayama, Japon, http://www.ipccc.ch

GIEC, 2000 – *Land Use, Land Use Change and Forestry* (Utilisation des terres, changements d'utilisation des terres et foresterie), Rapport spécial du Giec correspondant à la demande de l'article 3.4, 372 p., http://www.ipccc.ch

GOFC-GOLD, 2008 – *Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting.* GOFC-Gold Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada, GOFC-Gold Report version COP13-2.

GUITET S., BLANC L. *et al*., 2006 – *Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour la forêt guyanaise*. Convention n° 59.02. G 18/05 du 19/12/2005 entre le ministère de l'Agriculture et de la Pêche et l'Office national des forêts direction régionale de Guyane, Paris, MAP.

HYGEN S., MARION F. *et al*., 2006 – *Le domaine forestier privé de la Nouvelle-Calédonie. État des lieux et possibilités d'amélioration de sa gestion*. Davar, gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa.

MUZINGER J., DAGOSTINI G. *et al*., 2007 – *Inventaire de la réserve de la forêt nord. Expertise pour Goro-Nickel SA*, IRD, Nouméa, 52 p.

NASI R., JAFFRE T. *et al*., 2002 – Les forêts de montagne de la Nouvelle-Calédonie, *Bois et Forêts des Tropiques*, 274 : 5-18.

PROISY C., MOUGIN E. *et al*., 2000 – Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests, *Remote Sensing of Environment*, 71(1): 56-66.

PROISY C., COUTERON P. *et al*., 2007 – Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of Ikonos images. *Remote Sensing of Environment*, 109: 379-392.

RIEDACKER A., 2005 – *Changements climatiques et forêts*, Paris, Silva, Riat, 232 p.

TIGER M., 1999 – *Bilan des plantations d'essences locales en Nouvelle-Calédonie : approche socio-économique des reboisements privés et synthèse technique*, Mémoire de fin d'étude de la Formation des ingénieurs forestiers, Cirad/Engref, Montpellier et Nancy, 149 p.

## 6. Considérations sur les réductions d'émissions notamment *via* le stockage et recommandations

### 6.1. Les actions à envisager pour stabiliser les émissions de GES

Pour stabiliser les concentrations de $CO_2$ à l'échelle de la planète, il faut agir à divers niveaux :

– mieux maîtriser l'énergie, notamment promouvoir des économies d'énergie[32] ;

– accroître, quand cela est possible, la sobriété en énergies fossiles ;

– utiliser les meilleures technologies disponibles pour les activités émettrices de $CO_2$ ;

– recourir aux biomasses végétales renouvelées dans la production d'énergie, afin de remplacer des combustibles fossiles ;

– recourir aux autres énergies en général renouvelables (énergies éoliennes, marémotrices, hydrauliques, photovoltaïques géothermiques nucléaire, etc.) à très faibles exigences territoriales, et n'entrant pas en compétition avec l'usage des terres pour les productions alimentaires ou forestières ;

– augmenter les stocks moyens de carbone en forêts ;

– recourir, quand cela sera possible à des coûts économiquement acceptables, au stockage géologique de $CO_2$ issu des combustibles fossiles et des biomasses.

Les rapports du Giec font tous les cinq ou six ans, depuis 1990, régulièrement le point sur l'état des connaissances en matière de réduction des émissions de GES dans les divers secteurs (énergie, industrie, transport, habitat, agriculture, déchets, utilisations et changements d'utilisation des terres et forêts) (rapports du groupe 3 de 1990, 1996, 2001, 2007).

[32] À condition que cela ne se fasse pas au détriment de l'efficacité territoriale dans les productions de phytomasse.

Des rapports spéciaux font également le point sur l'état des connaissances sur des sujets spéciaux ; par exemple sur séquestration géologique, sur les changements d'utilisation des terres, sur l'aviation, sur les CFC et les HFC, etc.

