

Une expertise de l'empreinte écologique

OBSERVATION ET STATISTIQUES



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir



Une expertise de l'empreinte écologique

Directeur de la publication : Bruno Trégouët

Rédacteur en chef : Michel David

Auteurs : Michel David, Cécile Dormoy, Emmanuel Haye,
Bruno Trégouët

Coordination éditoriale : Corinne Boitard

Traitements statistiques : Emmanuel Haye

Maquette-réalisation : Chromatiques Éditions

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| La demande politique en faveur du recours à l’empreinte écologique | 5 |
| Présentation de l’empreinte écologique..... | 7 |
| <i>Un peu d’histoire.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Définitions et principes de calcul.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Champ couvert par l’empreinte écologique.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Évolutions de la méthode.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Évolution de l’empreinte écologique et de la biocapacité de la France.....</i> | <i>9</i> |
| L’expertise conduite par le Service de l’observation et des statistiques..... | 11 |
| du Commissariat général au développement durable | |
| <i>La démarche.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Les résultats du test technique.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Les travaux complémentaires menés par le SOeS.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Les réflexions du comité de suivi de l’étude.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Quelle utilisation de l’empreinte ?.....</i> | <i>17</i> |
| La réponse du <i>Global Footprint Network</i> | 18 |
| Annexes..... | 20 |
| <i>Bibliographie.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Liste des membres du comité de suivi.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Rapport technique.....</i> | <i>21</i> |

Liste des illustrations

| | |
|--|----|
| <i>Biocapacité globale</i> | 8 |
| Évolution de l’empreinte écologique et de la biocapacité par habitant de la France | 9 |
| Les composantes de l’empreinte écologique de la France en 2005 | 9 |
| Évolution des composantes de l’empreinte écologique de la France entre 1961 et 2005 | 10 |
| L’empreinte écologique, de fortes fluctuations annuelles | 13 |
| Empreinte écologique, des évolutions irrégulières | 13 |
| Impacts des variations du PIB sur celles de l’empreinte | 13 |
| Une analyse des corrélations entre empreinte écologique et autres indicateurs de développement durable | 15 |
| Le comportement de quelques pays vis-à-vis des 3 piliers du développement durable | 15 |

La demande politique en faveur du recours à l’empreinte écologique

Les travaux du Grenelle de l’environnement ont souligné la nécessité d’élaborer des indicateurs relatifs à l’environnement et au développement durable en complément du produit intérieur brut (PIB). L’empreinte écologique faisait partie des indicateurs évoqués par le groupe de travail « Promouvoir des modes de développement écologiques, favorables à la compétitivité et à l’emploi ». Dans le cadre de la loi « Grenelle 1 », l’État se fixe pour objectif de disposer d’indicateurs liés à la Stratégie nationale de développement durable (SNDD) et de développer de nouveaux indicateurs valorisant les biens publics environnementaux dans la comptabilité nationale. La SNDD est actuellement en cours de révision : les services de l’État proposeront une batterie d’indicateurs de développement durable liés à la nouvelle stratégie.

Suite aux débats suscités par cet indicateur, notamment lors de l’examen du projet de loi de programmation du Grenelle environnement à l’Assemblée nationale, le Premier ministre a saisi le Conseil économique, social et environnemental (CESE) le 20 janvier 2009 sur l’intérêt d’utiliser l’empreinte écologique comme indicateur de développement durable susceptible d’envoyer des signaux lisibles en faveur de l’adoption de comportements durables.

L’avis rendu au mois de mai par le CESE aborde la question plus générale des indicateurs de développement durable à côté de l’empreinte proprement dite. Le CESE préconise notamment le recours à des tableaux de bord d’indicateurs, plutôt que la diffusion d’indicateurs synthétiques tant que ceux-ci n’auront pas acquis une robustesse suffisante.

Parallèlement, l’un des axes de travail de la commission « Stiglitz », mise en place par le président de la République, concerne le développement durable et l’environnement. Le rapport propose une typologie des approches qui inclut des indicateurs de pression excessive sur l’environnement. Il souligne la nécessité de distinguer le bien-être de la génération actuelle de celui des générations futures.

Au total, de nombreux travaux d’expertise et d’analyse ont déjà été conduits sur l’empreinte écologique (EE). L’étude conduite par le Commissariat général au développement durable – Service de l’observation et des statistiques (CGDD-SOeS) du ministère de l’Écologie, de l’Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) vise à fournir des éléments permettant de retenir ou au contraire d’écarter le recours à l’empreinte écologique sur la base de critères scientifiques.

Présentation de l’empreinte écologique

Pour une présentation détaillée des modes de calculs utilisés, on se reportera à la partie intitulée « L’expertise conduite par le SOeS » qui explicite les notions fondamentales du concept et fournit quelques exemples chiffrés.

Un peu d’histoire

Le concept d’empreinte écologique a été élaboré au début des années 1990 par William Rees et Mathis Wackernagel, dans le cadre d’une thèse de doctorat en planification urbaine (Mathis Wackernagel a soutenu sa thèse en 1994 à l’université de Vancouver sous la responsabilité de William Rees).

En 1999, ils publient ensemble *Notre empreinte écologique*, aux éditions Écosociété. « L’empreinte écologique est la mesure de la charge qu’impose à la nature une population donnée. Elle représente la surface de sol nécessaire pour soutenir les niveaux actuels de consommation des ressources et de production de déchets de cette population. » Les deux auteurs cherchaient alors à élaborer une méthode de quantification physique de la soutenabilité écologique, en proposant une information sensiblement équivalente à celle fournie, dans le domaine économique, par certains indicateurs monétaires comme le PIB¹.

Les comptes de l’empreinte écologique des nations sont aujourd’hui développés par le *Global Footprint Network* (GFN²), dont Mathis Wackernagel est le président. Le GFN est une organisation internationale à but non lucratif créée en 2003 pour développer et coordonner les efforts de recherche sur l’empreinte écologique. Le GFN travaille aujourd’hui en collaboration avec plus de 100 organisations partenaires, dont le WWF, qui publie régulièrement les Comptes nationaux de l’empreinte écologique dans ses rapports « Planète vivante ». L’un des objectifs affichés du GFN est que 10 pays adoptent officiellement l’empreinte écologique de la même manière que le PIB d’ici 2015.

Définitions et principes de calcul

« L’empreinte écologique mesure les surfaces biologiquement productives de terre et d’eau nécessaires pour produire les ressources qu’un individu, une population ou une activité consomme et pour absorber les déchets générés, compte tenu des technologies et de la gestion des ressources en vigueur. Cette surface est exprimée en hectares globaux (hag), c’est-à-dire des hectares ayant une productivité égale à la productivité biologique mondiale moyenne. » (Source : WWF, rapport Planète vivante, 2008).

Le concept d’empreinte écologique tente de répondre à la question suivante : l’économie humaine mobilise-t-elle davantage de ressources ou services issus de la nature que celle-ci soit capable de régénérer ?

C’est ainsi que l’empreinte écologique a été conçue comme un système comptable à deux composantes :

- la quantité de ressources ou services issus de la biosphère nécessaire pour faire fonctionner l’économie humaine (la demande), qui représente l’empreinte proprement dite ;
- la quantité de services que la biosphère est capable de régénérer (l’offre), qui correspond à la biocapacité.

¹ Aurélien Boutaud et Natacha Gondran, 2009. « L’empreinte écologique ».

² www.footprintnetwork.org

Afin de construire le système comptable, plusieurs hypothèses ont été retenues :

- l’hypothèse centrale de l’EE est que la quantité de ressources renouvelables utilisées est directement liée à la quantité de surfaces bioproductives nécessaires pour régénérer les ressources et assimiler certains déchets produits par les activités humaines³. Autrement dit chaque type de consommation ou de rejet de CO₂ peut être évalué sous la forme d’une surface bioproductive qu’il convient de mobiliser pour produire ce service ;
- afin de pouvoir ensuite les agréger, les différentes surfaces bioproductives sont exprimées sous la forme d’une surface de productivité moyenne mondiale, l’hectare global ;
- les services rendus par la nature (ressources, capacité d’absorption des rejets) ne sont comptabilisés qu’une seule fois pour une surface de sol ou de mer donnée, ceci afin d’éviter les doubles-comptes. Une surface ne peut être destinée qu’à une seule fonction ;
- l’EE mesure la consommation nette d’un pays, (production domestique + imports – exports), c’est-à-dire sa demande finale. L’EE est attribuée au pays consommateur d’un bien ou service, quelle que soit sa provenance, et non au producteur. L’EE comptabilise ainsi la quantité de CO₂ qui a été émise pour produire les biens importés ou exportés, de même que les ressources « incorporées » ;
- empreinte écologique et biocapacité peuvent être comparées : lorsque la demande est supérieure à l’offre, cette surexploitation est appelée « déficit écologique ».

Du côté de la demande, l’empreinte écologique se décompose ainsi :

- empreinte liée à la consommation de ressources renouvelables (produits issus de l’agriculture, de l’élevage, de la filière bois et de la pêche) ;
- empreinte liée à l’artificialisation des sols ;
- empreinte liée à la consommation d’énergie fossile qualifiée d’empreinte carbone.

Le mode de calcul de l’empreinte écologique diffère selon chaque catégorie :

- la base commune de calcul pour les ressources renouvelables consiste, pour chaque catégorie de production, à diviser la quantité de ressources consommées (en tonnes par an) par le rendement moyen mondial (en tonnes par hectare et par an), avant d’ajuster ce chiffre en fonction du facteur d’équivalence correspondant (en hectare global par hectare) ;

$$EE = \frac{\text{quantité consommée}}{\text{rendement moyen mondial}} \times \text{facteur d'équivalence}$$

- partant du principe que l’artificialisation s’étend dans la plupart des cas sur des terres fertiles, l’empreinte écologique des espaces artificialisés considère ces surfaces en fonction de la productivité des surfaces agricoles qu’elles remplacent. Cette empreinte inclut la consommation d’énergie hydroélectrique : la surface de sol prise en compte correspond à la surface du barrage et du réservoir. Les surfaces des retenues n’étant pas connues, elles sont estimées par le biais de la quantité d’hydroélectricité produite ;

³ À ce jour, seuls les rejets de CO₂ sont pris en compte dans les calculs.

– pour mesurer l’empreinte écologique liée à la consommation d’énergie fossile, la méthode retenue consiste à évaluer la surface de forêt nécessaire pour séquestrer le CO₂ émis par la combustion d’énergie fossile lors de la fabrication et du transport des produits consommés (une fois déduite la quantité de CO₂ absorbée par les océans).

Du côté de l’offre, la biocapacité est définie comme la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour cinq types d’espaces : terres cultivées, pâturages, forêts, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

Remarque : pour éviter les doubles comptes, il n’y a pas de calcul de biocapacité pour l’énergie. La forêt qui servirait à séquestrer le carbone est déjà prise en compte pour répondre aux besoins de la filière bois.

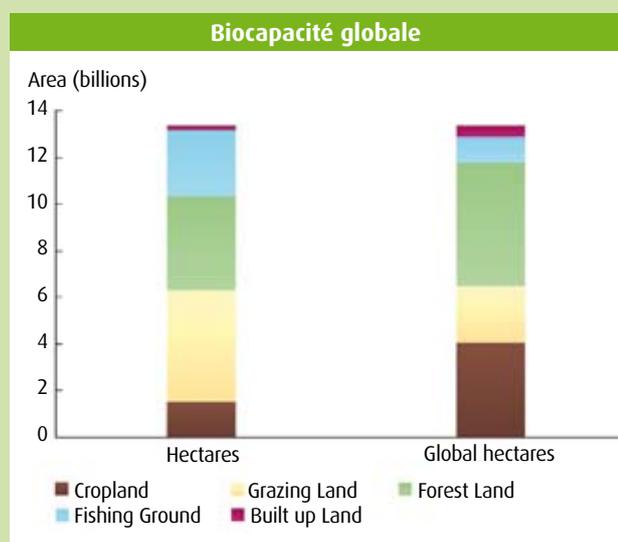
Le calcul de l’empreinte écologique fait intervenir des facteurs de conversion : facteurs de rendement et d’équivalence

Les facteurs de rendement permettent de convertir des tonnes de produits (production agricole, émissions de CO₂, etc.) en hectares. Ces surfaces permettent ainsi de comparer des données qui ne le sont pas par ailleurs. Le principe de base du calcul de ces facteurs repose sur l’utilisation du rendement moyen mondial. Ce rendement moyen est ensuite appliqué à une production nationale de façon à la transformer en surface.

On distingue néanmoins des variantes suivant les empreintes partielles considérées. Par exemple, le facteur de rendement pour l’empreinte partielle du carbone est le taux de séquestration de CO₂ par hectare de forêt.

Les facteurs d’équivalence sont un système de pondération des différents types de sols (terre cultivable, forêt, pâturage...) en fonction de leur productivité agricole potentielle, estimée selon le modèle du GAEZ (*Global Agro-Ecological Zones*, FAO). Les superficies ainsi calculées sont mesurées en hectare global ; par construction, au niveau mondial, le nombre total d’hectares globaux est égal au nombre d’hectares réels.

NB : Les facteurs d’équivalence n’interviennent que lors de l’agrégation des différents types d’espaces.



Le mode de calcul de la biocapacité consiste à multiplier la surface utilisée par chaque type d’usage (cultures, pâturages, forêts, zones de pêche) par un facteur de culture (rendement national/rendement mondial) puis à ajuster ce chiffre en fonction du facteur d’équivalence correspondant.

Biocapacité = surface utilisée x facteur de culture x facteur d’équivalence

Le facteur de culture utilisé diffère selon chaque catégorie :

- pour les terres cultivées, il s’agit du rapport entre le rendement national et le rendement mondial, appliqué à chaque produit primaire ;
- pour les pâturages, c’est le rapport entre le rendement national et le rendement mondial qui est retenu, les productions étant exprimées en poids de matière sèche⁴ ;
- pour la pêche maritime, c’est le rapport entre le rendement par hectare du plateau continental de la France et celui du plateau continental mondial (en kilogramme de biomasse par hectare), alors que pour la pêche en eau douce le facteur retenu est égal à 1 ;
- pour l’artificialisation des terres, l’hypothèse d’une occupation systématique de terres agricoles entraîne l’utilisation du facteur de culture des terres cultivées ;
- pour les forêts, c’est le rapport entre les rendements nationaux et mondiaux de la production de grumes (arbres abattus non encore transformés).

Champ couvert par l’empreinte écologique

L’approche du GFN met l’accent sur la question posée par l’empreinte écologique : de quelles ressources naturelles disposons-nous et quelle quantité en utilisons-nous ?

Le champ d’étude de l’EE est ainsi limité à la partie régénérative et biologique de l’écosystème, c’est-à-dire essentiellement à la biosphère. Les éléments du capital naturel qui ne peuvent pas se régénérer par le biais plus ou moins direct de la photosynthèse sont donc par définition exclus du champ. C’est le cas, par exemple, des ressources extraites du sous-sol et des prélèvements d’eau douce (d’après Boutaud et Gondran, 2009).

Dans la version actuelle des Comptes nationaux d’empreinte écologique (GFN), le terme « déchets » fait uniquement référence aux émissions de CO₂ résultant de la production et de l’utilisation de l’énergie par combustion d’énergie fossile (charbon, pétrole et gaz naturel).

Par ailleurs, l’EE ne décrit pas l’intensité d’utilisation des surfaces, les pertes de biodiversité, ni les activités qui menacent à terme la capacité d’une surface donnée à fournir des services écologiques, tels que les rejets de polluants dans les milieux ou l’érosion des sols. Les concepteurs de l’EE indiquent cependant que la dégradation des sols et des milieux se traduira dans le temps par une baisse des surfaces productives, et donc de la biocapacité.

Enfin, en se limitant aux aspects écologiques de la durabilité, l’EE n’apporte pas d’information directe quant au bien-être humain.

⁴ Le GFN utilise ainsi un rendement à l’hectare du pâturage français de 13,1 tonnes de matière sèche par hectare comparé à un rendement moyen mondial de 6,2 (valeurs constantes de 1961 à 2005).

Évolutions de la méthode

Approches « macro » et « micro » : les premiers calculs d'empreinte écologique à l'échelle des nations utilisaient une méthode « micro » (*component based approach*), basée sur des études d'analyse de cycle de vie. Cependant, en raison du manque d'informations exhaustives sur les cycles de vie des produits, et des problèmes de double comptage, c'est la méthode dite « macro » (*compound based approach*) qui est aujourd'hui retenue par le GFN pour les calculs nationaux. Cette méthode utilise des données nationales agrégées.

Jusqu'en 2008, l'énergie nucléaire était incluse dans le calcul de l'EE, comme s'il s'agissait d'une énergie fossile. Depuis 2009, elle en est exclue.

Cas particulier du nucléaire

« Après de longues discussions et consultations, le comité d'évaluation du GFN a recommandé d'éliminer la composante nucléaire des Comptes nationaux d'empreinte écologique afin d'accroître leur cohérence scientifique. Ce changement a été mis en œuvre dans l'édition 2008. Le comité a conclu que l'approche indirecte des émissions pour le calcul de l'empreinte de l'électricité nucléaire n'était pas scientifiquement valable pour les raisons suivantes :

1. Il n'y a pas de base scientifique derrière l'hypothèse de parité entre l'empreinte carbone de l'électricité provenant de combustibles fossiles et les demandes liées à l'électricité nucléaire.
2. Les principales préoccupations liées à l'électricité nucléaire souvent citées sont les coûts et les subventions excessives, l'avenir du stockage des déchets, le risque d'accidents des centrales, la prolifération des armes et d'autres risques de sécurité.

Les Comptes nationaux d'empreinte écologique sont conçus pour être historiques plutôt que prédictifs et, par conséquent, l'examen des impacts potentiels futurs sur la biocapacité (déchets radioactifs) ne doit pas être inclus. Dans les Comptes nationaux pour l'année 2003, l'empreinte nucléaire représentait environ 4 % de l'empreinte totale de l'humanité.

Toutefois, pour les pays ayant un important approvisionnement en énergie nucléaire, comme la Belgique, la Finlande, la France, le Japon, la Suède et la Suisse, le changement de méthode influence de manière plus importante les valeurs de leur empreinte. »

Source : WWF, rapport Planète vivante, 2008.

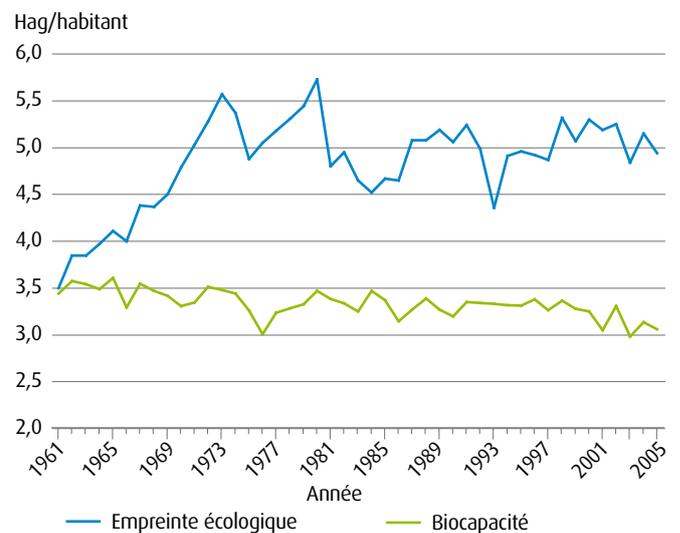
Recherche (GFN et communauté scientifique) : le GFN est soucieux de l'amélioration de la qualité des données et de la méthode ; pour cela il s'appuie sur deux comités d'experts et un « forum scientifique » ouvert sur Internet ; les partenariats avec les pays contribuent aussi à faire évoluer la méthodologie de l'empreinte. En 2007, le GFN et ses partenaires scientifiques ont établi un programme de recherche visant à améliorer la méthodologie des comptes. Parmi les priorités figure une meilleure estimation de l'empreinte associée aux flux commerciaux, combinant plusieurs méthodes (analyses de cycle de vie des produits, analyses entrée-sortie) et incluant une estimation de l'EE du secteur tertiaire.

Évolution de l'empreinte écologique et de la biocapacité de la France

Entre 1961 et 2005, l'empreinte écologique de la France a augmenté de 85 %, passant de 160 Mhag à 300 Mhag. Cependant, deux périodes de forte baisse ont été observées au début des années 1980 et 1990. La biocapacité fluctue fortement au cours de la période passant de 158 Mhag en 1961 à 184 Mhag en 2005, soit une augmentation de 13 %.