Il appartient ensuite aux décideurs locaux et nationaux d'utiliser ces informations pour définir des politiques de réductions des émissions de GES sur leurs territoires.

### 6.2. Le suivi des émissions de GES

Nous avons indiqué précédemment les émissions de GES telles qu'elles sont recensées pour la Convention climat.

Hors prise en compte des changements d'utilisation des terres, les émissions de la N.-C. et des COM ont augmenté de 63,5 % (+1,8 Mt d'équivalent $CO_2$) entre 1990 et 2007. Dans cette comptabilité, l'essentiel de cette augmentation est attribuable à l'augmentation des émissions de gaz carbonique (+1,7 Mt), c'est-à-dire à l'industrie, aux transports et à la production d'électricité. Les émissions des CFC et des HFC sont également à surveiller.

Mais, pour chaque territoire il faut ensuite trouver les réductions d'émissions les moins coûteuses et la meilleure manière de mettre en œuvre les politiques correspondantes. Mais tout dépend de l'ensemble considéré. C'est ainsi que les émissions à réduire les moins coûteuses dans l'ensemble « France + DOM, + COM + N.-C. » ne sont pas forcément exactement les mêmes que celle pour la N.-C. Mais il y a en général beaucoup d'actions du même type à entreprendre. Dans les choix à effectuer, il faut également tenir compte des capacités du tissu d'artisans et d'industriels à assurer les suivis et les services après vente.

Ce travail est donc à réaliser par des équipes locales connaissant bien le terrain, par exemple par des délégations régionales de l'ADEME ou des Agence régionales, auxquelles cette tâche serait confiée, sous le contrôle des élus.

### 6.3. La réduction des émissions de GES d'origine fossile

Pour les émissions de GES d'origine fossiles les approches sont assez simples et pratiquement toutes connues depuis 1992.

Les productions d'électricité de la N.-C. sont assez intensives en carbone compte tenu du fait qu'on y utilise du charbon. Mais il n'est à priori pas facile de remplacer le charbon par d'autres combustibles. On a vu au chapitre 2, et on reverra dans « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie » que l'utilisation du gaz naturel, préférable au charbon[33], n'est pas accessible en N.-C. Il reste donc à étudier la possibilité de réduire les émissions des centrales électriques et thermiques en remplaçant le charbon par du bois importé.

Dans « La maîtrise de l'énergie », on a examiné comment, hors secteur industriel, on pouvait mieux maîtriser l'énergie en N.-C. Ces réductions de consommation d'énergie se traduiraient par des réductions d'émissions de GES intéressantes.

Dans la partie 2, on s'est intéressé aux nouvelles technologies. Certaines énergies renouvelables, comme l'énergie éolienne, peuvent s'avérer intéressantes.

Pour l'agriculture et les forêts, les approches sont un peu plus compliquées. Elles doivent être un peu plus intégrées. L'ADEME expérimente actuellement des approches territoriales avec le projet Climaterre. Remarquons cependant que les potentialités de production de biomasses ligno-cellulosiques en N.-C. restent extrêmement limitées. Elles

[33] Car les émissions en $CO_2$ par unité d'énergie sont plus basses.

demanderaient des surfaces déjà difficilement accessibles pour la production agricole. La production de matières végétales pour l'énergie dans les pays qui importent une part non négligeable de leur nourriture ne devrait donc être envisagée que sur des terres inaptes à la production d'aliment ou de bois d'œuvre. Les produits alimentaires importés génèrent en effet aussi des GES. Il n'est donc pas évident, sauf pour la comptabilité actuelle des émissions de GES de la CCNUCC, que la production locale de bioénergie se traduise par de vraies réductions d'émissions de GES au niveau planétaire. Peut-être vaudrait-il mieux développer d'abord la production agricole locale.

## 6.4. Les stockages du $CO_2$

Les émissions nettes de gaz carbonique peuvent également être compensées en partie par des augmentations de stocks de carbone dans la végétation et dans les sols ou *via* le stockage géologique.

### Le stockage du $CO_2$ en forêt

On peut réduire les émissions nettes de $CO_2$, soit en produisant du bois qui remplace des produits fossiles (énergie matériaux, etc.), soit en augmentant les stocks de carbone dans la végétation et dans les sols. Il serait utile de s'intéresser à nouveau aux plantations destinées à augmenter les potentiels de production de bois d'œuvre. C'est certes une tâche difficile, car le bois importé de Nouvelle-Zélande semble moins coûteux que celui produit localement. Le coût des plantations uniquement destinées à accroître les stocks de carbone est évidemment encore supérieur aux plantations forestières destinées à être exploitées**.** Il faut donc distinguer ces deux catégories de plantations. Il serait certainement utile pour la dernière catégorie de mettre au point des techniques peu coûteuses, par exemple de semis directs, par avion, d'espèces locales, avec des graines pré-germées, etc. Pour cela, il faudrait mobiliser la recherche et spécialiser des chercheurs sur des programmes de ce type. Dans tous les cas, il faudra renforcer les connaissances et les moyens de lutte contre les feux afin de préserver les stocks de carbone existants déjà dans les phytomasses, ou que l'on voudrait augmenter.

À court terme, la détermination des possibilités d'augmentation des stocks moyens de carbone dans les forêts de la N.-C. paraît indispensable à la fois pour la Convention climat, pour le protocole de Kyoto et sans doute également pour la période post 2012. En l'état actuel, il est impossible d'obtenir ces informations. Mais selon qu'on voudra utiliser ces informations dans l'ensemble français ou uniquement à l'échelle de la N.-C., la précision des mesures demandées, donc les coûts, ne sera pas identique. Cette dernière dépendra notamment des comptabilités qui seront retenues sous l'article 3.4 du Protocole pour la période post 2012. Dans tous les cas il serait utile qu'un ingénieur forestier soit chargé du suivi de ces inventaires en N.-C. afin de pouvoir prendre, le moment venu, les décisions qui s'imposent dans le contexte local, français ou international.

### Le stockage géologique

### Les opérations pilotes

Entre notamment dans cette catégorie le stockage géologique du $CO_2$ dans les puits de pétrole et dans les aquifères salins. On sait en effet déjà utiliser du $CO_2$ pour la récupération assistée du pétrole par injection de $CO_2$ dans les puits de pétrole. On sait aussi stocker les émissions dans les aquifères salins. Il faut en outre encore quelques vérifications techniques,

notamment pouvoir garantir que les fuites de $CO_2$ seront minimes. Et il faudra surtout mettre en place un accompagnement législatif pour rendre ces opérations acceptables[34].

Le stockage géologique du $CO_2$ dans les basaltes et les péridotites est moins avancé que le stockage géologique dans les aquifères salins.

Il faut donc, dans un premier temps, des compléments de recherche. Toutes ces solutions sont encore trop coûteuses Et on ne sait pas aujourd'hui laquelle sera, d'ici dix ans, la plus performante. Les différences actuellement signalées ne sont pas de nature à favoriser une voie plutôt qu'une autre.

Aucune de ces technologies n'est encore économiquement compétitive. Les promoteurs de la séquestration géologique de l'AIE et certains professionnel, notamment AP. Moller – Maresk Group[35], en se basant sur le rapport Mc Kinsey[36] paru en septembre 2008, estiment que le coût du stockage d'une tonne de $CO_2$ se situe actuellement entre 60 et 90 €. Or, sur le marché de l'Union européenne le coût de l'acquisition du droit d'émissions d'une tonne de $CO_2$ était, en 2008, approximativement trois fois moins élevé (15 à 20 € par tonne de $CO_2$) (figure 30).