Cette évolution est sensiblement identique si l'on s'intéresse aux résultats par habitant, avec toutefois une relative stabilisation de l'empreinte écologique aux alentours de 5 hag par habitant depuis le milieu des années 1970, à comparer avec une biocapacité légèrement supérieure à 3 hag par habitant.

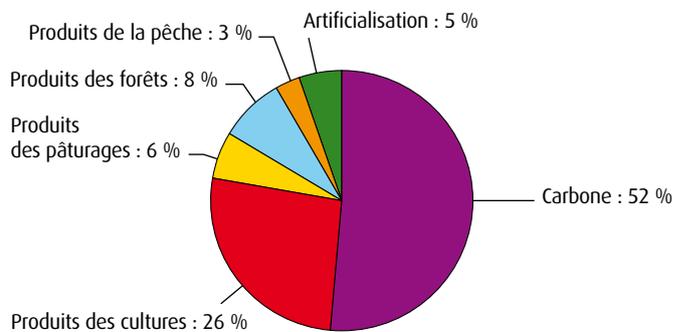
Évolution de l'empreinte écologique et de la biocapacité par habitant de la France



Source : GFN.

La part de la composante énergie dans l'empreinte écologique est de plus en plus élevée. On est ainsi passé d'une empreinte constituée à 50 % de la composante agriculture en 1961 à une empreinte constituée à 50 % de la composante énergie en 2005.

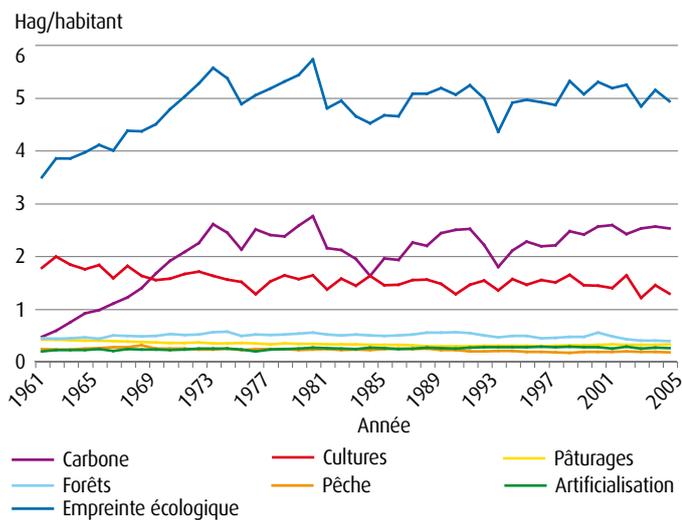
Les composantes de l'empreinte écologique de la France en 2005



Source : GFN.

L’empreinte écologique globale est majoritairement imputable aux empreintes partielles du carbone et des cultures. Les variations de l’empreinte globale résultent, pour l’essentiel, des variations annuelles et des grandes tendances de l’empreinte du carbone. Par ailleurs, elles sont, dans une moindre mesure, impactées par une tendance à la baisse de l’empreinte des cultures, en dehors de quelques épisodes annuels spécifiques.

Évolution des composantes de l’empreinte écologique de la France entre 1961 et 2005



Source : GFN.

L'expertise conduite par le Service de l'observation et des statistiques du Commissariat général au développement durable

La démarche

Le 25 juin 2007, le séminaire du Conseil scientifique de l'Institut français de l'environnement (Ifen) était consacré aux indicateurs globaux d'environnement et de développement durable. En réponse aux attentes exprimées dans le cadre de ce séminaire, l'Ifen (devenu le SOeS) a inscrit l'expertise de l'empreinte écologique appliquée au cas de la France à son programme de travail. L'étude devait analyser les fondements conceptuels de la méthode, les outils et les sources mis en œuvre, de manière à identifier ses avantages, ses limites et les utilisations qui peuvent en être faites. Les critères suivants ont été pris en compte :

- transparence et mesurabilité : cela conditionne le caractère scientifique et reproductible de la démarche ; l'Ifen souhaitait en conséquence disposer de l'algorithme des calculs de façon à mettre en œuvre en son sein la méthode « macro » du *Global Footprint Network*, sur la base des dernières hypothèses standard ;
- robustesse et comparabilité : ces critères peuvent être appréhendés en évaluant l'impact des hypothèses retenues. C'est pourquoi, il a été décidé de procéder au chiffrage de quelques scénarios alternatifs.

Deux phases ont jalonné l'expertise conduite par le SOeS :

Phase 1 – Le calcul standard

La première étape consistait à procéder au chiffrage standard de l'empreinte, par la méthode dite « macro », à partir des algorithmes de calculs et des données fournies par le GFN. Le but était de comprendre la méthode et de savoir la reproduire. Il s'agissait :

- d'apprécier la transparence de la méthodologie de l'empreinte écologique ;
- de juger de la reproductibilité des calculs.

Pour cela, le SOeS s'est attaché à identifier les sources de données et les constantes de conversion utilisées par le GFN, analyser la chaîne de calculs et enfin comparer les résultats.

L'algorithme de calcul de l'empreinte a été traduit sous forme de programme informatique paramétrable. Le chiffrage de l'impact d'hypothèses alternatives est ainsi plus facile et plus fiable.

Phase 2 – Le test de l'impact d'hypothèses alternatives

Cette phase de test visait à produire des chiffrages alternatifs et à mesurer le décalage éventuel avec le chiffrage standard. La sensibilité

Les critères d'évaluation retenus

La reproductibilité et la transparence sont les deux premiers critères privilégiés par le SOeS pour commencer l'évaluation de l'empreinte écologique. Compte tenu de l'abondante littérature disponible sur l'EE, il a en effet été décidé de ne pas se placer d'emblée sur le terrain conceptuel. Néanmoins, l'examen des critères retenus renvoie aux fondements conceptuels de l'indicateur, puisqu'il suscite des questions portant sur sa robustesse, sa comparabilité et sa pertinence.

La démarche retenue s'inspire des travaux de certains épistémologues⁵, pour lesquels la nature scientifique d'une proposition doit être évaluée au regard des possibilités qui sont offertes pour la réfuter. Concrètement, ces auteurs considèrent que la transparence est indispensable pour identifier ce qui, dans la démarche adoptée, relèverait davantage de l'idéologie, de l'apriorisme ou de la métaphysique que d'une logique scientifique.

D'un point de vue plus pragmatique se plonger dans le détail des calculs permet d'apprécier la robustesse de l'indicateur, qu'il s'agisse des concepts, des données ou de l'algorithme des calculs.

Sur le plan conceptuel, les travaux conduits par le SOeS remettent au premier plan certains choix dont on a tendance à oublier les conséquences, alors qu'ils ont un impact direct sur la pertinence de l'indicateur et les conditions de son utilisation. Il en est ainsi, par exemple, de l'hypothèse d'absence de biocapacité en regard de l'empreinte carbone. Le souci d'éviter les doubles comptes explique le choix des concepteurs de l'empreinte, considérant que la superficie en forêt ne peut être utilisée comme source de matériaux, de chauffage et en même temps jouer le rôle puits de carbone. Cette position – sujette à débats au sein du comité de suivi – a des conséquences importantes

sur le niveau de l'empreinte et donc sur l'interprétation plus ou moins optimiste qui en découle.

L'examen détaillé des informations mobilisées permet également d'aborder la question de la robustesse de l'indicateur sous l'angle de sa sensibilité aux sources, à la fraîcheur des données ou aux hypothèses portant sur certaines constantes. Il est essentiel pour statuer sur la comparabilité dans le temps et entre pays. Ainsi, le caractère erratique des évolutions de l'empreinte interroge sur la pertinence de l'indicateur lorsqu'il s'agit de dresser un diagnostic interprétable. Cela a justifié la réalisation d'une analyse temporelle approfondie des données statistiques.

La transparence et la reproductibilité ont également permis d'aborder la robustesse et la pertinence par le biais de l'algorithme des calculs.

Au-delà des travaux statistiques portant sur la reproduction des calculs et sur l'analyse temporelle des résultats, le SOeS a procédé à une analyse multidimensionnelle des données visant à resituer l'empreinte écologique à côté des indicateurs de développement durable européens.

Il s'agissait notamment de rappeler – ce que ses concepteurs reconnaissent – que l'empreinte ne prend pas en compte l'ensemble des dimensions du développement durable et que d'autres indicateurs apportent une information complémentaire. Cet éclairage paraissait nécessaire à la suite du dépôt d'une proposition de loi visant à faire de l'empreinte « l'indicateur phare » en matière de développement durable⁶.

⁵ Voir notamment l'œuvre de Karl Popper, mais aussi les controverses avec Imre Lakatos et Paul Feyerabend.

⁶ Proposition de loi tendant à réduire l'empreinte écologique de la France. Assemblée nationale n° 1369, 6 janvier 2009.

des résultats aux modifications suivantes a été testée dans cette phase :

- prise en compte d'autres jeux de données : recours à des bases de données nationales ou actualisées ;
- impact de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2020 ou 2050 ;
- nouvelles hypothèses sur les coefficients : séquestration du carbone, et introduction de la notion de rendement agricole soutenable.

Un comité de suivi a été constitué, afin d'assister le SOeS tout au long de l'étude et de l'aider à cerner les forces et faiblesses de l'empreinte écologique et à choisir les jeux d'hypothèses alternatifs à tester.

Le SOeS a procédé au chiffrage standard de l'empreinte, à partir des algorithmes de calculs et des données fournies par le GFN. Un contrat a été établi avec le GFN pour la fourniture des données et algorithmes (édition 2008 des Comptes nationaux de l'empreinte écologique pour la France : série 1961-2005).

Les résultats du test technique

Les résultats du test sont présentés en détail dans le rapport technique ; on reprend ici les enseignements jugés majeurs de ce test de l'empreinte écologique.

NB : Le test consistait à étudier la possibilité de reproduire et de standardiser les calculs sur la base de la méthodologie et des données mises à disposition par le GFN. Cette démarche a néanmoins conduit à formuler des interrogations, des remarques, ainsi que des réserves sur la méthodologie retenue.

Conclusions de la phase 1 : globalement, la reproductibilité des calculs est bonne. L'origine des données statistiques utilisées est bien identifiée et ces données sont issues de sources statistiques officielles et indépendantes (Nations unies, Agence internationale de l'énergie...). La publication pour la première fois en 2008, d'un guide méthodologique détaillé constitue un effort important de la part du GFN vers plus de transparence. Toutefois, l'origine des constantes de conversion n'est pas encore suffisamment explicite. Par ailleurs, la méthodologie évolue ; or, les changements de méthode sont peu ou pas expliqués (hormis l'exclusion du nucléaire dans l'édition 2008).

La reproductibilité

- la reproductibilité des calculs de l'empreinte écologique est bonne. L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et de ceux du GFN est compris entre - 3,2 % et + 0,5 %. L'écart moyen est de - 0,5 % et l'écart médian de - 0,2 %. Sur la période étudiée (1961-2005) on constate que cet écart est plus important avant 1975 (écart moyen de - 1,5 %). L'écart se stabilise ensuite pour osciller entre - 0,5 % et + 0,5 %. En étudiant les composantes de cette empreinte, on peut attribuer cet écart à la composante « cultures ». Plus précisément, il est imputable à un problème de cohérence entre les facteurs de conversion des têtes de bétail en tonnes de viande décrits dans le guide et ceux utilisés dans le fichier ;
- la reproductibilité des calculs concernant la biocapacité n'a pu être testée dans les mêmes conditions : la source utilisée ici pour l'estimation des surfaces est l'inventaire de l'occupation des sols CORINE Land Cover (CLC⁷). En effet, le SOeS ne dispose pas de l'information

sur les postes retenus par le GFN pour les calculs. Les écarts importants rencontrés résultent sans doute d'une sélection différente de postes.

La transparence

- la publication, pour la première fois en 2008, d'un guide méthodologique détaillé constitue un effort important de la part du GFN vers plus de transparence ;
- l'ergonomie du nouveau tableur et le guide méthodologique ont facilité la prise en main de l'outil ;
- l'origine des données statistiques utilisées est bien identifiée et ces données sont issues de sources statistiques officielles (FAO, Agence internationale de l'énergie...). On note toutefois quelques exceptions : les sources permettant l'estimation de la part de la France dans le transport international (*bunker fuel*), ainsi que la part des cultures non récoltées (*unharvested cropland*) ne sont pas citées ;
- l'origine des constantes de conversion n'est pas toujours suffisamment explicite ; c'est en particulier le cas pour l'énergie grise. C'est aussi le cas pour certains facteurs de rendement (forêts, pâturages) ;
- l'origine de certaines nomenclatures n'est pas toujours suffisamment explicite (cultures, élevage) ;
- la méthodologie évolue, c'est un point positif ; cependant, les changements de méthode sont parfois peu explicites. Jusqu'en 2003, le nucléaire était pris en compte dans le calcul de l'empreinte globale. En 2003, l'empreinte du nucléaire s'élevait à 25 % de l'EE totale de la France. Dans l'édition 2008 des comptes, le nucléaire n'intervient plus dans le calcul. Or, pour la même année 2003, l'empreinte n'est diminuée que de 14 %. C'est donc que la méthodologie a changé pour les autres composantes. Dans l'édition 2008, l'empreinte des cultures de l'année 2003 est beaucoup plus élevée (+ 50 %) que celle qui figurait dans la précédente édition.

La robustesse méthodologique

- les nomenclatures utilisées sont parfois anciennes (ONU-1976 alors que l'actuelle date de 2006), mais ceci est dû à la nécessité de disposer de séries complètes pour tous les pays ;
- certains taux de conversion sont constants sur toute la période d'étude (énergie, cultures, forêts, taux d'extraction des produits secondaires à partir des produits primaires) ;
- le niveau de détail des données est très hétérogène ;
- méthodes d'estimation : le GFN utilise les données de CORINE Land Cover pour appréhender l'occupation des sols. Or, ces données ne sont disponibles que pour 1990, 2000 et 2006. Les données manquantes sont estimées en supposant que l'augmentation de population se traduit par une augmentation proportionnelle d'occupation du sol, cette méthode étant discutable ;
- la méthodologie et les données fournies par le GFN sont mises à disposition sous forme d'un classeur de logiciel bureautique, pour faciliter l'accès des utilisateurs non-informaticiens. Mais les feuilles de calculs sont extrêmement volumineuses. Les calculs du SOeS ont donc été effectués avec un outil informatique jugé plus adapté. Ils sont reproductibles et l'on garde la trace du paramétrage retenu lorsqu'on teste des hypothèses alternatives portant sur les données ou les coefficients de conversion.

Conclusions de la phase 2 :

- le calcul de l'empreinte partielle du carbone à partir des données des Douanes est correctement reproductible, à la condition d'établir une table de correspondance entre nomenclatures ;

⁷ Nomenclature CORINE Land Cover : <http://www.ifen.fr>, rubrique « Bases de données » > « Occupation des sols ».

- la nomenclature utilisée par le GFN pour la production de produits agricoles n'a pas pu être clairement identifiée, malgré les demandes de précision formulées par le SOeS ; en conséquence, faute d'avoir pu établir une correspondance satisfaisante avec la nomenclature utilisée par le système statistique agricole français, le test est resté trop imprécis pour fournir des résultats interprétables ;
- en utilisant un taux de séquestration du CO₂ par la forêt de 3,89 tonnes par hectare (GIEC), au lieu de 3,59 tonnes (GFN), on obtient un écart de 0,2 hectare global en termes d'empreinte, ce qui représente 4 % de l'empreinte totale. Cette influence des constantes de conversion renforce la nécessité de clarifier la méthodologie d'obtention de l'énergie grise. Elle justifie également d'obtenir davantage de précisions concernant les taux d'extraction utilisés pour les produits secondaires ;
- l'impact d'une réduction des émissions de CO₂ et le passage à une agriculture biologique ont été testés « toutes choses égales par ailleurs ». L'exercice révèle les limites, voire les dangers d'une approche purement mécanique. La mise en œuvre d'une approche systémique serait grandement facilitée par le recours à un logiciel informatique permettant de paramétrer « le modèle » de l'empreinte.

La comparabilité

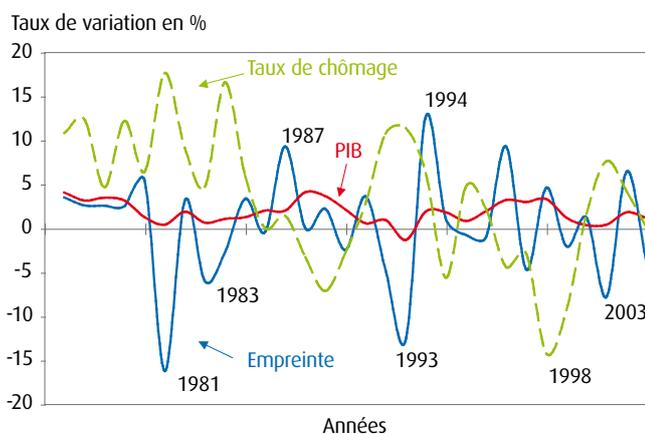
Le rapport technique a montré que les évolutions de l'empreinte écologique sont parfois erratiques au cours du temps. Peut-on imputer ces mouvements à l'effet de la conjoncture économique ? Reflètent-ils au contraire de réels mais momentanés changements de comportements ?

Pour essayer de répondre à ces questions, qui renvoient à la robustesse et à la pertinence de l'indicateur, une analyse temporelle des données statistiques a été conduite sur la période 1975-2005.

Les variations de l'empreinte sont assez erratiques d'une année à l'autre, alors que la valeur de l'indicateur est restée relativement stable au cours de la période 1975-2005 : 4,9 hag/hab en 1975, 5,1 en 1990 à mi-parcours et à nouveau 4,9 en 2005. En trente ans, la valeur absolue du taux de variation a été une fois sur trois supérieures à 5 %. Elle a dépassé 10 % en valeur absolue en 1981 (- 16,6 %), 1993 (- 12,7 %) et 1994 (+ 12,6 %).

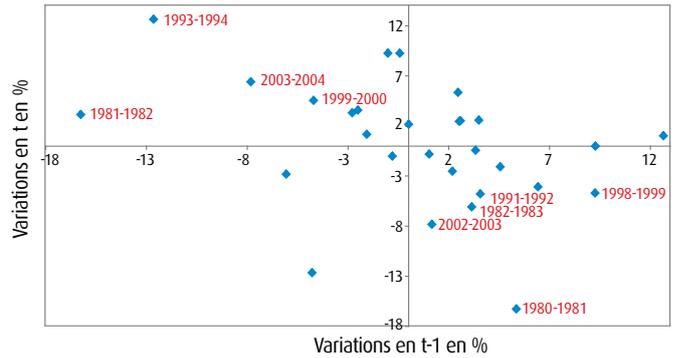
Les graphiques ci-après reflètent ces fluctuations.

L'empreinte écologique, de fortes fluctuations annuelles



Source : GFN, Insee ; traitements SOeS.

Empreinte écologique, des évolutions irrégulières



Note : Sur le graphique, seuls ont été libellés les couples d'années correspondant à un changement du sens des variations. Entre 1981 et 1982, par exemple, le taux de variation passe de -16 % à + 3 %. Entre 1998 et 1999, il passe de + 9 % environ à près de - 5 %.

Source : GFN, traitements SOeS.

Enseignement de l'analyse précédente : les fluctuations des valeurs de l'indicateur sont difficilement interprétables à court terme. Elles rendent son utilisation délicate à des fins d'éclairage des politiques publiques.

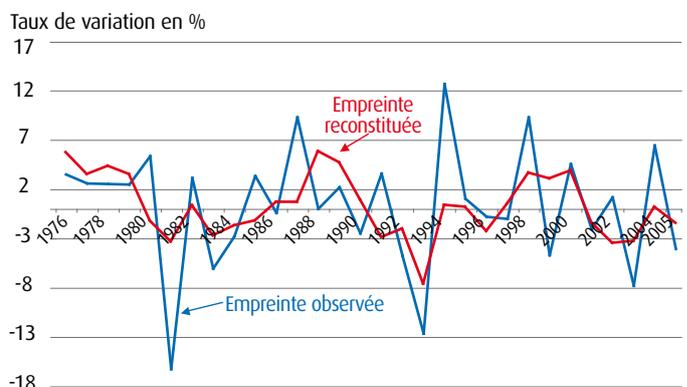
L'analyse des corrélations

Les années de forte baisse correspondent à des moments de basse conjoncture, souvent marqués par un net ralentissement du taux de croissance du PIB par habitant et une élévation brutale du taux de chômage. En 1993, par exemple, l'empreinte baisse de 12,7 %, le PIB par habitant recule de 1,4 % (+ 0,9 % en 1992) et le taux de chômage augmente de 1 point. En 1994, au contraire, le PIB par habitant augmente de 1,9 % et la hausse du chômage se poursuit mais à un rythme deux fois moins élevé que l'année précédente. L'empreinte augmente alors de 12,6 %.

Globalement, le coefficient de corrélation linéaire entre taux de variation de l'empreinte et celui du PIB (+ 0,52) traduit une relation linéaire significative⁸ entre les deux séries. La relation entre les variations de l'empreinte et du taux de chômage est à peine significative, malgré quelques évolutions ponctuelles allant dans le même sens.

Le graphique ci-dessous propose une reconstitution⁹ des variations de l'empreinte à partir des variations du PIB par habitant. Les écarts entre estimation en rouge et observation en bleu donnent une idée des variations de l'empreinte non imputables à la conjoncture.

Impacts des variations du PIB sur celles de l'empreinte



Source : GFN, traitements SOeS.

⁸ Avec 3,2 % de risques de rejeter cette hypothèse (cf. T-Student de la régression).

⁹ À l'aide du modèle : $VEE_{t,t-1}^i = \alpha VPIB_{t,t-1}^i + \beta + \varepsilon_{t,t-1}$ où VEE et VPIB représentent respectivement les taux de variation annuels entre t et t-1 de l'empreinte et du PIB.

Enseignement de l'analyse précédente : malgré le décalage temporel et la différence d'amplitude entre séries, on perçoit visuellement la corrélation entre variations de l'empreinte et variations du PIB. Au-delà, peut-on interpréter les écarts entre série reconstituée à l'aide du PIB et série observée comme étant le reflet de changements des pressions anthropiques à court terme une fois éliminé l'effet conjoncturel ? Il est bien difficile de répondre à cette question. L'ampleur des retournements et des écarts qu'ils peuvent générer entre séries semblent *a priori* bien importants pour s'interpréter comme des changements de comportements.

L'analyse des contributions

Si l'on excepte les années 2003 et 2004, c'est l'empreinte carbone qui contribue¹⁰ en moyenne pour environ 60 % aux variations globales de l'empreinte. En 2003 et 2004, au contraire, c'est l'empreinte des cultures qui est à l'origine de l'essentiel de la variation globale. On retrouve ici le lien avec la conjoncture et le climat. En période d'activité ralentie, la consommation d'énergie se contracte et l'empreinte diminue. En 2003, la production des cultures recule sous l'effet de la sécheresse et l'empreinte baisse, les rendements agricoles mondiaux retenus pour le calcul restant assez stables cette année-là.

L'empreinte de l'artificialisation contribue peu aux fluctuations de l'empreinte lors des années de forte variation de l'indicateur. On peut cependant être surpris par les évolutions heurtées de cette composante dont la variation annuelle dépasse une fois sur cinq 10 % en valeur absolue. En effet, sur la base des informations fournies par CORINE Land Cover, on estime à seulement 3 % la progression de l'artificialisation en France entre 2000 et 2006. De plus, du fait de son poids limité, la consommation d'énergie hydroélectrique n'a qu'un impact limité sur l'évolution de la composante artificialisation. En réalité, ce sont les variations du facteur de rendement des cultures utilisé dans les calculs qui impriment les mouvements de l'empreinte imputable à l'artificialisation.

Enseignement de l'analyse précédente : l'impact de la composante artificialisation est tellement faible, et ses variations sont tellement volatiles, qu'il y a lieu de se demander s'il est bien raisonnable d'en tenir compte dans les calculs.

Les travaux complémentaires menés par le SOEs

Le 9 janvier 2009, Madame Martine BILLARD et Messieurs Yves COCHET, Noël MAMÈRE et François de RUGY ont déposé la proposition de loi n° 1369 dont l'article 1^{er} dispose que : « l'empreinte écologique constitue l'instrument d'évaluation des politiques mises en œuvre pour lutter contre le changement climatique et préserver la vie sur terre ».

Pour alimenter ce débat, le SOEs a proposé la réalisation d'une brève étude statistique permettant de situer l'empreinte écologique à l'échelle européenne à côté d'autres indicateurs.

Cette analyse illustre le fait que, malgré sa cohérence avec certains indicateurs de développement durable (IDD) et son apport spécifique, l'empreinte écologique ne peut refléter à elle seule tous les enjeux

économiques, sociaux et environnementaux du développement durable. Elle montre également que d'autres indicateurs environnementaux sont porteurs d'information, notamment « pour l'évaluation des politiques mises en œuvre pour lutter contre le changement climatique et préserver la vie sur terre ». Les concepteurs de l'empreinte écologique n'ont d'ailleurs jamais prétendu en faire l'unique indicateur de développement durable. Mais la mise au point ci-dessus semblait nécessaire en réponse à la proposition de loi tendant à réduire l'empreinte écologique de la France¹¹.

Les données étudiées concernent 23¹² des 27 pays de l'Union européenne et portent sur les indicateurs européens de développement durable suivants, retenus sur la base de leur disponibilité pour un nombre maximum de pays européens :

Indicateurs européens utilisés pour l'analyse

| Niveau | Intitulé | Nom abrégé |
|--------|--|------------|
| 1 | Émissions de gaz à effet de serre | GES |
| 1 | Pourcentages des énergies renouvelables dans la consommation intérieure totale d'énergie | Penr |
| 1 | Taux de croissance réel du PIB par habitant | TcrPIB |
| 1 | Taux de risque de pauvreté après transferts sociaux | Tpauv |
| 3 | Espérance de vie des hommes à 65 ans | EvieH65 |
| 2 | Consommation électrique des ménages | C elmen |
| 2 | Déchets municipaux générés | Déchets |
| 2 | Dette brute consolidée des administrations publiques en % du PIB | Dette |
| 2 | Investissements du secteur public en % du PIB | Fbcfpub |
| 2 | Répartition modale du transport de fret : part des chemins de fer en % | FretSNCF |
| 2 | Taux d'emploi des 15 à 64 ans | Temp1564 |
| 2 | Taux de mortalité dû à des maladies chroniques - de 65 ans | TmortCh |
| 2 | Personnes tuées dans les accidents de la route | TuésR |
| s | Produit intérieur brut par habitant | PIB/hab |
| s | Empreinte écologique | Empreinte |
| s | Solde écologique | Solde écol |

Note technique : les indicateurs de niveau 1 correspondent à des objectifs majeurs associés à la stratégie européenne de développement durable, ceux de niveau 2 à des objectifs prioritaires et ceux de niveau 3 à des actions. Les indicateurs de type « s » ne font pas partie de la liste des IDD européens. Ils ont été retenus compte tenu de leur intérêt pour l'analyse et traités en éléments supplémentaires dans le cadre de la méthode d'analyse factorielle des données.

Source : Eurostat, traitements SOEs.

Le tableau croisant en ligne les 23 pays et en colonne ces indicateurs a été traité en recourant à une méthode d'analyse des données multidimensionnelle dont le principe est rappelé dans l'encadré ci-après.

¹¹ Proposition de loi tendant à réduire l'empreinte écologique de la France. Assemblée nationale n° 1369, 6 janvier 2009. L'article 1^{er} de cette proposition de loi est ainsi rédigé : « Les objectifs et résultats des politiques mises en œuvre pour lutter contre le changement climatique et s'y adapter, préserver la biodiversité ainsi que les services qui y sont associés, contribuer à un environnement respectueux de la santé, préserver et mettre en valeur les paysages sont évalués au moyen d'un outil dénommé « empreinte écologique ».

¹² La Bulgarie, Chypre, Malte et la Roumanie n'ont pas été retenus pour les calculs du fait de données manquantes.

¹⁰ La contribution d'une composante *i* est calculée comme suit :

$$C_{i,t,t-1}^i = \frac{V_{i,t,t-1}^i}{|V_{i,t,t-1}^i|} \text{ où } VEE_{i,t,t-1} = \sum_i VEE_{i,t,t-1}^i$$

La méthode d'analyse

En analyse factorielle des données (AFD), on étudie un tableau volumineux dont les colonnes correspondent à des variables¹³ et les lignes à des observations. Le principe général de l'algorithme des calculs est presque toujours le même, les méthodes ne différant entre elles qu'au travers du mode de transformation initial des données (métrique et poids).

On cherche une représentation simplifiée, mais pas trop déformée de l'information, en recourant à sa visualisation sous la forme d'un plan ou d'une succession de plans.

Les axes qui engendrent ces plans n'ont pas d'interprétation *a priori* puisqu'ils sont synthétiques : ils correspondent en effet aux meilleurs axes d'inertie du nuage correspondant au tableau initial. Ils doivent donc être interprétés en recourant à une technique qui peut différer d'une méthode à l'autre, mais repose dans tous les cas sur des aides mathématiques à l'interprétation.

L'analyse factorielle multiple (AFM) reprend les principes généraux de l'AFD, mais offre des possibilités d'analyse supérieures lorsque les colonnes du tableau peuvent être regroupées en sous-ensembles de variables présentant un intérêt pour l'analyse. Dans l'exemple présent, les sous-ensembles sont les différentes dimensions du développement durable (économie, social et environnement) représentées chacune par plusieurs variables.

La méthode équilibre le rôle des groupes lorsqu'ils sont composés de nombre de variables différents. Elle met en évidence les écarts entre nuages partiels (chaque dimension du développement durable) et nuage global.

¹³ En analyse des correspondances, les colonnes décrivent les modalités d'une variable qualitative. En analyse des correspondances multiples, les colonnes sont les modalités de plusieurs variables qualitatives.

Le graphique suivant donne une idée approchée des corrélations linéaires entre indicateurs. Son interprétation est assez simple :

- les vecteurs orientés dans la même direction et qui forment un angle fermé correspondent à des indicateurs corrélés positivement¹⁴ ;
- les vecteurs en sens opposé correspondent à des indicateurs corrélés négativement ;
- les vecteurs perpendiculaires correspondent à des indicateurs sans corrélation linéaire.

On retrouve le résultat selon lequel l'empreinte écologique augmente avec le PIB par habitant.

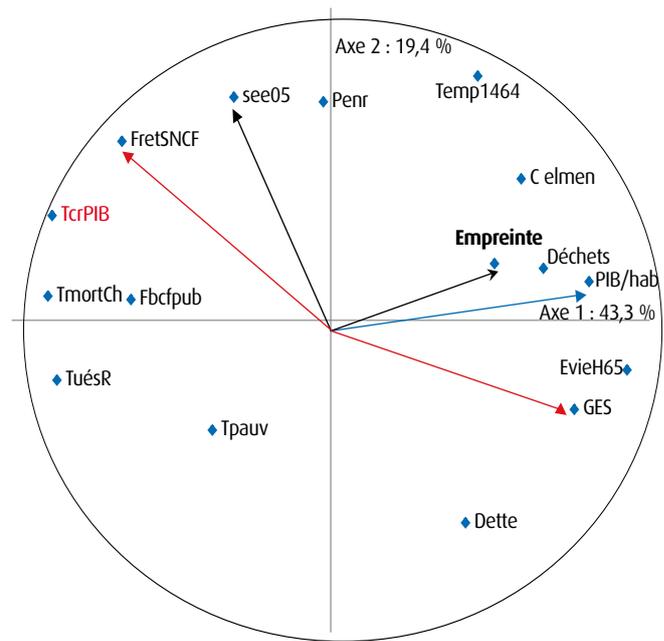
Plus intéressante et probante pour l'indicateur, l'empreinte par habitant est corrélée avec des IDD traduisant les pressions anthropiques imposées à l'environnement. L'empreinte est ainsi d'autant plus forte que la quantité de déchets par ménage est plus élevée. Bien que moins nette, la corrélation significative¹⁵ entre consommation électrique par ménage et empreinte écologique doit être soulignée. Il en est de même en ce qui concerne les gaz à effet de serre¹⁶.

¹⁴ On dispose également d'aides mathématiques à l'interprétation qui permettent d'étayer le diagnostic.

¹⁵ Au sens statistique, pour 23 observations, le coefficient de corrélation linéaire doit être supérieur à 0,3 pour rejeter le risque de conclure à tort à une liaison entre indicateurs (fixé à 5 %).

¹⁶ D'un point de vue statistique, ces corrélations reflètent plus une colinéarité, c'est-à-dire un lien tenant au mode de calcul de l'empreinte, qu'une causalité.

Une analyse des corrélations entre empreinte écologique et autres indicateurs de développement durable

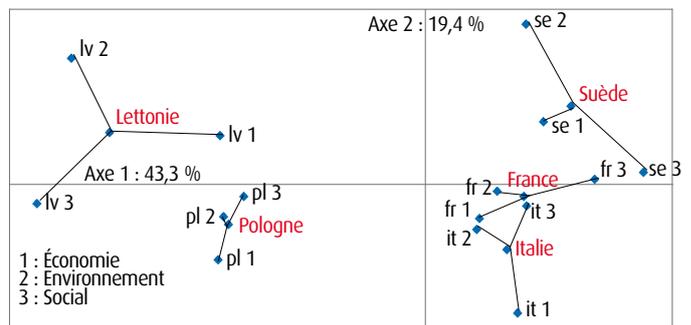


Source : GFN, Eurostat ; traitements SOeS.

D'autres résultats sont au contraire moins conformes aux attentes. Bien qu'il ne faille pas y voir de lien de cause à effet, le risque de pauvreté augmente lorsque l'empreinte diminue, tout comme la mortalité chronique ou la mortalité routière. Cette corrélation négative traduit simplement le fait que les pays dans lesquels ces risques sont élevés souffrent encore d'un certain retard sur le plan sanitaire et social et sur celui des infrastructures, lié à un faible niveau de développement économique.

Par ailleurs, pour l'ensemble des 23 pays pris en compte, l'indicateur apparaît sans lien significatif avec le pourcentage des énergies renouvelables dans la consommation intérieure totale d'énergie.

Le comportement de quelques pays vis-à-vis des 3 piliers du développement durable



Source : GFN, Eurostat ; traitements SOeS.

À partir de quelques exemples, le graphique ci-dessus rappelle que le comportement global d'un pays en matière de développement durable – au sens des indicateurs retenus – est la résultante de comportements partiels caractéristiques de chacun des piliers économiques (codé 1), social (3) et environnemental (2). La France et la Suède sont, par exemple, beaucoup plus proches pour les comportements décrits par les variables sociales que pour les variables environnementales.

Le dernier enseignement de cette analyse concerne l'absence de corrélation linéaire entre empreinte et solde écologique. Cela signifie que toutes sortes de cas de figure peuvent exister, parmi lesquels :

- une empreinte faible dans le contexte européen et un solde écologique négatif : c'est le cas qui prévaut en Pologne et aux Pays-Bas compte tenu d'une biocapacité modeste ;
- une empreinte élevée et un solde écologique positif : on observe ce cas en Finlande et en Suède, pays qui disposent d'une forte biocapacité.

Pour mieux comprendre de telles situations, il faut rappeler que l'empreinte est calculée dans une optique de consommation, ce qui signifie que les importations d'un pays sont bien prises en compte dans sa consommation. Cette façon de procéder renvoie au souci d'appréhender le développement durable dans un cadre globalisé et solidaire. Ainsi, l'empreinte d'un pays industriel n'est-elle pas minorée en cas de recentrage sur des activités de conception et de délocalisation des activités productives. Le déficit écologique d'un pays donné peut donc être élevé du fait de son commerce extérieur alors même que l'état de son environnement est préservé, voire s'améliore. Il faut être bien conscient de ce choix dans l'interprétation de l'empreinte au niveau national.

Enseignements de l'analyse précédente : l'empreinte écologique ne peut refléter à elle seule tous les enjeux économiques, sociaux et environnementaux du développement durable. D'ailleurs, les concepteurs de l'indicateur ne revendiquent pas de telles qualités pour leur indicateur.

L'empreinte écologique fournit des indications cohérentes avec certains indicateurs environnementaux, complémentaires avec d'autres. Parfois, à l'opposé, elle apparaît sans corrélation significative avec des indicateurs signifiants tels que, par exemple, la part des énergies renouvelables dans le total de la consommation d'énergie.

Enfin, le niveau de l'empreinte par habitant et le solde écologique doivent être analysés simultanément compte tenu de l'absence de corrélation qui les caractérise.

Les réflexions du comité de suivi de l'étude

Composition et rôle du comité de suivi

Le comité de suivi était composé de représentants du GFN, de l'administration, de la communauté scientifique, de structures associatives et d'experts (liste des membres en annexe).

Son rôle était d'aider le SOeS à cerner les forces et faiblesses de l'outil et les tests méthodologiques complémentaires à réaliser.

Les débats au sein du comité de suivi

Trois réunions ont eu lieu en novembre 2007, et en avril et juillet 2009.

Les discussions ont porté sur l'organisation de l'étude, les aspects techniques, les forces et faiblesses de l'empreinte écologique.

Des attentes différentes en termes d'indicateurs

Il est apparu que tous les participants n'avaient pas le même niveau de connaissance technique de l'outil, notamment du fait de besoins très différents en termes d'indicateurs. Certains recherchent un outil de sensibilisation qui soit utilisable au niveau mondial ; d'autres un outil adapté pour orienter l'action au niveau local. En Belgique, par exemple, l'étude menée par le bureau fédéral du Plan a pour objectif d'analyser la pertinence de l'empreinte en tant qu'indicateur de développement

durable ; l'étude vise également à identifier les liens avec la Comptabilité nationale et les comptes satellites de l'environnement.

Des points d'accord et de désaccord sur les forces et faiblesses de l'empreinte écologique

Les qualités de l'empreinte font partie des points d'accord entre les membres du comité de suivi :

- outil puissant de communication/sensibilisation ;
- concept original ;
- relations entre un pays et le monde ;
- responsabilisation des « consommateurs ».

Il y a aussi accord sur ce que ne mesure pas l'empreinte écologique.

L'un des points importants de débat et de désaccord porte sur la définition du « dépassement » ou déficit écologique et sur le fait que ce déficit repose essentiellement sur le surplus d'émissions de CO₂.

Au niveau mondial, la balance écologique est par construction équilibrée pour les espaces cultivés, les pâturages et les espaces artificialisés. Cela ne signifie pas pour autant que certains déséquilibres tels que le surpâturage, par exemple, n'existent pas localement. En revanche, le déséquilibre est possible pour la forêt et la pêche (déforestation, surpêche).

Pour l'empreinte carbone, le solde écologique est par construction négatif. L'empreinte carbone est calculée comme l'espace forestier nécessaire pour absorber le CO₂ émis par les activités humaines et non séquestré par les océans ; or, dans la présentation qui est faite des comptes de l'empreinte (voir tableau ci-après), il n'apparaît pas de biocapacité spécifique en regard : même si la forêt joue en même temps le rôle de puits de carbone et de production de bois, le GFN a choisi de n'affecter chaque surface qu'à une seule fonction. Il considère en effet que du bois exploité émettra à plus ou moins court terme son CO₂ dans l'atmosphère. L'empreinte carbone doit donc être considérée comme une forme de surface forestière fictive, mise en réserve, qui n'aurait pour vocation unique que de séquestrer le carbone émis aujourd'hui en surplus¹⁷.

Or, l'empreinte carbone représente la moitié de l'EE (52 % pour la France). La conséquence en est que le déficit écologique mesuré par l'empreinte au niveau mondial reflète essentiellement le surplus d'émissions de CO₂.

Empreinte écologique, biocapacité et solde écologique de la France en 2005

| En hag/hab | Empreinte écologique | Biocapacité | Solde écologique |
|------------------------------|----------------------|-------------|------------------|
| Cultures | 1,28 | 1,55 | 0,27 |
| Pâturages | 0,32 | 0,34 | 0,02 |
| Forêts | 0,39 | 0,73 | 0,34 |
| Pêche | 0,17 | 0,17 | 0 |
| Empreinte carbone | 2,52 | | -2,52 |
| Artificialisation des terres | 0,25 | 0,25 | 0 |
| Total | 4,93 | 3,05 | -1,88 |

Source : GFN.

¹⁷ Boutaud, communication personnelle.

Le WWF-France, Global Footprint Network et d'autres experts du comité de suivi expriment un autre point de vue.