On estime que le coût actuel pourrait être divisé par 2 entre 2015 et 2020. Vers 2030, et pour de nouvelles centrales électriques à charbon, le coût de la séquestration pourrait descendre jusqu'à 30-45 € par tonne de $CO_2$. Pour les nouvelles centrales à charbon de 300 MW équipées pour la capture et le stockage géologique du $CO_2$, et pour les premières opérations, le surcoût se situerait entre 0,5 à 1,1 million d'€.

Mais si l'on veut pouvoir diviser les émissions mondiales de GES par 2 et permettre la poursuite du développement, il faudra bien que les gouvernements deviennent plus exigeants et fassent monter le prix de la tonne de $CO_2$ évitée. Selon certaines études japonaises, son prix devrait même atteindre plus de 140 € s'il fallait diviser les émissions par 4 dans les pays industrialisés[37]. Lorsqu'il atteindra 60 € (au lieu de 15 € à 20 € en 2008), et que le coût du stockage géologique aura également atteint ce niveau, cette option deviendra économiquement viable et pourra être déployée à grande échelle.

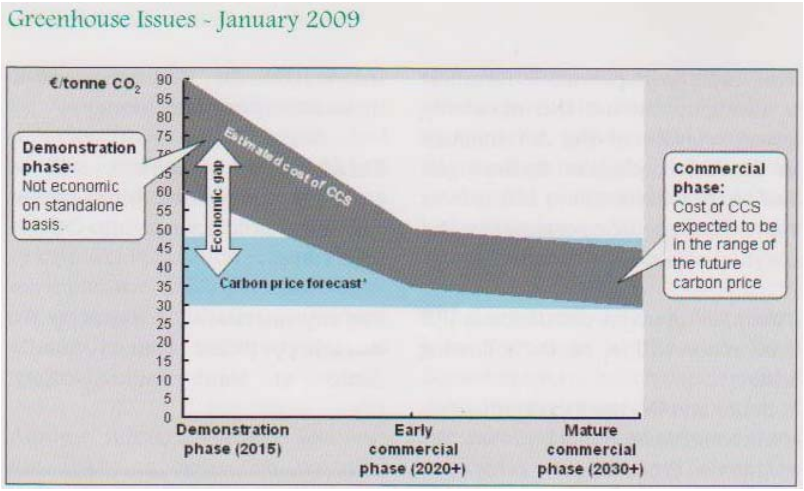
[34] "How ready is Capture ready" de Nils Markusson Bulletin Greenhouse Issues n° 91 September 2008, 5-6, http://www.ieagreen.org.uk

[35] Présente à Copenhague, lors de la conférence sur le climat en mars 2009 (http://www.maersk-tankers.com). Cette entreprise scandinave, spécialisée dans le transport du gaz, a des tankers à gaz de différentes tailles et s'intéresse très fortement à la récupération assistée du pétrole avec le $CO_2$ en mer du Nord.

[36] http://www.mckinsey.com

[37] Selon l'AIE, il pourrait atteindre $ 180 par tonne de $CO_2$ (€ 143 ou £ 119) s'il fallait diviser les émissions par 4 dans les pays industrialisés (Ed. Crooks Financial Times 13 novembre 2008).

**Figure 30 – Évolution envisageable du prix de la tonne de $CO_2$ stockée géologiquement entre 2015 et 2030, d'après le rapport Mc Kinsey**




**Source : figure parue dans *Greenhouse Issues* n° 92 January 2009, p. 9, http://www.ieagreen.org.uk**

En attendant les promoteurs de cette technologie souhaitent pouvoir obtenir des financements spécifiques pour une série d'opérations pilotes à mettre en œuvre entre 2015 et 2020, y compris dans les pays en développement[38]. Ils aimeraient que ces opérations puissent être financées par des prélèvements sur les ventes aux enchères des droits d'émission du marché européen (cf. considérations sur les marchés des droits d'émissions, « L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie »).