Ils considèrent au contraire que l'empreinte écologique, dont la méthodologie additionne tous les services écologiques liés à l'utilisation des produits des sols et à l'absorption des émissions de carbone, et compare cette somme à la biocapacité totale, permet justement de montrer qu'il y a un dépassement écologique GLOBAL. Ils l'expliquent par le fait que les surfaces naturelles sont en compétition quant à leur usage : un hectare de terre cultivée pour des pommes de terre n'est plus disponible pour accueillir un hectare de surface urbaine, ou un hectare de forêt pour produire du bois ou fixer du carbone. Cette approche prend tout son sens par exemple dans l'analyse de l'impact des agrocarburants : une analyse qui se limite à mesurer l'empreinte carbone d'un agrocarburant type éthanol montre une empreinte écologique plus faible pour l'agrocarburant que pour l'essence. En revanche, une analyse complète (empreinte carbone + empreinte liée aux sols cultivés pour produire l'éthanol) montre que l'empreinte écologique de l'agrocarburant peut bien être supérieure à celle de l'essence. La concurrence dans l'usage des terres est donc bien réelle, comme le montre cet exemple qui illustre les limites des agrocarburants soulevés par de plus en plus de scientifiques.

Le WWF-France, le GFN et d'autres experts du comité de suivi concluent ainsi que l'empreinte écologique met en évidence un déficit écologique qui ne repose pas « essentiellement sur le surplus d'émissions de CO₂ », comme affirmé dans le point de vue qui précède, mais sur un dépassement global (sols + carbone pris dans leur ensemble) des capacités naturelles de la planète.

Il a été également souligné que l'empreinte écologique raisonne avec les technologies actuelles, lorsqu'elle utilise par exemple des facteurs de conversion constants sur toute la période d'étude.

Quelle utilisation de l'empreinte ?

Cette expertise aura, dans un premier temps, permis d'explicitier la méthodologie de l'empreinte écologique. Cette phase s'est avérée très utile, bien que l'indicateur soit *a priori* considéré comme susceptible d'être facilement compris par le grand public. En effet, malgré la publication d'un guide méthodologique consacré à l'empreinte par le GFN en 2008, les échanges entre les membres du comité de suivi ont montré que le niveau d'information et de compréhension du concept variait beaucoup d'un participant à l'autre.

Transparence et reproductibilité

La possibilité de reproduire les calculs a été testée avec succès dans le cas de la France. Mais cette phase de l'expertise a révélé quelques manques en matière de transparence ou limites inhérentes aux données susceptibles d'avoir des conséquences non négligeables sur le chiffrage de l'empreinte. Il en est ainsi de l'origine – mal connue – des constantes de conversion et de la nécessité de clarifier la notion d'énergie grise.

Interprétation des évolutions de l'empreinte

L'analyse temporelle conduite par le SOeS a montré que l'EE, dont le niveau évolue peu pour la France au cours de la période 1975-2005, était sujette à des variations erratiques de court terme davantage liées aux soubresauts conjoncturels qu'à des changements de comportement structurels. D'ailleurs, si l'on excepte deux années, les évolutions du CO₂ contribuent en moyenne pour 60 % aux variations globales de l'EE. L'utilisation de l'EE à des fins d'évaluation des politiques publiques en faveur du développement durable s'avère donc problématique.

Points d'accord

Les membres du comité de suivi constatent que la méthodologie servant à élaborer l'indicateur évolue au service d'une amélioration de la robustesse des calculs. Ils considèrent dans leur ensemble que l'EE constitue un outil de communication puissant pour sensibiliser les différentes composantes de la société à des comportements de consommation plus respectueux de l'environnement.

Par ailleurs, ils estiment que l'indicateur répond au souci d'appréhender le développement durable dans un cadre globalisé et solidaire. Mais le consensus existe également, y compris avec ses concepteurs, autour de l'idée que l'empreinte écologique ne peut à elle seule refléter tous les enjeux économiques, sociaux et environnementaux.

Points de désaccord

Pour les uns, tels que le WWF-France et le GFN, l'EE permet de montrer qu'il y a dépassement global des capacités naturelles de la planète, c'est-à-dire que le mode de développement actuel n'est pas soutenable à terme.

Pour les autres, majoritaires en nombre, le déficit repose essentiellement sur le surplus d'émissions de CO₂, ce qui les conduit à préférer une empreinte carbone jugée plus simple et plus rigoureuse.

Réponse du Global Footprint Network

Le Service de l'observation et des statistiques (SOeS) fournit une étude approfondie qui a permis d'apprécier la transparence et la reproductibilité de l'édition 2008 des Comptes nationaux de l'empreinte écologique (EE) publiés par le Global Footprint Network (GFN). Cette contribution est la bienvenue car les critiques et les vérifications sont essentielles au progrès scientifique. L'expertise menée par le SOeS montre un niveau élevé de transparence et de reproductibilité de la méthode.

Il s'agit d'une conclusion significative, qui conforte le GFN dans ses investigations scientifiques concernant une question qui pourrait s'avérer être la plus importante du XXI^e siècle : combien les activités humaines utilisent-elles de biocapacité ?

L'empreinte écologique comptabilise la demande exercée par les hommes envers les « services écologiques » fournis par la nature. Elle s'efforce ainsi de répondre à une question scientifique précise, et non à tous les aspects de la durabilité, ni à toutes les préoccupations environnementales. Elle analyse la situation sous cet angle particulier, en partant de l'hypothèse que la capacité de régénération de la Terre pourrait être le facteur limitant pour l'économie humaine si celle-ci continue à surexploiter ce que la biosphère est capable de renouveler.

Les chiffres de l'EE présentés dans l'édition 2008 sont-ils parfaits ? Non. Le seront-ils un jour ? Peut-être pas, mais ils s'améliorent avec le temps. C'est la nature de toute investigation scientifique, y compris les expertises comme celle à laquelle nous répondons. Mais il faudra plus que de telles expertises pour perfectionner la méthode et ses résultats. Cela nécessitera d'intenses collaborations de recherche car l'étendue du problème est vaste, dépassant même en complexité et en difficulté les évaluations du PIB. Les comptes de l'EE ne se contentent pas d'identifier de manière détaillée la demande humaine, ils tentent également de quantifier le « revenu » de la nature, c'est-à-dire la biocapacité.

Tout comme le PIB n'a jamais apporté une réponse parfaite au problème particulier pour lequel cet indicateur a été créé, l'empreinte écologique a également des limites. Mais il convient de se poser la question suivante : la question qui sous-tend l'évaluation de l'empreinte écologique et de la biocapacité est-elle essentielle pour les efforts de développement durable, ou simplement sans rapport ? Existe-t-il d'autres indicateurs qui apportent des réponses plus pertinentes ?

Si la question est jugée significative, l'interrogation consiste alors à savoir avec quelle précision il faut répondre à la question pour que les résultats soient utiles pour les débats politiques. La perfection est impossible à atteindre – avec de telles attentes, le PIB n'aurait jamais été introduit. En d'autres termes : la méthode de comptabilité de l'EE est-elle moins pertinente pour appréhender son problème scientifique que les études PIB pour aborder le leur ? Une comparaison utile serait d'analyser à quel point la méthode de l'EE est plus spéculative dans la réponse à sa question que le PIB ne l'est dans son domaine.

Le rapport du SOeS montre essentiellement que la méthode actuelle de l'EE est transparente et reproductible. Certes, de nombreux aspects peuvent et doivent être améliorés. Cela a été souligné par le GFN (Kitzes et al., 2007, 2009) ainsi que par de nombreuses études nationales et internationales encouragées par le GFN (Eurostat, DG Environnement, Suisse, Belgique, Luxembourg, Allemagne, Irlande, Émirats arabes unis etc.). Se reporter aux références ci-après.

Ce que cette expertise a clairement montré est que le programme de recherche du GFN est cohérent avec l'évaluation technique menée par le SOeS. Cependant, le GFN recommande également aux nations

de s'impliquer dans la recherche, et pas seulement dans l'analyse critique. L'enjeu est trop grand pour laisser cette question à un seul organisme de recherche. L'ambition du GFN est donc de regrouper des nations pour améliorer la méthode de manière cohérente et collective, avec une puissance de recherche bien plus grande.

Le GFN aurait souhaité que le SOeS s'appuie plus fortement sur les idées émises par la « Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social » (également appelée Commission « Stiglitz ») du président Sarkozy dans son premier rapport publié le 14 septembre 2009¹⁸. Les principales conclusions de la Commission sont les suivantes :

1. Le PIB n'est plus approprié comme indicateur de premier ordre pour gérer les économies. Nous avons besoin d'outils plus sophistiqués pour suivre la performance économique, la qualité de vie et la durabilité environnementale.
2. La performance économique, la qualité de vie et la durabilité environnementale doivent être mesurées séparément pour comprendre les compromis potentiels entre eux, et pouvoir ensuite surmonter ces compromis.
3. Nous avons besoin, en particulier pour la durabilité environnementale, d'indicateurs physiques allant au-delà des indicateurs monétaires, car ces derniers sont de mauvais descripteurs des réalités relatives à l'environnement et aux ressources, en particulier pour les horizons à moyen et long terme.
4. Les deux principaux indicateurs physiques pour la durabilité environnementale sont :
 - a. l'empreinte écologique ;
 - b. une des plus importantes composantes de l'empreinte écologique : l'empreinte carbone.

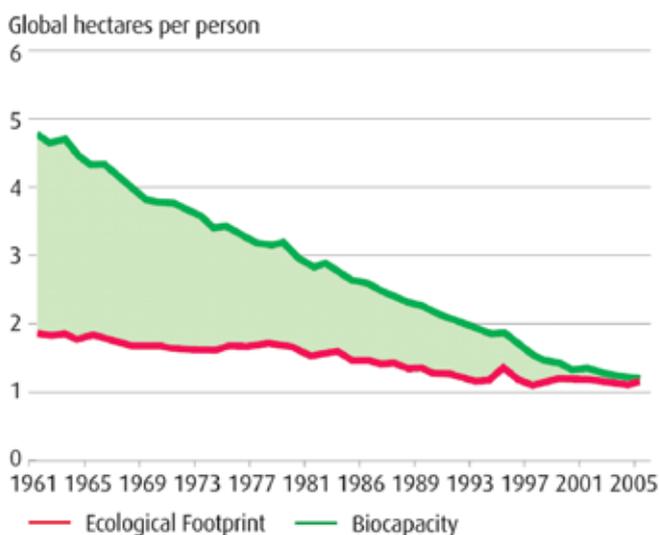
Bien que la Commission « Stiglitz » ait suggéré de se concentrer sur l'empreinte carbone et que le SOeS semble lui aussi insinuer qu'il pourrait être suffisant de mettre l'accent sur la comptabilité carbone, le GFN estime qu'une vision « carbone plus » est requise pour comprendre la signification des tendances environnementales actuelles¹⁹. L'empreinte écologique englobe entièrement et totalement l'empreinte carbone, et elle a une approche exhaustive et plus efficace en suivant une palette complète de demandes humaines sur la capacité de régénération de la biosphère. Elle permet également de comparer cette demande avec la biocapacité disponible.

Une analyse basée uniquement sur le carbone ne permettrait pas de mettre en évidence les tendances illustrées dans l'exemple de la Tanzanie (voir figure 1) – où l'empreinte carbone de la Tanzanie, par exemple pour 2005, représentait moins de 8 % de l'empreinte totale (soit environ l'épaisseur de la courbe rouge de la figure 1).

¹⁸ Rapport « Stiglitz » (rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social) <http://www.stiglitz-sen-fitoussi.fr/en/index.htm>.

¹⁹ La réponse du Global Footprint Network est disponible à l'adresse http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/newsletter/bv/commission_urgences_gdp_rethink_new_footprint_standards_released.

Figure 1 : Biocapacité et empreinte écologique par personne en Tanzanie depuis 1961



Source : GFN.

L'**empreinte écologique** de la Tanzanie représente la biocapacité requise, en moyenne, pour garantir la consommation moyenne d'un habitant de Tanzanie. La **biocapacité** est la surface productive disponible à l'intérieur de la Tanzanie. La zone verte entre les courbes montre la diminution du solde écologique de la Tanzanie. Une fois que les courbes se croisent, le solde devient un déficit écologique. Les déficits écologiques peuvent être compensés en surexploitant la **biocapacité locale** ou en utilisant la biocapacité provenant de l'étranger, par exemple à travers une importation nette.

Évidemment, c'est à l'Europe de choisir dans quelle mesure l'EE devrait faire partie de ses indicateurs clés de développement durable. Si l'on souhaite que ces indicateurs soient vraiment utiles pour le développement durable, ils doivent être capables de déterminer si une nation ou le monde a dépassé ses limites écologiques ou pas. Les indicateurs proposés jusqu'à ce jour ne révèlent que peu, voire rien, sur ce sujet. Si la société considère que les limites écologiques ne sont pas pertinentes, alors, nous devrions être honnêtes et nous concentrer sur le « développement accéléré » plutôt que de décevoir le public en appelant « développement durable » un concept pour lequel il n'existe aucune interprétation significative.

En résumé, les questions qu'une nation doit prendre en compte sont simples. Est-ce que le pays se porterait mieux en ne sachant pas :

- la quantité de biocapacité dont elle dispose, et la quantité qu'elle utilise ?
- la quantité de biocapacité que l'humanité utilise par rapport à ce que la planète est capable de régénérer ?
- les tendances relatives à la biocapacité et à l'utilisation des ressources ?

Si ces informations ne sont pas absolument au centre du défi de la durabilité, alors, qu'est-ce qui le sera ?

Références

- Kitzes J., Galli A., Bagliani M. et al., 2009. "Research Agenda for Improving National Ecological Footprint Accounts", *Ecological Economics*, Vol 68, N° 7. p. 1991 – 2007 (présenté pour la première fois en 2007).
- Suisse – Bureau fédéral de la statistique <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/en/index/themen/21/03/blank/blank/01.html> (rapport technique et descriptif).
- Eurostat – http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-AU-06-001/EN/KS-AU-06-001-EN.PDF
- Commission européenne - Eurostat, 2006. « Ecological Footprint and Biocapacity : the world's ability to regenerate resources and absorb waste in a limited time period » (rapport rédigé par F. Schaefer, U. Luksch, N. Steinbach, J. Cabeça, J. Hanauer). Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 11 p. (coll. Working papers and Studies).
- Allemagne – <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3489.pdf>
- Federal Environment Agency (Umweltbundesamt), 2007. « Scientific assessment and evaluation of the indicator "Ecological Footprint" » (research report 363 01 135, UBA-FB 001089/E). Dessau-Rosslau : FEA. 74 p.
- Irlande – Environmental Protection Agency <http://erc.epa.ie/safer/iso19115/displayISO19115.jsp?isoID=56#files>
- Belgique – WWF : www.wwf.be/_media/04-lies-janssen-ecologische-voetafdrukrekening_236536.pdf
- DG Environment – Juin 2008 : "Potential of the Ecological Footprint for monitoring environmental impacts from natural resource use : Analysis of the potential of the Ecological Footprint and related assessment tools for use in the EU's Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources » (Report to the European Commission, DG Environment)." 304 p. <http://ec.europa.eu/environment/natres/studies.htm>
- Émirats Arabes Unis – Al Basama Al Beeiya (Ecological Footprint) Initiative <http://www.agedi.ae/ecofootprintuae/default.aspx>
Environment Agency - Abu Dhabi
Abu Dhabi Global Environmental Data Initiative (AGEDI)

Annexes

Bibliographie

- Boutaud A., Gondran N., 2009. *L'empreinte écologique*. Paris : éditions La Découverte. 122 p. (coll. Repères).
- Cochet Y., Billard M., Mamère N., De Rugy F., 2009. « Proposition de loi tendant à réduire l'empreinte écologique de la France » (*Proposition de loi de l'Assemblée nationale n° 1369 du 6 janvier 2009*). Paris : Assemblée nationale. 10 p.
- Conseil économique, social et environnemental, 2009. « Les indicateurs du développement durable et l'empreinte écologique » (*Avis du CESE présenté par P. Le Clézio*). Paris : Les éditions des Journaux officiels. 137 p.
- Best A., Blobel D., Cavalieri S., Giljum S., Hammer M., Lewis K., Lutter S., Maguire C., Simmons C., 2008. « Potential of the Ecological Footprint for monitoring environmental impacts from natural resource use: Analysis of the potential of the Ecological Footprint and related assessment tools for use in the EU's Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources » (*Report to the European Commission, DG Environment*). 304 p.
- Comité économique et social européen, 2008. « Dépasser le PIB- Indicateurs pour un développement durable », (*avis du CESE n° 1169/2008*). 12 p.
- Global Footprint Network, 2008. *Calculation methodology for the national Footprint accounts, 2008 Edition*. Oakland, GFN. 17 p.
- Global Footprint Network, 2008. *Guidebook to the national footprint accounts 2008*. Oakland, GFN. 100 p.
- Global Footprint Network, 2008. *The Ecological Footprint Atlas 2008*. Oakland, GFN. 82 p.
- La revue durable, 2008. « L'empreinte écologique : indicateur sous pression », *La revue durable*, n° 28, février-mars-avril 2008. p. 64-73.
- La revue durable, 2008. « L'empreinte écologique : le débat se déplace sur les questions de fond », *La revue durable*, n° 29 mai-juin 2008. p. 60-63.
- Wachtl J., 2008. *Monitoring du développement durable : la Suisse dans un monde globalisé*. Neuchâtel : Office fédéral de la statistique – Direction du développement et de la coopération. *Actualité OFS*. 4 p.
- WWF, 2008. *Rapport Planète vivante 2008*. Gland : WWF international. 45 p. (*zoom sur la France et la Belgique*).
- Kitzes J., Galli A., Bagliani M. et al., 2007. « A Research Agenda for improving National Ecological Footprint Accounts », *Ecological Economics*, vol. 68, n° 7. p. 1991-2007.
- Piguët F. P., Blanc I., Corbiere-Nicollier T., Erkman S., 2007. « L'empreinte écologique : un indicateur ambigu », *Futuribles*, n° 334, octobre 2007. p. 5-24.
- Jolia-Ferrier L., Villy T., 2006. *L'empreinte écologique*. Lyon : société alpine de publications. 176 p.
- Wackernagel M., Rees W., 1999. « Notre empreinte écologique », *Les éditions Ecosociété*, Montréal, Québec. 207 p. Réédition octobre 2009, 242 p.

Liste des membres du comité de suivi

- Mme Isabelle Blanc, *Mines ParisTech*
- M. Aurélien Boutaud, *association Terr-e-toires*
- M. Martin Bortzmeyer, *CGDD – MEEDDM*
- M. Bernard Cressens, *directeur des Programmes de conservation au WWF-France*
- M. Willy de Backer, *directeur européen du Global Footprint Network*
- M. Louis de Gimel, *Insee*
- Mme Natacha Gondran, *École nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne*
- Mme Nicole Jensen, *CGDD – MEEDDM*
- M. Marc-Antoine Kleinpeter, *CGDD – MEEDDM*
- M. Philippe Le Clézio, *rapporteur au nom de la Commission sur les indicateurs de développement durable et l'empreinte écologique pour le CESE*
- M. Valéry Lemaître, *CGDD – MEEDDM*
- M. Vincent Marcus, *Insee*
- Mme Thanh Nghiem, *Institut Angenius*
- Mme Simone Paul-Collinet, *CGDD – MEEDDM*
- M. Frédéric-Paul Piguët, *Institut des politiques territoriales et environnement humain, université de Lausanne (Suisse)*
- M. Pascal Rouet, *CESE*
- Mme Carla Saglietti, *CESE*
- M. Thierry Thouvenot, *consultant pour le WWF*
- M. André Vanoli, *président de l'Association de Comptabilité nationale*
- Mme Dominique Veuillet, *Ademe*
- M. Mathis Wackernagel, *président du Global Footprint Network*
- Mme Natacha Zuinen, *bureau fédéral du Plan de Belgique, Task Force Développement durable*

Rapport technique

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| PREMIERE PARTIE : REPRODUCTIBILITE DES CALCULS | 4 |
| 1 QUELQUES DEFINITIONS | 5 |
| 1.1 HECTARE GLOBAL | 5 |
| 1.2 FACTEUR D'EQUIVALENCE | 5 |
| 1.3 FACTEUR DE RENDEMENT | 5 |
| 2 QUELQUES REMARQUES PREALABLES | 6 |
| 2.1 PRINCIPE DE L'EMPREINTE ECOLOGIQUE | 6 |
| 2.1.1 <i>Principe</i> | 6 |
| 2.1.2 <i>Facteur d'équivalence</i> | 6 |
| 2.2 EVOLUTION DE L'EMPREINTE ET DE LA BIOCAPACITE ENTRE 1961 ET 2005 | 9 |
| 3 BIOCAPACITE | 13 |
| 3.1 SURFACE DISPONIBLE | 13 |
| 3.2 FACTEURS D'EQUIVALENCE | 13 |
| 3.3 FACTEURS DE CULTURE | 13 |
| 3.4 RESULTATS | 15 |
| 4 EMPREINTE PARTIELLE DU CARBONE | 17 |
| 4.1 EMPREINTE DES EMISSIONS DE CO ₂ | 17 |
| 4.1.1 <i>Consommation d'énergie fossile</i> | 17 |
| 4.1.2 <i>Taux de séquestration du carbone par les océans</i> | 19 |
| 4.1.3 <i>Facteur d'équivalence</i> | 19 |
| 4.1.4 <i>Facteur de rendement</i> | 19 |
| 4.1.5 <i>Empreinte induite par les soutes internationales (bunker fuel)</i> | 20 |
| 4.1.6 <i>Résumé de l'empreinte liée aux émissions de CO₂</i> | 20 |
| 4.2 EMPREINTE LIEE AUX IMPORTATIONS D'ENERGIE | 20 |
| 4.2.1 <i>CO₂ contenu dans les flux commerciaux de marchandises</i> | 21 |
| 4.3 BIOCAPACITE ASSOCIEE AU CARBONE | 22 |
| 4.4 RESULTATS | 22 |
| 4.4.1 <i>Empreinte</i> | 22 |
| 4.4.2 <i>Excédent ou déficit écologique du Carbone</i> | 23 |
| 5 EMPREINTE PARTIELLE DES CULTURES | 25 |
| 5.1 EMPREINTE DE LA PRODUCTION AGRICOLE | 25 |
| 5.1.1 <i>Production agricole</i> | 25 |
| 5.1.2 <i>Facteur d'équivalence</i> | 26 |
| 5.1.3 <i>Facteur de rendement</i> | 26 |
| 5.2 EMPREINTE LIEE AUX IMPORTATIONS DE PRODUITS AGRICOLES | 27 |
| 5.2.1 <i>Importations et exportations de produits agricoles</i> | 27 |
| 5.2.2 <i>Facteur d'équivalence</i> | 27 |
| 5.2.3 <i>Facteur de rendement et taux d'extraction</i> | 27 |
| 5.3 CAS DE UNHARVESTED CROPLAND | 28 |
| 5.4 BIOCAPACITE ASSOCIEE AUX CULTURES | 28 |
| 5.4.1 <i>Surface disponible</i> | 28 |
| 5.4.2 <i>Facteurs d'équivalence</i> | 28 |
| 5.4.3 <i>Facteurs de culture</i> | 29 |
| 5.5 RESULTATS | 29 |
| 5.5.1 <i>Empreinte</i> | 29 |
| 5.5.2 <i>Excédent ou déficit écologique des cultures</i> | 31 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | EMPREINTE PARTIELLE DES PATURAGES | 32 |
| 6.1 | EMPREINTE DE LA CONSOMMATION DE FOURRAGE | 32 |
| 6.1.1 | <i>Biocapacité des pâturages</i> | 32 |
| 6.1.2 | <i>Consommation d'aliments à destination de l'élevage</i> | 33 |
| 6.2 | EMPREINTE LIEE AUX IMPORTATIONS DE CULTURES SOUS FORME DE PRODUITS DE L'ELEVAGE | 35 |
| 6.2.1 | <i>Feed mix</i> | 36 |
| 6.2.2 | <i>Taux d'extraction</i> | 36 |
| 6.2.3 | <i>Feed intensity</i> | 37 |
| 6.3 | BIOCAPACITE ASSOCIEE AUX PATURAGES | 37 |
| 6.3.1 | <i>Surface disponible</i> | 37 |
| 6.3.2 | <i>Facteurs d'équivalence</i> | 37 |
| 6.3.3 | <i>Facteurs de culture</i> | 37 |
| 6.4 | RESULTATS | 38 |
| 6.4.1 | <i>Empreinte</i> | 38 |
| 6.4.2 | <i>Excédent ou déficit écologique des pâturages</i> | 39 |
| 7 | EMPREINTE PARTIELLE DE L'ARTIFICIALISATION | 40 |
| 7.1 | EMPREINTE DE L'OCCUPATION DU SOL | 40 |
| 7.1.1 | <i>Poste B1 de la nomenclature CORINE Land Cover</i> | 40 |
| 7.1.2 | <i>Facteur de rendement</i> | 41 |
| 7.1.3 | <i>Facteur d'équivalence</i> | 41 |
| 7.2 | EMPREINTE LIEE A LA CONSOMMATION D'ENERGIE HYDROELECTRIQUE | 41 |
| 7.2.1 | <i>Production hydroélectrique</i> | 42 |
| 7.2.2 | <i>Facteur de rendement</i> | 42 |
| 7.3 | BIOCAPACITE ASSOCIEE A L'ARTIFICIALISATION | 42 |
| 7.4 | RESULTATS | 42 |
| 7.4.1 | <i>Empreinte</i> | 42 |
| 7.4.2 | <i>Excédent ou déficit écologique de l'artificialisation</i> | 44 |
| 8 | EMPREINTE PARTIELLE DE LA FORET | 45 |
| 8.1 | EMPREINTE DE LA PRODUCTION FORESTIERE | 45 |
| 8.1.1 | <i>Production forestière</i> | 45 |
| 8.1.2 | <i>Facteur d'équivalence</i> | 45 |
| 8.1.3 | <i>Facteur de rendement</i> | 46 |
| 8.2 | EMPREINTE LIEE AUX IMPORTATIONS DE PRODUITS FORESTIERS | 46 |
| 8.3 | BIOCAPACITE ASSOCIEE A LA FORET | 46 |
| 8.3.1 | <i>Surface disponible</i> | 46 |
| 8.3.2 | <i>Facteurs d'équivalence</i> | 47 |
| 8.3.3 | <i>Facteurs de culture</i> | 47 |
| 8.4 | RESULTATS | 47 |
| 8.4.1 | <i>Empreinte</i> | 47 |
| 8.4.2 | <i>Excédent ou déficit écologique de la forêt</i> | 49 |
| 9 | EMPREINTE PARTIELLE DE LA PECHE | 51 |
| 9.1 | EMPREINTE DE LA PECHE | 51 |
| 9.1.1 | <i>Captures de poissons</i> | 51 |
| 9.1.2 | <i>Facteur d'équivalence</i> | 52 |
| 9.1.3 | <i>Facteur de rendement</i> | 52 |
| 9.2 | EMPREINTE LIEE AUX IMPORTATIONS DE PRODUITS DE LA PECHE | 53 |
| 9.2.1 | <i>Facteur d'équivalence</i> | 53 |
| 9.2.2 | <i>Facteur de rendement et taux d'extraction</i> | 53 |
| 9.3 | BIOCAPACITE ASSOCIEE A LA PECHE | 54 |
| 9.3.1 | <i>Surface disponible</i> | 54 |
| 9.3.2 | <i>Facteurs d'équivalence</i> | 54 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 9.3.3 | <i>Facteurs de culture</i> | 54 |
| 9.4 | RESULTATS | 55 |
| 9.4.1 | <i>Empreinte</i> | 55 |
| 9.4.2 | <i>Excédent ou déficit écologique de la pêche</i> | 56 |
| 10 | EMPREINTE ECOLOGIQUE | 57 |
| 11 | BILAN DE L'EXPLORATION (PHASE 1) | 60 |
| 11.1 | VISIBILITE DE PHENOMENES EXTERIEURS | 60 |
| 11.2 | FACTEURS D'EQUIVALENCE | 60 |
| 11.3 | SOLIDITE DES CONSTANTES DE CONVERSION | 60 |
| 11.4 | DONNEES | 61 |
| 11.5 | NIVEAU DE DETAIL DU CALCUL | 62 |
| 11.6 | CAS PARTICULIER DE L'EMPREINTE DU CARBONE | 62 |
| 12 | CONCLUSIONS DE LA PHASE 1 | 62 |
| | SECONDE PARTIE : HYPOTHESES ALTERNATIVES | 63 |
| 13 | INFLUENCE DE L'UTILISATION DES DONNEES DES DOUANES SUR L'EMPREINTE PARTIELLE DU CARBONE | 64 |
| 13.1 | PRINCIPE DU CALCUL | 64 |
| 13.2 | SPECIFICITES DE L'UTILISATION DES DONNEES DES DOUANES | 65 |
| 13.3 | RESULTATS..... | 65 |
| 14 | INFLUENCE DE L'UTILISATION D'AUTRES DONNEES AGRICOLES SUR L'EMPREINTE PARTIELLE DES CULTURES | 66 |
| 14.1 | PRINCIPE DU CALCUL | 67 |
| 14.2 | RESULTATS..... | 67 |
| 15 | INFLUENCE DE LA VALEUR DU RATIO DE SEQUESTRATION DU CARBONE | 68 |
| 15.1 | PRINCIPE DU CALCUL | 68 |
| 15.2 | RESULTATS..... | 69 |
| 16 | INFLUENCE D'UNE REDUCTION DES EMISSIONS DE GES SUR L'EMPREINTE PARTIELLE DU CARBONE .. | 70 |
| 16.1 | PRINCIPE DU CALCUL | 70 |
| 16.2 | RESULTATS | 71 |
| 17 | INFLUENCE DE L'INTRODUCTION DE LA NOTION DE RENDEMENT AGRICOLE "SOUTENABLE" SUR LA BIOCAPACITE DES CULTURES | 72 |
| 17.1 | PRINCIPE DU CALCUL : NOTION DE RENDEMENT AGRICOLE "SOUTENABLE" | 72 |
| 17.2 | RESULTATS | 73 |
| 18 | CONCLUSIONS DE LA PHASE 2 | 74 |

PREMIERE PARTIE :

Reproductibilité des calculs

1 Quelques définitions

1.1 Hectare global

L'hectare global est une surface de productivité mondiale moyenne. Ce concept permet de comparer des types de sol de productivités différentes. Dans ce rapport, l'hectare global sera noté hag.

1.2 Facteur d'équivalence

Les facteurs d'équivalence permettent de représenter des types de sol de productivités différentes en recourant à une surface de productivité moyenne mondiale, l'hectare global.

Le rôle de ces facteurs d'équivalence est de transformer des surfaces mondiales en une surface théorique moyenne, l'hectare global. Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sol en fonction de leur productivité agricole potentielle¹.

1.3 Facteur de rendement

Le rôle de ces facteurs de rendement est de transformer des tonnes de produits (production agricole, émissions de CO₂, etc.) en une surface équivalente. Ces surfaces permettent ainsi de comparer des données qui ne le sont pas par ailleurs ; exemple : la surface correspondant à une tonne de CO₂ provenant de l'importation de vêtements en coton peut être comparée à la surface correspondant à une tonne de CO₂ émise pour la construction d'un bâtiment.

Le principe de base du calcul de ces facteurs de rendement est d'utiliser le rendement moyen mondial :

$$\text{Facteur rendement} = \frac{\text{production mondiale}}{\text{surface cultivée mondiale}}$$

On distingue néanmoins des variantes suivant les empreintes partielles considérées².

Par exemple le facteur de rendement pour l'empreinte partielle du carbone est le taux de séquestration de CO₂ par hectare de forêt.

¹ Voir le chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence.

² Voir le détail de l'exploration des empreintes partielles.

2 Quelques remarques préalables

Il ne s'agit pas ici de discuter du fondement scientifique de la méthode ni des hypothèses retenues par le Global Footprint Network GFN. Il s'agit d'étudier, pour le Service de l'Observation et des Statistiques³ du Commissariat au Développement Durable, la possibilité de reproduire et standardiser les calculs sur la base de la méthodologie et des données mises à disposition par le GFN.

Cette démarche peut néanmoins conduire à formuler des questions, des remarques, voire des réserves sur la méthodologie retenue.

Les chiffres ont été arrondis dans les exemples de calcul pour simplifier la lecture. Cela peut expliquer qu'il n'y ait pas stricte identité entre chaque membre des équations.

2.1 Principe de l'empreinte écologique

2.1.1 Principe

Le vocable général d'empreinte écologique utilisé par le GFN renvoie en réalité à deux agrégats distincts :

- L'**empreinte** proprement dite, c'est-à-dire la demande en ressources.

Cette empreinte est déclinée en 6 empreintes partielles, correspondant à 6 familles d'activités humaines :

- Empreinte due au carbone : surfaces équivalentes nécessaires pour absorber les émissions de CO₂ dues à la consommation d'énergie fossile et à la consommation de produits manufacturés ;
- Empreinte due aux cultures : surfaces nécessaires pour produire les produits agricoles consommés par les habitants d'un pays ;
- Empreinte due aux pâturages : surfaces nécessaires pour produire, en plus d'une partie des cultures, les protéines animales consommées par les habitants d'un pays ou aboutissant à des exportations de viande et animaux ;
- Empreinte due aux forêts : surfaces nécessaires pour produire les produits issus de la filière bois consommés par les habitants d'un pays ;
- Empreinte due à la pêche : surfaces équivalentes nécessaires pour produire les protéines piscicoles consommées par les habitants d'un pays ;
- Empreinte due à l'artificialisation des terres : surfaces utilisées pour les villes et les infrastructures humaines.

- La **biocapacité**, c'est-à-dire la surface biologiquement productive disponible.

On détermine si les besoins humains sont soutenables ou non en comparant biocapacité et empreinte.

$$\text{Excédent ou Déficit écologique} = \text{Biocapacité} - \text{Empreinte écologique}$$

2.1.2 Facteur d'équivalence

Le calcul de l'empreinte écologique répond à la formule générale suivante⁴ :

$$\text{Empreinte écologique} = \text{consommation} \times \frac{\text{facteur d'équivalence}}{\text{facteur de rendement}}$$

³ SOeS.

⁴ Cette formule globale sera explicitée au cas par cas dans les chapitres sur les différentes empreintes partielles.

Les facteurs d'équivalence n'interviennent que lors de l'agrégation des différents espaces. Sans l'utilisation de ces facteurs d'équivalence, on obtiendrait une empreinte écologique en hectares ne permettant pas de comparaison entre les différents types de sol. Le rôle de ces facteurs d'équivalence est de créer une surface théorique unique, l'hectare global, par pondération des différents types de sol (terre cultivable, forêt, pâturage,...) en fonction de leur productivité agricole potentielle. De ce fait ils sont identiques pour chaque pays et ils permettent de comparer les différents résultats nationaux.

Une traduction de la description du Guidebook permet de mieux cerner la façon dont ces facteurs sont obtenus.

Les facteurs d'équivalence sont actuellement calculés en utilisant les suitability indexes du modèle Global Agro-Ecological Zones (FAO / IIASA 2000) combinés avec des informations à propos des zones de terres cultivées, des forêts et de zone de pâturage à partir de FAOSTAT (FAOSTAT XXXX).

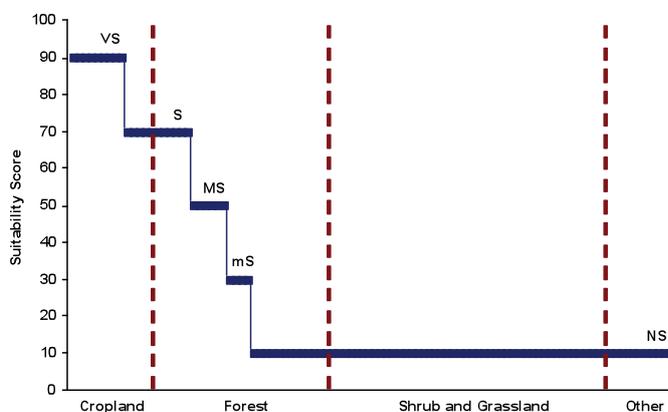
Le modèle du GAEZ divise l'ensemble des terres au niveau mondial en cinq catégories, à chacune est attribué un indice d'aptitude (suitability index) :

- Très cultivables : 90
- cultivables : 70
- Modérément cultivables : 50
- cultivabilité marginale : 30
- non approprié : 10

Le calcul des facteurs d'équivalence suppose que la plupart des terres productives sont situées dans les parties les plus cultivables. Les calculs supposent que les terres les plus cultivables sont destinées à l'agriculture, les terres moyennement cultivables à la forêt, et les moins adaptées aux pâturages. Le facteur d'équivalence est calculé comme le rapport entre la moyenne de l'indice d'aptitude pour un type de terrain et la moyenne de l'indice d'aptitude pour tous les types de terrains.

Ce calcul est résumé schématiquement par le schéma suivant :

Figure 1 : répartition des terres selon leur indice d'aptitude



Source : GFN.

Le facteur d'équivalence pour les infrastructures est égal au facteur d'équivalence des terres cultivées, en retenant l'hypothèse selon laquelle les infrastructures occupent d'anciennes terres agricoles.

Le facteur d'équivalence de l'énergie hydroélectrique est fixé à 1, ce qui suppose que les réservoirs hydroélectriques inondent des terres d'indice d'aptitude moyen.

Le facteur d'équivalence pour la zone marine est calculé de façon à ce qu'un hectare global de zone maritime utile à produire une quantité donnée de calories de saumon corresponde à la même quantité de calories de viande bovine produite par un seul hectare global de pâturage. Le facteur d'équivalence pour les eaux intérieures est fixé au facteur d'équivalence pour la zone maritime.

Illustration :

Le calcul des facteurs d'équivalence répond donc à la formule suivante :

$$\text{Facteur d'équivalence}_i = \frac{\text{indice d'aptitude moyen}_i}{\text{indice d'aptitude global}}$$

Avec :

$$\text{Indice d'aptitude global} = \sum_{\text{type sol}} \left(\text{indice d'aptitude moyen}_i \times \frac{\text{surface}_i}{\text{surface totale}} \right)$$

Exemple du cas des cultures, de la forêt et des pâturages :

Figure 2 : exemples de calcul d'indice d'aptitude moyen

| Cultivabilité | Indice d'aptitude | Répartition par cultivabilité (%) | | |
|--------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------|------------|
| | | Culture | Forêt | Pâturage |
| Very suitable | 0,9 | 80 | 0 | 0 |
| Suitable | 0,7 | 20 | 25 | 0 |
| Moderately suitable | 0,5 | 0 | 25 | 0 |
| Marginally suitable | 0,3 | 0 | 10 | 0 |
| Not suitable | 0,1 | 0 | 40 | 10 |
| Indice d'aptitude moyen | | 0,86 | 0,37 | 0,1 |

Source : GFN, traitements SOeS.

On multiplie chacun de ces indices d'aptitudes par la proportion de chaque type de sol correspondante pour obtenir l'indice d'aptitude global. Ainsi avec une surface disponible de 10,35 milliards d'hectares et une répartition de 1,6 milliards d'hectares de terres cultivables, 3,95 milliards d'hectares de forêts et 4,8 milliards d'hectares de pâturages on obtient :

$$\text{Indice d'aptitude global} = 0,86 \times \frac{1,6}{10,35} + 0,37 \times \frac{3,95}{10,35} + 0,1 \times \frac{4,8}{10,35} = 0,32$$

On obtient ainsi en divisant les indices d'aptitudes moyens de chaque type de sol par cet indice d'aptitude global les facteurs d'équivalences suivants :

Figure 3 : exemples de calcul des facteurs d'équivalence

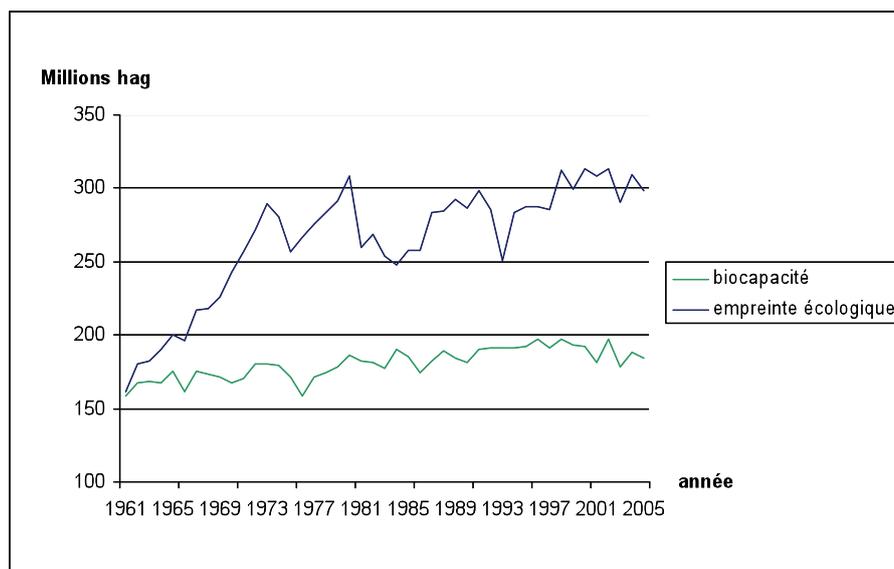
| Type de sol | Indice d'aptitude moyen | Indice d'aptitude global | Facteur d'équivalence |
|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Culture | 0,86 | 0,32 | 2,68 |
| Forêt | 0,37 | 0,32 | 1,15 |
| Pâturage | 1 | 0,32 | 0,32 |

Source : GFN, traitements SOeS.