En attendant, on ne voit pas comment un secteur industriel soumis à la concurrence internationale et soumis à des obligations de réductions des émissions dans le cadre d'un PNAQ pourrait aujourd'hui envisager de recourir au stockage géologique. Mais il n'est pas interdit d'imaginer que des arrangements puissent être obtenus. Les industriels qui contribueraient financièrement à la mise au point de cette technique pourraient par exemple demander à être libérés des obligations de réductions d'émissions de $CO_2$ ou exclus du PNAQ. L'Union européenne a déjà décidé de soutenir certaines opérations pilotes, notamment le stockage géologique des émissions d'Arcelor Mittal en Lorraine. Trois autres opérations pilotes sont actuellement également envisagées en France (Lacq…).

## Bibliographie

MC KINSEY, 2008 – Rapport sur le stockage géologique du $CO_2$, http://www.mckinsey.com

MARKUSSON N., 2008 – "How ready is Capture ready" de Bulletin Greenhouse Issues n° 91 September 2008 5-6, http://www.ieagreen.org.uk

GREENHOUSE ISSUES, 2009 – January, n° 92 p. 9, http://www.ieagreen.org.uk

[38] Ils espèrent alors également pouvoir bénéficier du Mécanismes de développement propre. Mais cette possibilité est encore en débat au sein des Nations unies.

## Principales recommandations

**Recommandation n° 1 :** créer un pôle néo-calédonien sur la maîtrise de l'énergie et des émissions de GES.

Nous recommandons la mise en place d'un pôle néo-calédonien spécialisé dans le suivi et la maîtrise des émissions de GES. Le recensement des émissions de GES pourrait être affiné, notamment s'il fallait fournir des informations spécifiques au gouvernement de la N.-C. Cette cellule pourrait par exemple également quantifier, au moins approximativement, les émissions des produits importés et consommés sur le territoire. Certes, ces dernières émissions ne sont actuellement pas encore prises en compte dans les négociations internationales sur le climat, car on s'est intéressé d'abord aux grands pays émetteurs. Mais, pour des petits territoires, la prise en compte de ces émissions est importante afin d'éviter les fausses « bonnes » recommandations quand on veut réellement participer à la limitation du changement climatique (pour plus de précisions voir aussi le chapitre 4).

**Recommandation n° 2 :** limiter aussi les émissions de GES autres que le $CO_2$

Il paraît très important de surveiller et de limiter les émissions de CFC et de leurs substituts, comme les HFC et les émissions de méthane.

**Recommandation n° 3 :** créer un pôle néo-calédonien sur la valorisation des espaces agricoles et forestiers et des biomasses alimentaires et non alimentaires.

Il serait souhaitable de constituer un pôle se consacrant à la valorisation agricole forestière, par exemple appuyé et piloté par l'IAC, prenant en considération simultanément les aspects économiques, sociaux et environnementaux (donc aussi le stockage de carbone) des productions de biomasses végétales alimentaires et non alimentaires en N.-C.

Il faudra aussi affecter un ingénieur et des techniciens au suivi des variations de stocks de carbone en forêt, en liaisons notamment avec des équipes extérieures spécialisées dans les inventaires par télédétection.

Et il faudrait enfin mettre en place des programmes de recherche sur des techniques, non conventionnelles pour les forestiers, de « regonflage» de la végétation.

**Recommandation n° 4 :** réduire les émissions des centrales thermiques par substitution de combustible.

Il conviendrait d'étudier la possibilité de réduire les émissions de GES des centrales électriques et thermiques en remplaçant une partie du charbon par du bois importé. À cette fin, il faudrait d'abord réaliser une étude de préfaisabilité, puis éventuellement une étude de faisabilité, associant le gouvernement de la N.-C., Enercal et les industriels des filières de production de nickel. Celle-ci pourrait, par exemple, être cofinancée partiellement par le Programme territorial pour la maîtrise de l'énergie, sur la base d'un cahier des charges à établir conjointement avec les industriels.