2.2 Evolution de l'empreinte et de la biocapacité entre 1961 et 2005

L'empreinte écologique de la France a globalement augmenté depuis 1961, passant de 160 million d'hectares globaux (Mhag) à 300 Mhag. Cependant, deux périodes de forte baisse ont été observées au début des années 1980 et 1990. Dans le même temps la biocapacité de la France n'a augmenté que de 30 Mhag environs, restant globalement stable autour de 180 Mhag.

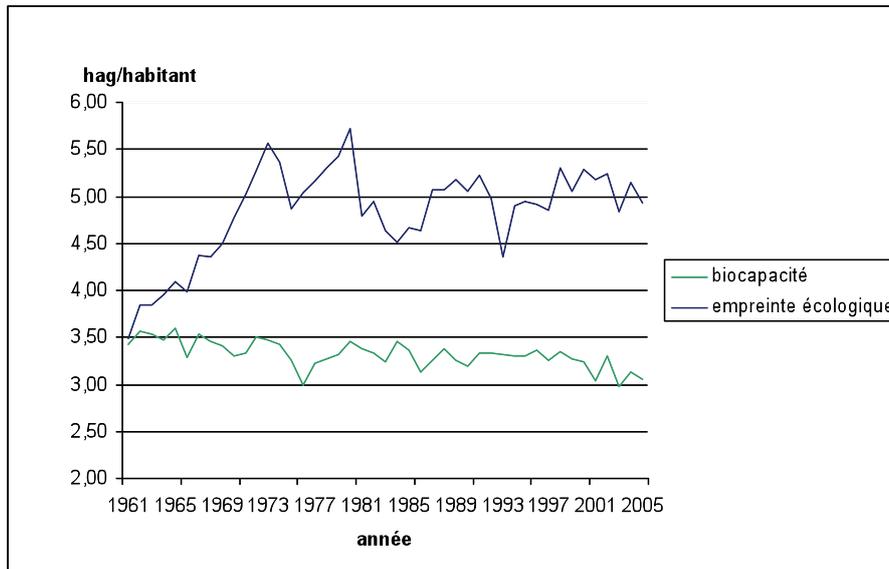
Figure 4 : évolution de l'empreinte écologique et de la biocapacité de la France entre 1961 et 2005



Source : GFN, traitements SOeS.

Cette évolution est sensiblement identique si l'on s'intéresse aux résultats par habitant, avec toutefois une relative stabilisation aux alentours de 5 hag par habitant depuis le milieu des années 1970, à comparer avec une biocapacité légèrement supérieure à 3 hag par habitant.

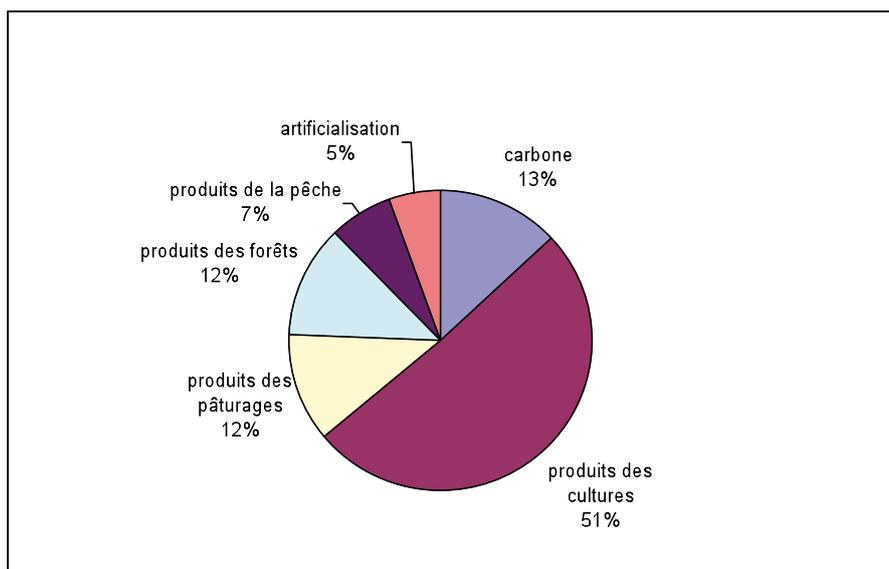
Figure 5 : évolution de l'empreinte écologique et de la biocapacité par habitant de la France entre 1961 et 2005



Source : GFN, traitements SOeS.

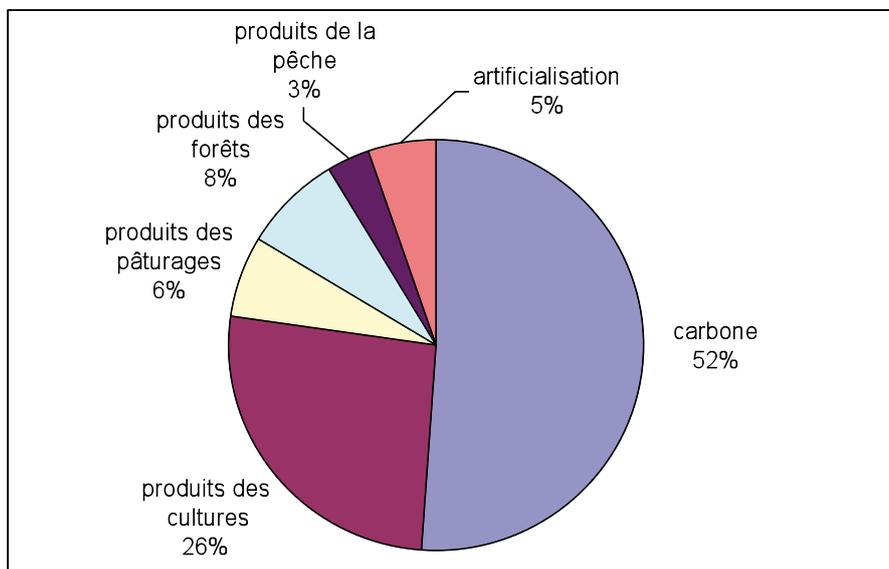
La part de la composante carbone dans l'Empreinte écologique est de plus en plus élevée. On est ainsi passé d'une empreinte constituée à 50% de la composante cultures en 1961 à une empreinte constituée à 50% de la composante carbone en 2005 (voir figures 6-a et 6-b).

Figure 6-a : part des composantes de l'empreinte écologique de la France en 1961



Source : GFN, traitements SOeS.

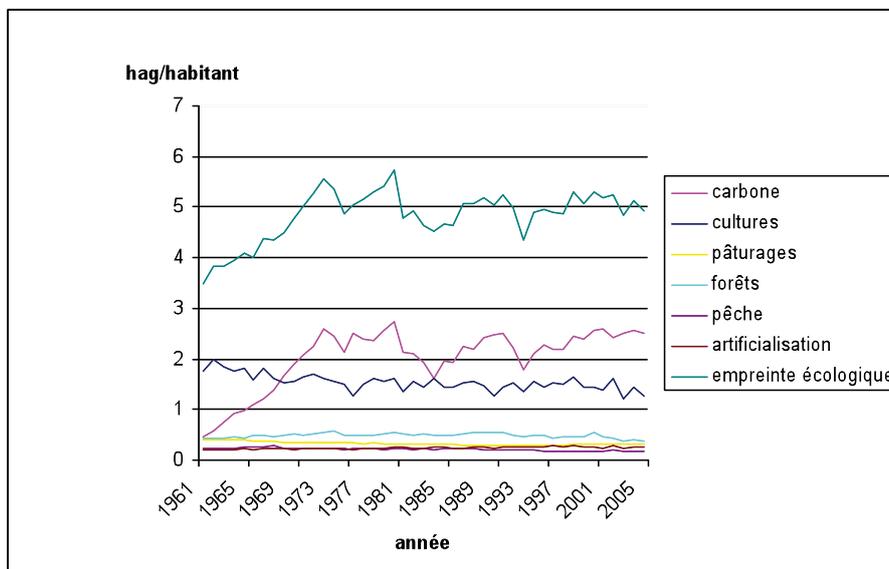
Figure 6-b : part des composantes de l'empreinte écologique de la France en 2005



Source : GFN, traitements SOeS.

L'empreinte écologique globale est majoritairement imputable aux empreintes partielles du carbone et des cultures. Les variations de l'empreinte globale suivent effectivement les variations de l'empreinte du carbone.

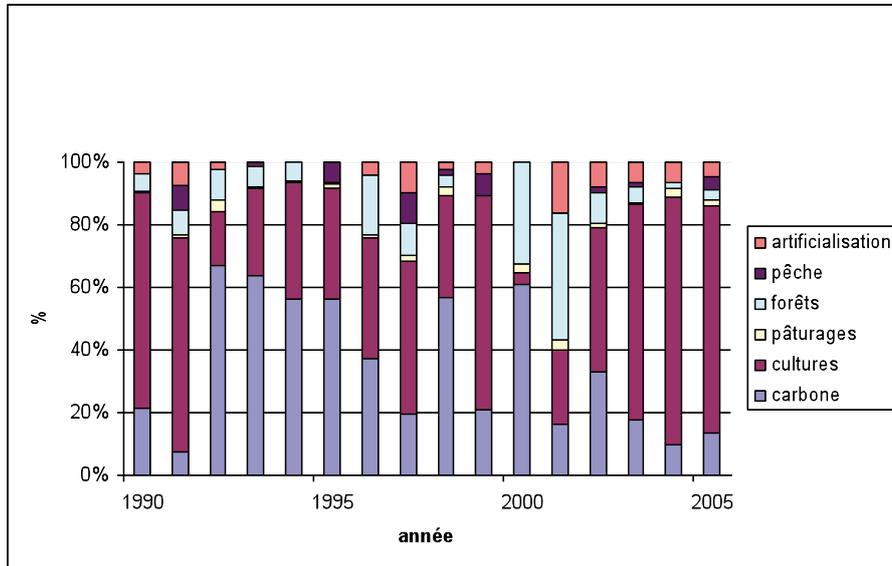
Figure 7 : évolution des composantes de l'empreinte écologique de la France entre 1961 et 2005



Source : GFN, traitements SOeS.

Lorsque l'on s'intéresse à la contribution de chaque empreinte partielle à l'évolution de l'empreinte totale, on constate que les variations sont pour la plupart dues aux composantes énergie et cultures (comme le montre la figure 8 ci après).

Figure 8 : contributions des empreintes partielles aux variations de l'empreinte écologique entre 1990 et 2005



Source : GFN, traitements SOeS.

3 Biocapacité

La biocapacité est la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour les 5 types d'usage de terres : terres cultivées, pâturages, forêt, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

Remarque : pour éviter les doubles comptes, il n'y a pas de calcul de biocapacité pour l'énergie. La forêt qui servirait à séquestrer le carbone est déjà prise en compte pour répondre aux besoins de la « filière bois ».

On a donc la formule suivante, avec Bc pour biocapacité :

$$Biocapacité = Bc_{cultures} + Bc_{pâturages} + Bc_{forêt} + Bc_{pêche} + Bc_{artificialisation}$$

Avec :

$$Bc_{domaine} = Surface\ disponible_{domaine} \times Y_f \times Eq_{facteur}$$

3.1 Surface disponible

Les données concernant la surface sont issues de Corine Land Cover, des statistiques de la FAO ou du GLC⁵.

La source privilégiée, complète pour l'ensemble des postes concernés, est CLC.

Une identification des postes nécessaires est à étudier pour l'utilisation des données CLC du SOeS. En effet les tentatives de calcul à partir des données CLC disponible au SOeS laissent apparaître une forte divergence avec les résultats du GFN. La biocapacité calculée est inférieure jusqu'en 1980, puis fortement supérieure depuis les années 1990. La source la plus probable de cette divergence est une sélection différente de postes. Les calculs du SOeS ont été faits avec les postes suivants :

- Cultures : B211; B212; B213; B221; B222; B223; B241; B242; B243
- Pâturages : B231; B321; B322; B323; B324; B333
- Forêt : B311; B312; B313; B244
- Pêche : B521; B522; B523; B511; B512
- Artificialisation : B111; B112; B121; B122; B123; B124; B131; B132; B133; B141; B142

3.2 Facteurs d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sols en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

3.3 Facteurs de culture

Les facteurs de cultures sont égaux au rapport entre rendements nationaux et rendements mondiaux.

$$Y_f = \frac{Rdt_{national}}{Rdt_{mondial}}$$

⁵ Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Center and European Commission. *Global Land Cover 2000*. IES, Italy. <http://www-tem.jrc.it/glc2000/>

- Pâturages

C'est le rapport entre les rendements de production de matière sèche.

Le GFN utilise ainsi un rendement à l'hectare du pâturage français de 13,10 tonnes de matière sèche comparé à un rendement moyen mondial de 6,19 (valeurs constantes de 1961 à 2005).

- Pêche marine

C'est le rapport entre le rendement par hectare du plateau continental de la France et celui du plateau continental mondial (en kilogramme de biomasse par hectare).

Là aussi, le GFN utilise des rendements constants entre 1961 et 2005 (820 tonnes par hectare pour la France contre 504 tonnes par hectares pour la moyenne mondiale).

- Pêche en eau douce

Pour ce qui est de l'eau douce, il n'existe pas de statistiques mondiales. Le GFN utilise un facteur de rendement égal à 1 : un litre d'eau douce donne la même quantité de biomasse partout dans le monde.

Remarque : cette hypothèse illustre le fait que l'empreinte écologique ne tient pas compte de la qualité physico-chimique des cours d'eau. La pollution des rivières n'est ainsi pas intégrée dans le calcul de la biocapacité.

- Forêt

C'est le rapport entre les rendements nationaux et mondiaux de grumes (arbres abattus non encore transformés).

- Terres artificialisées

L'hypothèse du GFN, qui consiste à considérer les terres artificialisées comme des terres agricoles (voir détail du calcul de l'empreinte partielle de l'artificialisation), conduit à utiliser le facteur de rendement des cultures.

- Cultures

Le GFN calcule une surface cultivée mondiale fictive en multipliant, pour chaque produit, la surface nationale par le rapport des rendements mondiaux et nationaux :

$$\text{surface fictive cultivée}_{\text{mondiale}} = \frac{Rdt_{\text{national}}}{Rdt_{\text{mondial}}} \times \text{surface cultivée}_{\text{nationale}}$$

Le facteur de culture des cultures est ensuite obtenu en divisant la somme de ces surfaces fictives mondiales utilisées pour les cultures des seuls produits primaires (hors fourrage à destination de l'alimentation animale) par la somme des surfaces nationales.

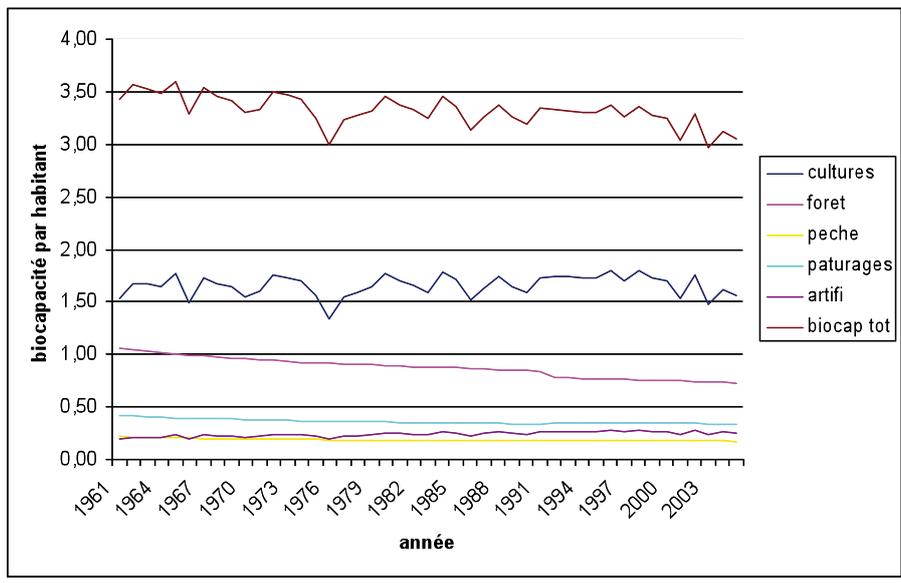
$$Yf_{\text{cultures}} = \frac{\sum_{\text{produits primaires}} \text{surface fictive cultivée}_{\text{mondiale}}}{\sum_{\text{produits primaires}} \text{surface cultivée}_{\text{nationale}}}$$

Remarque :

La biocapacité fluctue fortement au cours de la période 1961-2005. Ces fluctuations sont en fait dues à la composante cultures comme le montre la figure 9.

Ceci semble imputable au mode de calcul du facteur de rendement de cette composante. En effet, on ne retient que les surfaces pour lesquelles les données mondiales et nationales sont disponibles l'année du traitement.

Figure 9 : évolution de la biocapacité et de ses composantes (1961- 2005)

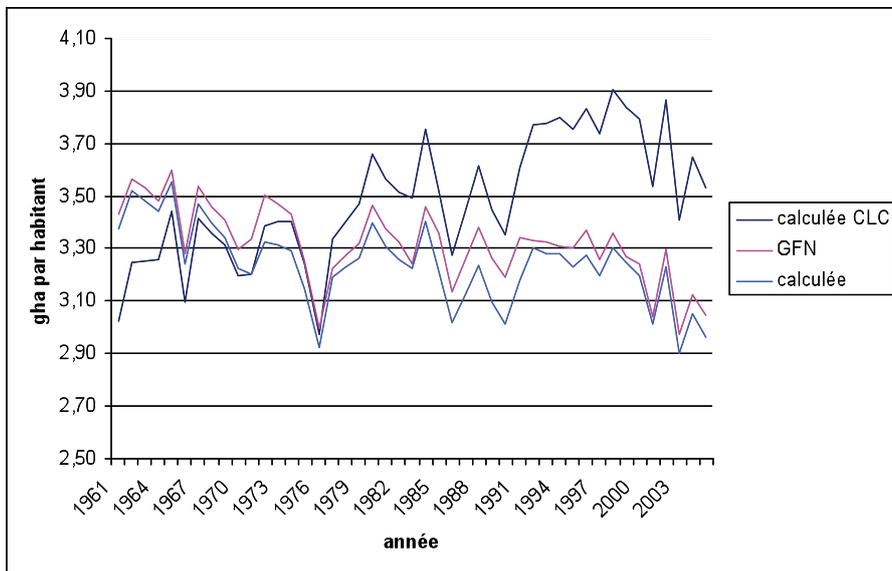


Source : GFN, traitements SOeS.

3.4 Résultats

Les résultats du calcul sont présentés figure suivante. Ils montrent une forte divergence si les données CLC utilisées sont celles issues du CLC du SOeS (biocapacité calculée CLC). Une demande auprès du GFN pour identifier si les postes retenus sont bien les mêmes que ceux utilisés par le GFN est en cours. De même la mise à disposition depuis début 2009 d'une version CLC2006 et d'une version révisée de CLC2000 peut affiner nos résultats.

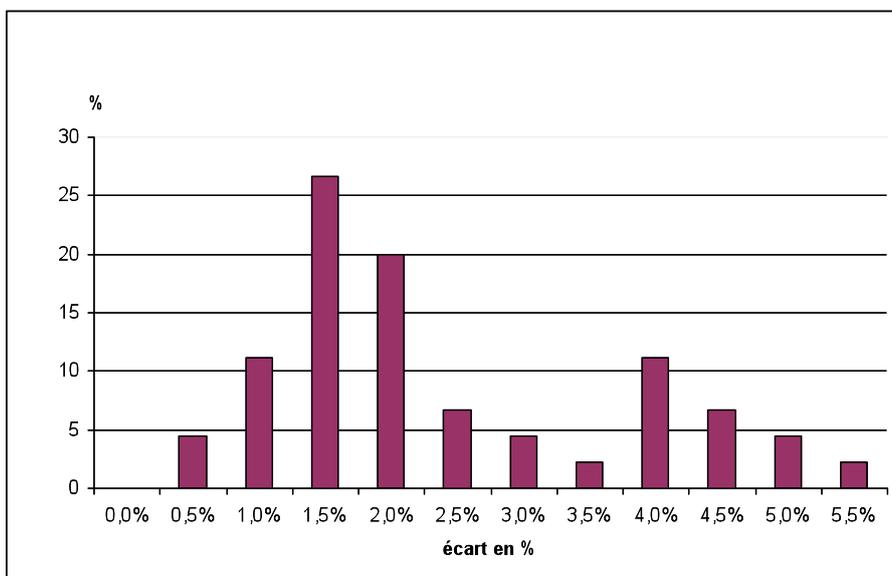
Figure 10 : comparaison de l'évolution de la biocapacité
(France : 1961 - 2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et celles du GFN est compris entre + 0,6 % et + 5,5 %. L'écart moyen est de +2,4 % et l'écart médian de +1,9 %.

Figure 11 : distribution des écarts entre la biocapacité
(France : 1961 - 2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

4 Empreinte partielle du carbone

L'empreinte partielle du carbone est le résultat de l'agrégation d'une empreinte tenant compte des émissions de CO₂ liées aux activités productives du pays et d'une empreinte estimant les émissions de CO₂ induites par les flux commerciaux de produits manufacturés (émissions de CO₂ provenant de la fabrication et du transport de ces marchandises).

La formule se résume à l'expression suivante où EF signifie Ecological Footprint :

$$EF_{\text{carbone}} = EF_{\text{émissions CO}_2} + EF_{\text{import CO}_2} - EF_{\text{export CO}_2}$$

Avec : $EF_{\text{émissions CO}_2} = EF_{\text{consommation énergie fossile}} + EF_{\text{bunker fuel}}$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{carbone}} = 152 \text{ Mhag} = 111 \text{ Mhag} + 189 \text{ Mhag} - 148 \text{ Mhag}$$

Avec : $EF_{\text{émissions CO}_2} = 111 \text{ Mhag} = 108 \text{ Mhag} + 3 \text{ Mhag}$

4.1 Empreinte des émissions de CO₂

4.1.1 Consommation d'énergie fossile

Ce sont les émissions de CO₂ émises par les activités productives tous secteurs confondus.

Six secteurs sont retenus :

- énergie électrique ;
- autoproduction d'électricité ;
- autres industries énergétiques ;
- industries manufacturières et BTP ;
- transports ;
- autres secteurs.

Ces 6 catégories sont déclinées en 35 sous catégories correspondant aux secteurs d'activités de la NAF (voir figure 12, page suivante).

Remarque : les produits manufacturés (production industrielle) sont pris en compte dans le calcul de l'empreinte par le biais de la consommation d'énergie des Industries Manufacturières et de la Construction.

La source des données relatives à l'énergie est l'International Energy Agency, IEA, rapport CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2007 disponible sur le site <http://www.iea.org/> (mais besoin d'un login et d'un mot de passe pour y accéder <http://wds.iea.org/wds/>).

Figure 12 : détail des catégories retenues pour les émissions de CO₂**CO₂ sectorial approach**

| Catégories | Sous catégories |
|---|--|
| Main Activity Electricity and Heat Production | Main Activity Electricity Plants Main Activity CHP Plants Main Activity Heat Plants Own Use in Electricity, CHP and heat plants |
| Unallocated Autoproducers | Autoproducer Electricity Plants Autoproducer CHP Plants Autoproducer Heat Plants |
| Other Energy Industries | |
| Manufacturing Industries and Construction | Iron and Steel Chemical and Petrochemical Non-Ferrous Metals Non-Metallic Minerals Transport Equipment Machinery Mining and Quarrying Food and Tobacco Paper, Pulp and Printing Wood and Wood Products Construction Textile and Leather Non-specified Industry Non-Energy Use Ind/Transf/Energy |
| Transport | Domestic Air Transport Road Rail Pipeline Transport National Navigation Non-specified Transport Non-Energy Use in Transport |
| Other Sectors | Agriculture Commercial and Public Services Residential Non-specified Other Non-Energy Use in Other Sectors |

Source : GFN.

La somme des consommations de ces 6 postes est ensuite soumise à la formule suivante :

$$EF_{\text{consommation énergie fossile}} = \text{Énergie consommée} \times (1 - Tx_{\text{séquestration océans}}) \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{conso énergie fossile}} = 108 \text{ Mhag} = 388 \text{ Mt} \times (1 - 0,25) \times \frac{1,33 \text{ hag / whag}}{3,59 \text{ t / whag}}$$

Note : Wha signifie hectare mondial.

4.1.2 Taux de séquestration du carbone par les océans

La valeur est différente selon l'année d'étude. D'après la définition ce serait, pour une année donnée, le rapport entre la quantité de carbone absorbée par les océans et la quantité de CO₂ produite mondialement.

D'après le guide méthodologique GFN, la source est le rapport : Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Climate Change 2001 : The Scientific Basis.

4.1.3 Facteur d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sols en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

4.1.4 Facteur de rendement

Ce facteur de rendement est en fait constant sur la période d'étude (1961-2005).

Cette constante est le rapport entre le facteur de séquestration du carbone, calculé à partir du taux de séquestration potentiel de la forêt⁶, et la constante C to CO₂.

$$Rdt_{\text{facteur}} = \frac{\text{Facteur Séquestration carbone}}{\text{C to CO}_2}$$

Facteur de séquestration du carbone : cette donnée est fournie par le rapport de l'IPCC⁷ de 2006⁸, disponible sur le site <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, sa valeur est de 0,97 tonne de carbone par hectare par an :

C to CO₂ est le rapport des poids atomiques de C et O dans CO₂ soit 0,273 (Masse atomique de C=12,011 u ; masse atomique de O=15,999 u)

$$\text{On a : } Rdt_{\text{facteur}} = \frac{0,97}{0,27} = 3,59$$

Cette valeur est différente des valeurs commentées dans le livre L'empreinte écologique (Boutaud et Gondran, page 76) : « le facteur de rendement est en fait le ratio de séquestration du GIEC, jusqu'ici de 3,67 tonnes de CO₂/Ha, qui a été révisé à 3,89 tonnes de CO₂/Ha en 2006. »

Ces commentaires concernaient l'ancienne méthodologie utilisée par le GFN et émanaient d'articles coécrits par le GFN⁹. Il est donc étonnant que les valeurs de ratio de séquestration du GIEC citées par le GFN soient différentes des valeurs utilisées dans le fichier de calcul de l'empreinte.

⁶ The 'Carbon Sequestration Factor' estimates the annual carbon sequestration of a hectare of world average bioproductive land. This factor is based on the sequestration potential of world average forest. This factor is calculated by supporting Global Footprint Network workbooks, which are available upon request.

⁷ IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (créé par la World Meteorological Organization (WMO) et l'United Nations Environment Programme (UNEP)).

⁸ 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture Forestry and Other Land Use. IPCC, Geneva.

⁹ Monfreda, C., Wackemagel, M., Deumling, D., 2004. "Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity accounts." *Land Use Policy*, 21 (2004) 231-246.

KITZES J., PELLER A., GOLDFINGER S., WACKERNAGEL M. [2007] "Current Methods for Calculating National Footprint Accounts", *Science For Environment and Sustainable Society*, Vol. 4, n°1, 9p.

4.1.5 Empreinte induite par les soutes internationales (bunker fuel)

Comme on l'a vu dans la formule de l'empreinte des émissions de CO₂, un terme est ajouté à l'empreinte de la consommation d'énergie fossile, le « bunker fuel ». Malgré une question directe au GFN, la définition exacte de ce terme n'a pas pu être éclaircie. Par comparaison aux données de la Belgique, il semble que ce terme soit identique pour tous les pays. Il semble s'agir de la part des soutes internationales que l'on applique à $EF_{\text{consommation énergie fossile}}$, on peut donc résumer par cette formule :

$$EF_{\text{bunker fuel}} = EF_{\text{consommation énergie fossile}} \times \text{part}_{\text{soutes internationales}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{bunker fuel}} = 3526876 \text{ hag} = 107756818 \text{ hag} \times 3,27\%$$

On peut donc résumer l'empreinte des émissions de CO₂ par la formule finale suivante :

$$EF_{\text{émissions CO}_2} = EF_{\text{consommation énergie fossile}} \times (1 + \text{part}_{\text{soutes internationales}})$$

Cette valeur de la part des soutes internationales dans les émissions de CO₂ est issue de l'International Energy Agency (IEA) ou à défaut du Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC).

Cette part est différente selon les années, cependant dans les fichiers du GFN servant au calcul de l'empreinte elle est globalement comprise entre 3 et 4%.

Dans le calculateur SAS développé au SOEs pour la phase 1 de l'exploration, on utilise arbitrairement la valeur haute de cette variable (soit 4%).

4.1.6 Résumé de l'empreinte liée aux émissions de CO₂

Pour résumer le calcul de l'empreinte partielle des émissions de CO₂, on applique la formule suivante, à partir des données de consommation d'énergie sur 6 postes :

$$EF_{\text{émissions CO}_2} = \text{Energie}_{\text{consommée}} \times (1 - TX_{\text{séquestration océans}}) \times \left(\frac{Eq_{\text{facteur}}}{3,59}\right) \times (1 + 0,04)$$

4.2 Empreinte liée aux importations d'énergie

L'empreinte énergétique des importations et exportations d'énergie est en fait une transformation des flux commerciaux de produits manufacturés (en tonne) en équivalent de CO₂ émis grâce à un facteur de conversion appelé Energie Grise (Embodied Energy). Ce CO₂ utilisé pour les flux commerciaux est ensuite transformé en hag selon la formule suivante :

$$EF_{\text{import énergie}} = \text{Energie}_{\text{importée}} \times (1 - TX_{\text{séquestration océans}}) \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

Dans le détail du calcul des importations d'énergie, le produit du rapport des facteurs d'équivalence et de rendement par le taux de séquestration de l'océan est appelé intensité carbone. On a donc :

$$EF_{\text{import énergie}} = \text{Energie}_{\text{importée}} \times \text{Intensité carbone}$$

Avec :

$$\text{Intensité carbone} = \frac{C \text{ to CO}_2}{\text{Facteur séquestration carbone}} \times Eq_{\text{facteur}} \times (1 - TX_{\text{séquestration océans}})$$

Exemple de calcul (2005) :

$$\text{Intensité carbone} = 0,28 \text{ kg} / \text{t}_{\text{CO}_2} = \frac{0,27}{0,97} \times 1,33 \times (1 - 0,25)$$

4.2.1 CO₂ contenu dans les flux commerciaux de marchandises

Les flux commerciaux sont disponibles en tonne de marchandise. Pour pouvoir les comparer aux émissions de CO₂, ces tonnes sont transformées en tonnes de CO₂ par l'utilisation d'un facteur de conversion, l'énergie grise. La formule du CO₂ lié aux flux commerciaux de produits manufacturés est donc :

$$\text{CO}_{2\text{import}} = \text{Flux Commerciaux} \times \text{Energie Grise}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$\text{CO}_2 \text{ importations (beurre)} = 7797164 \text{ Gg} = 140010 \text{ tonnes} \times 55,69 \text{ Gg / tonne}$$

4.2.1.1 Flux commerciaux

Les données proviennent des Nations Unies¹⁰. Ces flux commerciaux concernent 625 produits référencés selon la nomenclature SITC Rev1¹¹.

Dans cette liste de 625 produits, les produits manufacturés sont logiquement inclus, ainsi que les engrais servant à l'agriculture, l'uranium servant à la production d'énergie nucléaire.

Un problème se pose pour la reproductibilité alternative d'un calcul de l'empreinte, la nomenclature utilisée est la SITC Rev1 qui est une nomenclature ancienne datant de 1961. Pour utiliser d'autres sources de données sur les flux commerciaux, il conviendra de trouver des correspondances entre cette nomenclature et d'autres plus récentes telles que le SITC Rev4 ou au moins le SITC Rev3, ou même la nomenclature SHNC_6¹².

4.2.1.2 Energie grise (embodied energy)

C'est une donnée propre au GFN. En effet d'après le guide méthodologique cette donnée est issue de plusieurs sources¹³. C'est l'énergie liée à la fabrication et au transport des biens manufacturés et autres produits entrant dans les flux commerciaux.

Problème lié à cette énergie grise

Cette donnée est indispensable pour transformer les tonnes de produits en équivalent CO₂. Chaque poste de la nomenclature SITC_Rev1 est associé à une énergie grise. Il est donc nécessaire d'obtenir une table de passage entre cette nomenclature et les nomenclatures plus récentes si l'on veut recalculer cette empreinte partielle à partir d'autres données.

On peut s'interroger sur l'utilisation de cette nomenclature apparemment obsolète, on dispose aujourd'hui de la SITC Rev4.

La source n'est pas mentionnée dans le guide méthodologique du GFN. D'après L'empreinte écologique (Boutaud et Gondran, p67), cette énergie grise était dans la méthodologie précédente du GFN issue des bases de données du Stockholm Environment Institute (Barrett et al. 2005). Il ressort de la réunion du groupe de suivi du 9 avril 2009 que cette énergie grise est une analyse en cycle de vie (ACV) résultant de l'utilisation du logiciel SimaPro.

¹⁰ UN (United Nations) Comtrade 2007a. United Nations Commodity Trade Statistics Database <http://comtrade.un.org/>

¹¹ Standard International Trade Classification, Revised, 1961.

¹² Système harmonisé nomenclature combinée en 6 positions, utilisé par les douanes.

¹³ The values in 'EmbEn' are drawn from a supporting Global Footprint Network database including information collected from a variety of sources. Product Ecology Consultants. 2008. SimaPro.

4.3 Biocapacité associée au Carbone

La biocapacité est la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour les 5 types d'usage de terres : terres cultivées, pâturages, forêt, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

On a la formule suivante, avec Bc pour biocapacité :

$$Biocapacité = Bc_{cultures} + Bc_{pâturages} + Bc_{forêt} + Bc_{pêche} + Bc_{artificialisation}$$

Avec :

$$Bc_{domaine} = Surface\ disponible_{domaine} \times Y_f \times Eq_{facteur}$$

Il n'y a pas de biocapacité associée au Carbone. L'hypothèse retenue par le GFN étant la séquestration du Carbone par la forêt, c'est donc la biocapacité de la forêt qui doit être mise en regard de l'empreinte carbone.

4.4 Résultats

4.4.1 Empreinte

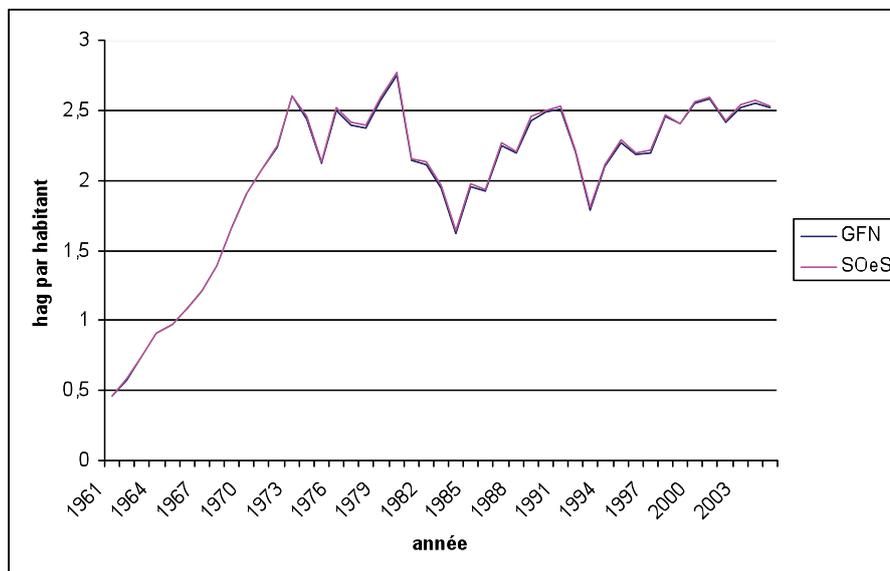
On peut remarquer de fortes variations de la valeur de l'empreinte partielle du carbone (-22% en 1981, +11% en 1998).

La valeur de l'empreinte partielle du carbone est relativement stable (2,5 hag par habitant) depuis le début des années 1970. Les valeurs précédentes sont extrêmement faibles (<1 hag par habitant jusqu'en 1965).

La figure 13 présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

L'empreinte calculée est systématiquement supérieure à l'empreinte du GFN. Ceci est probablement dû au choix qui consiste à utiliser la part maximale de la contribution de la France au transport international.

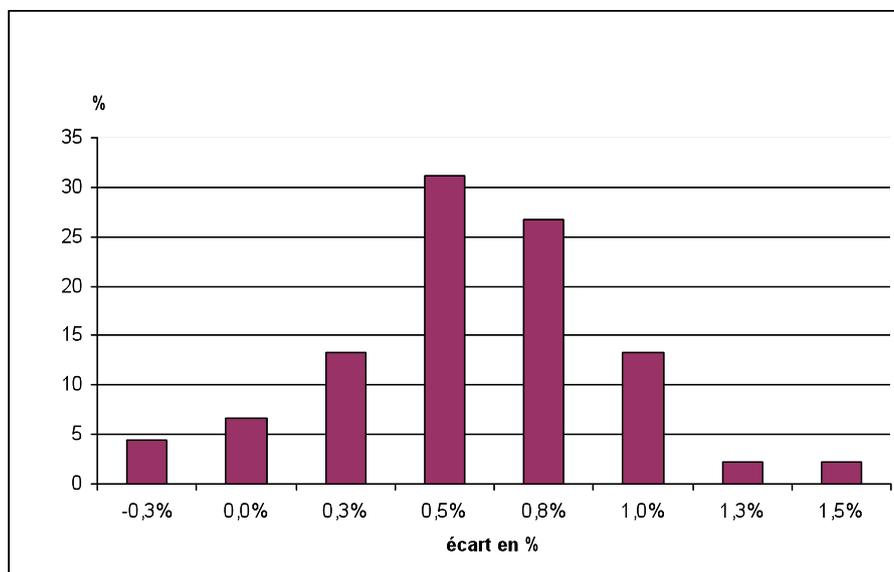
Figure 13 : comparaison de l'évolution de l'empreinte partielle du carbone (France : 1961 - 2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et celles du GFN est compris entre -0,2% et +1,4%. L'écart moyen est de 0,6% et l'écart médian de 0,6%.

Figure 14 : distribution des écarts entre l'empreinte
(France : 1961 - 2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

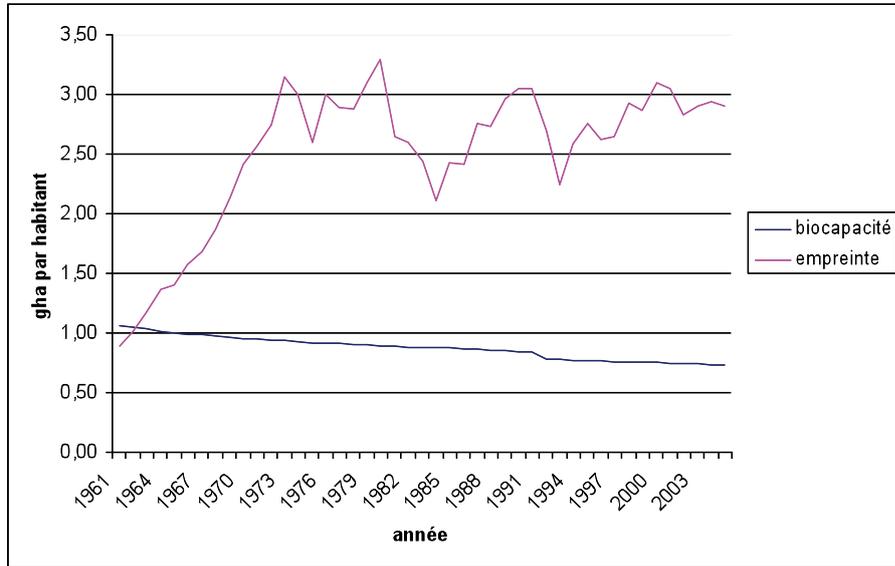
Remarque complémentaire sur l'empreinte du carbone :

Jusqu'en 2003, l'énergie nucléaire entrait dans le calcul de l'empreinte partielle du carbone. L'énergie nucléaire n'est plus prise en compte dans la dernière version des données fournies par le GFN. Le fait que le SOeS ait reçu les données du GFN dans les deux versions permet d'aborder la pertinence de la prise en compte ou au contraire de la non prise en compte du nucléaire.