**Recommandation n° 5 :** le stockage géologique du $CO_2$, après la capture du $CO_2$ des centrales thermiques.

Pour stabiliser le climat il faudra inévitablement développer les techniques de captage et de stockage géologique du $CO_2$.

Pour la mise au point de techniques moins onéreuses de captage de $CO_2$ à la sortie des centrales thermiques, la N.-C. devrait pouvoir se contenter de transférer, le moment venu, les technologies qui auront été perfectionnées ailleurs. Actuellement, il suffit donc de seulement

s'assurer de pouvoir disposer auprès des centrales la place requise pour les installations de captage et, par ailleurs, exercer une veille technologique afin de s'assurer que les recherches pouvant servir à des unités de la taille présente en N.-C. sont bien menées dans d'autres pays.

Le stockage géologique en N.-C. demande en revanche des recherches menées localement. Le substrat géologique de la N.-C. paraît en effet particulièrement favorable pour expérimenter des filières originales, notamment sur péridotites. Cela demande encore des recherches et des mises au point. Il est donc important de recommander la mise en place d'un programme de recherche avec notamment l'Université, l'ANR et les industriels du nickel. La N.-C. aurait aussi tout intérêt à rejoindre le réseau CO2CRC dans lequel la Nouvelle-Zélande est fortement impliquée également.

La mise au point de techniques applicables dans ce domaine intéresserait non seulement la N.-C., mais également les pays les plus vulnérables aux changements climatiques, plus particulièrement les petites îles ayant l'essentiel de leur territoire à faible altitude.

L'exportation du savoir-faire pourrait enfin se faire en particulier vers **Oman et en Papouasie-Nouvelle-Guinée**.

À toutes ces actions, dont nous avons volontairement restreint le nombre, il conviendra d'affecter des moyens humains et matériels appropriés.

# L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie

Coordination scientifique
Yves Le Bars, Elsa Faugère, Philippe Menanteau,
Bernard Multon, Arthur Riedacker, Sébastien Velut

## CD-ROM

***Chapitres analytiques***

*Cette expertise collégiale a été réalisée*
*à la demande du Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie*
*et de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).*

**IRD Éditions**
Institut de recherche pour le développement

collection Expertise collégiale
Marseille, 2010

© IRD, 2010

ISSN 1633-9924
ISBN 978-2-7099-1692-9

# SOMMAIRE

Chapitres analytiques
(CD-ROM)


☞ **1 – La maîtrise de l'énergie**
Coordinatrice : E. FAUGERE
Experts : M. ABDESSELAM, R. DARBÉRA, J.-M. MOST

☞ **2 – Les nouvelles technologies en matière de production et de stockage d'énergie**
Coordinateur : B. MULTON
Experts : P. MENANTEAU, J.-M. MOST, A. RIEDACKER

☞ **3 – Les émissions et les réductions d'émissions de GES en Nouvelle-Calédonie**
Coordinateur : A. RIEDACKER
Experts : P. BABY, P. COUTERON, J.-M. MOST

☞ **4 – L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie**
Coordinateur : S. VELUT
Experts : P. BABY, A. RIEDACKER

☞ **5 – Quel cadre pour une politique de l'énergie et du climat au service du développement de la Nouvelle-Calédonie ?**
Coordinateur : Y. LE BARS
Experts : R. DARBERA, E. FAUGERE, L. GRAMMATICO, P. MENANTEAU, B. MULTON, S. VELUT



*Signalement bibliographique recommandé pour l'expertise :*

Y. LE BARS *et al.*, 2010 – *L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie*. Marseille, IRD Éditions, coll. Expertise collégiale, 472 p. + CD-ROM.

*Signalement bibliographique recommandé pour un chapitre :*

E. FAUGERE *et al.*, 2010 – « La maîtrise de l'énergie »,CD-ROM : 0-000, *in* Y. LE BARS *et al. : L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie*, Marseille, IRD Éditions, coll. Expertise collégiale, 472 p. + CD-ROM.