4.4.2 Excédent ou déficit écologique du Carbone

Pour estimer le déficit ou l'excédent écologique du carbone, il faut comparer la somme de l'empreinte partielle du carbone avec celle de la forêt, d'une part, avec la biocapacité de la forêt, d'autre part. Comme le montre la figure suivante, on est dans une situation de déficit écologique lorsque l'on rapproche l'empreinte partielle du carbone, et celle de la forêt, de la biocapacité de la forêt.

Figure 15 : comparaison de l'empreinte partielle du carbone et de la forêt avec la biocapacité de la forêt (France : 1961 - 2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

5 Empreinte partielle des cultures

L'empreinte partielle liée aux cultures est le résultat de l'agrégation d'une empreinte tenant compte de la production de produits agricoles du pays et d'une empreinte des flux commerciaux de produits agricoles.

La formule se résume à l'expression suivante où EF signifie Ecological Footprint:

$$EF_{Cultures} = EF_{Production\ agri} + EF_{Import\ agri} - EF_{Export\ agri}$$

Avec : $EF_{Export\ agri} = EF_{Export\ produits\ agri} + EF_{Export\ animaux\ vivants}$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{cultures} = 77\text{ Mgha} = (85\text{ Mgha} + 14\text{ Mgha}) + [(17\text{ Mgha} + 4\text{ Mgha}) - (37\text{ Mgha} + 6\text{ Mgha})]$$

Remarque : la part des cultures exportées sous forme vivante (EF export animaux vivants) contribue faiblement à l'empreinte partielle des cultures (de l'ordre de 1 à 2% du résultat final), pour une méthode de calcul très compliquée (voir détail du calcul dans l'explication de l'empreinte partielle des pâturages (chapitre 6.2)).

5.1 Empreinte de la production agricole

L'empreinte de la production agricole est le produit de la production de produits agricoles, hors élevage, par le rapport entre le facteur d'équivalence et le facteur de rendement.

$$EF_{Production\ agri} = production_{agricole} \times \frac{Eq_{facteur}}{Rdt_{facteur}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{production\ agri}(abri\ cot\ s) = 61000\ hag = 176950t \times \frac{2,64\ hag / wha}{7,66\ t / wha}$$

Note : Wha signifie hectare mondial.

5.1.1 Production agricole

Les données de production agricole proviennent de la FAO14 et concernent 178 produits disponibles sur le site <http://faostat.fao.org/site/526/default.aspx>.

Les données de production utilisées sont, bien entendu, les données France.

<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>.

Comme dans le cas de l'énergie, on se heurte à un problème de nomenclature des produits. La nomenclature retenue n'est pas clairement identifiée, il semble que ce soit la nomenclature Annexe I du traité de la CE.

Remarque : lors du calcul de l'empreinte de la production, seuls les produits primaires sont retenus, ceci évite les doubles comptes, un kilo de blé ne comptera que comme un kilo de blé, pas également en farine.

¹⁴ Food and Agriculture Organization.

5.1.2 Facteur d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sol en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

5.1.3 Facteur de rendement

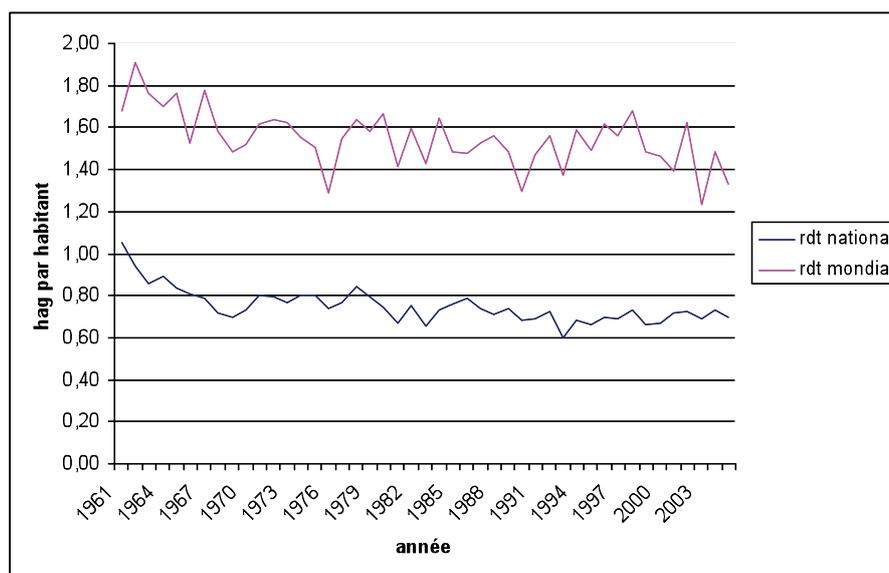
Le facteur de rendement est obtenu à partir des mêmes données de la FAO sur la production agricole <http://faostat.fao.org/site/526/default.aspx>.

On utilise cette fois les données mondiales avec une distinction de calcul selon qu'il s'agit de produits primaires ou secondaires (dans le cas des produits secondaires, un taux d'extraction¹⁵, identique pour chaque année, est appliqué au produit primaire associé). Le facteur de rendement d'un produit est donc :

$$Rdt_{facteur} = TX_{Extraction} \times \frac{\text{production}_{mondiale}}{\text{surface cultivée}_{mondiale}}$$

Remarque : l'utilisation du rendement mondial n'est pas anodine en termes de valeur de l'empreinte. Ainsi, pour la France, l'utilisation du facteur de rendement national entrainerait une baisse significative de la valeur de l'empreinte (par exemple : 44 millions d'hectares globaux contre 74 Mhag en 2003)

Figure 16 : empreinte des cultures de la France selon le choix du facteur de rendement



Source : GFN, traitements SOeS.

La communication des résultats par le GFN se fait sur la base du calcul utilisant le facteur de rendement mondial.

¹⁵ Le taux d'extraction est un facteur permettant de calculer la quantité de produit agricole primaire nécessaire à la production du produit secondaire considéré. Ainsi par exemple, le taux d'extraction du jus de pomme concentré (code 209.79) par rapport à la pomme (code 0808.10_a) retenu par le GFN dans ces calculs est de 0,22 tonne par tonne de produit primaire : il faut une tonne de pomme pour produire 220 kilos de jus concentré. Ce taux d'extraction peut être supérieur à 1 lorsque le produit secondaire contient des produits supplémentaires (eau, sel, sucre...).

Voir également le rapport FAO sur les facteurs de conversion techniques : http://www.fao.org/ES/ess/fr/tc/f_p.asp

Remarque : le facteur de rendement utilisé est donc le rendement mondial et non national. L'empreinte d'un pays dont l'agriculture est plus productive que la moyenne mondiale sera majorée quand on lui affecte le facteur de rendement mondial. A l'opposé, la méthode minimise l'empreinte des pays ayant un faible rendement agricole.

5.2 Empreinte liée aux importations de produits agricoles

On a la formule suivante :

$$EF_{\text{import agri}} = \text{importations} \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{import agri}} (\text{pâte de cacao}) = 480\,000 \text{ hag} = 82\,000 \text{ t} \times \frac{2,64 \text{ hag} / \text{wha}}{0,45 \text{ t} / \text{wha}}$$

Note : Wha signifie hectare mondial.

5.2.1 Importations et exportations de produits agricoles

Les données sur les importations agricoles proviennent de la FAO. Le niveau de détail est plus fin que pour la production, puisque cette fois les produits secondaires, c'est à dire transformés, sont également concernés, on compte ainsi 550 produits. Les données sont disponibles sur le site <http://faostat.fao.org/site/526/default.aspx>.

Comme dans le cas de la production agricole on se heurte à un problème de nomenclature des produits.

Remarque : lors du calcul de l'empreinte liée aux importations, tous les produits primaires ou secondaires sont retenus. Par exemple un kilo de blé importé comptera comme un kilo de blé, alors qu'un kilo de farine de blé importé sera transformé dans son équivalent en blé.

5.2.2 Facteur d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sol en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

5.2.3 Facteur de rendement et taux d'extraction

Le facteur de rendement est obtenu à partir des données de la FAO sur la production agricole <http://faostat.fao.org/site/526/default.aspx>. On utilise obligatoirement les données mondiales avec la distinction de calcul selon qu'il s'agit de produits primaires ou secondaires. Dans le cas des produits secondaires, on applique un taux d'extraction constant dans le temps pour opérer la conversion en produits primaires¹⁶. Le facteur de rendement d'un produit est donc :

$$Rdt_{\text{facteur}} = TX_{\text{Extraction}} \times \left(\frac{\text{production}_{\text{mondiale}}}{\text{surface cultivée}_{\text{mondiale}}} \right)_{\text{produit primaire}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$Rdt_{\text{facteur}} (\text{pâte de cacao}) = 0,45 \text{ tonne} / \text{Wha} = 0,84 \text{ t}_{\text{secondaire}} / \text{t}_{\text{primaire}} \times \left(\frac{4012874 \text{ t}}{7431303 \text{ wha}} \right)_{\text{fève de cacao}}$$

Note : Wha signifie hectare mondial.

¹⁶ Extraction rates for secondary and tertiary products are drawn from the *NFA Constants 2008* workbook, and refer to the quantity of daughter product that can be produced per quantity of parent product. These extraction rates are calculated using world-average values from the FAO's technical conversion factor memo (FAO 2000). An adjustment factor to ensure that simultaneous secondary products are not double counted is also considered in the calculation.

Remarque : Les taux d'extraction utilisés sont constants pour la période d'étude (1961-2005). On peut se demander si cette hypothèse est réaliste pour tous les produits, les processus industriels ayant évolué depuis 1961. Une tonne de cacao donne-t-elle toujours la même quantité de beurre de cacao depuis 1961 (650 kg en l'occurrence) ?

5.3 Cas de unharvested cropland

Pour compléter le calcul de l'empreinte partielle des cultures, on applique le taux de "unharvested cropland" au bilan des productions, importations et exportations agricoles. Le taux retenu pour les calculs par le GFN est de 24,2% (source **NFA Data 2008** workbook).

La définition exacte de ce terme est encore à éclaircir à ce niveau de l'étude.

On a :

$$EF_{Cultures} = (EF_{production} + EF_{imports} - EF_{exports}) \times (1 + 0.242)$$

Remarque : suite à la réunion de cadrage du groupe de suivi du 9 avril 2009, une question directe a été posée au GFN concernant la définition exacte de ce taux de « unharvested cropland », question restée malheureusement sans réponse. La comparaison avec la Belgique permet de supposer que le même taux est appliqué à tous les pays.

5.4 Biocapacité associée aux cultures

La biocapacité est la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour les 5 types d'usage de terres : terres cultivées, pâturages, forêt, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

On a la formule suivante, avec Bc pour biocapacité :

$$Biocapacité = Bc_{cultures} + Bc_{pâturages} + Bc_{forêt} + Bc_{pêche} + Bc_{artificialisation}$$

Avec dans le cas des cultures :

$$Bc_{cultures} = Surface\ disponible_{cultures} \times Y_f \times Eq_{facteur}$$

5.4.1 Surface disponible

Les données concernant la surface sont issues de Corine Land Cover, des statistiques de la FAO ou du GLC¹⁷.

La source privilégiée, complète pour l'ensemble des postes concernés, est CLC.

Les surfaces retenues pour estimer la biocapacité des cultures correspondent aux postes de la nomenclature CLC suivants :

- B21 : terres arables
- B22 : cultures permanentes
- B24 : zones agricoles hétérogènes

5.4.2 Facteurs d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sols en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2.).

¹⁷ Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Center and European Commission. *Global Land Cover 2000*. IES, Italy. <http://www-tem.jrc.it/glc2000/>

Comme dans le cas des empreintes partielles, ce facteur d'équivalence sert à transformer la biocapacité d'un pays en hectares globaux de façon à rendre possibles les comparaisons internationales.

5.4.3 Facteurs de culture

Le GFN calcule une surface cultivée mondiale fictive en multipliant, pour chaque produit, la surface nationale par le rapport des rendements mondiaux et nationaux :

$$\text{Surface fictive cultivée}_{\text{mondiale}} = \frac{Rdt_{\text{nationale}}}{Rdt_{\text{mondial}}} \times \text{surface cultivée}_{\text{nationale}}$$

Le facteur de culture des cultures est ensuite obtenu en divisant la somme de ces surfaces fictives mondiales utilisées pour les cultures des seuls produits primaires (hors fourrage à destination de l'alimentation animale) par la somme des surfaces nationales.

$$Yf_{\text{cultures}} = \frac{\sum_{\text{produits_primaires}} \text{surface fictive cultivée}_{\text{mondiale}}}{\sum_{\text{produits_primaires}} \text{surface cultivée}_{\text{nationale}}}$$

5.5 Résultats

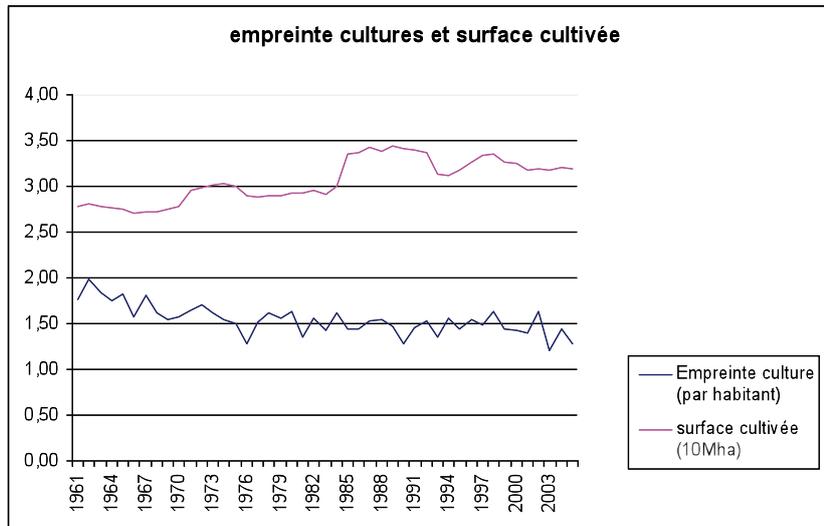
5.5.1 Empreinte

On peut remarquer de fortes variations de la valeur de l'empreinte partielle des cultures, qu'elle soit calculée par le SOeS ou par le GFN, entre 2000 et 2003 (- 25 % à + 20 % d'une année sur l'autre).

Ces écarts ne découlent pas de fluctuations importantes des surfaces cultivées (voir figure 17), mais proviennent de la méthode même de calcul. C'est le rendement agricole qui influence la valeur de l'empreinte partielle des cultures.

On obtient ainsi une mesure de l'impact des conditions climatologiques (canicule de 1976 ou de 2003, par exemple) ou de tout autre facteur influant sur la production de produits agricoles.

Figure 17 : comparaison surface cultivée/empreinte partielle des cultures

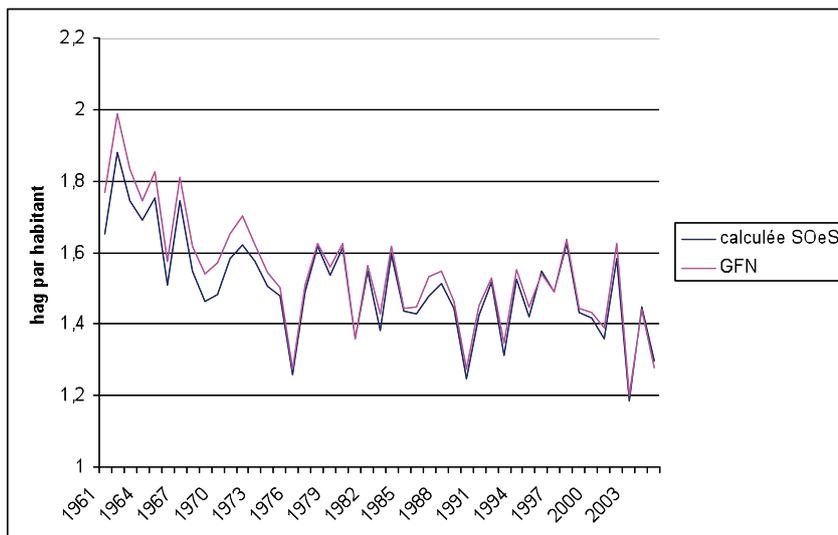


Source : GFN, traitements SOeS.

Remarque : la construction du facteur de rendement à partir des quantités effectivement produites ne tient en aucune façon compte du caractère « soutenable¹⁸ » ou non de l'agriculture. On compare la quantité de produits agricoles produite localement avec la quantité de produits agricoles produite réellement au niveau mondial, sans prise en compte de la sur ou sous exploitation du sol ou du type d'agriculture. Par exemple, le moindre rendement de l'agriculture biologique se traduit mécaniquement toutes choses égales par ailleurs par une élévation de l'empreinte écologique.

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

Figure 18 : comparaison de l'évolution de l'empreinte partielle des cultures (France : 1961 - 2005)

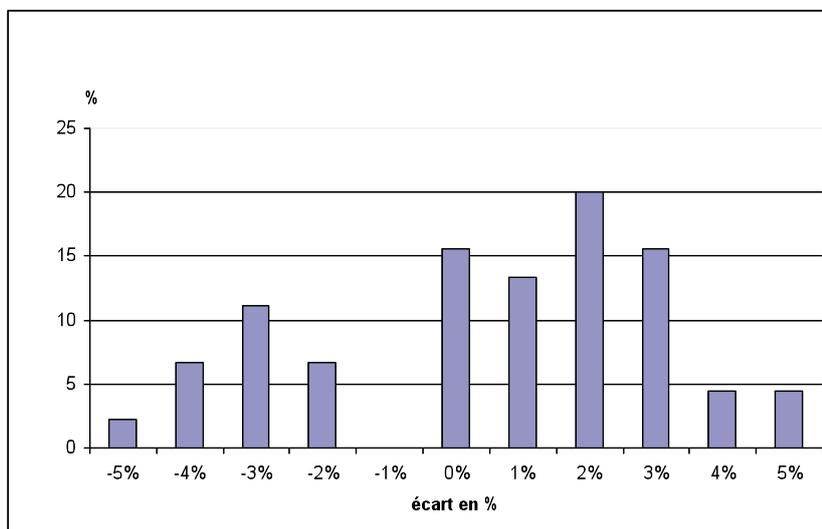


Source : GFN, traitements SOeS.

¹⁸ L'introduction du rendement des cultures en agriculture biologique peut être une piste de travail, cela fait partie des recommandations internationales (FAO, et rapports internationaux de l'IAASTD -Johannesburg 2008).

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et de ceux du GFN est compris entre - 5 % et + 4,8 %. L'écart moyen est de + 0,5 % et l'écart médian de + 1,3 %.

Figure 19 : distribution des écarts entre l'empreinte
(France : 1961-2005)

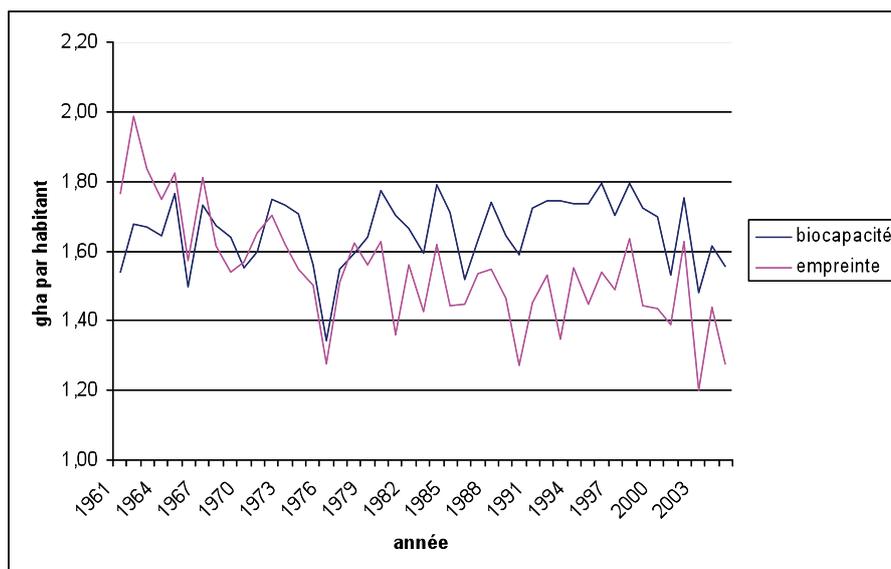


Source : GFN, traitements SOeS.

5.5.2 Excédent ou déficit écologique des cultures

La comparaison avec l'empreinte partielle des cultures montre un excédent écologique depuis la fin des années 70. La France consomme ainsi moins de surface agricole qu'elle n'en dispose.

Figure 20 : comparaison de l'empreinte partielle et de la biocapacité des cultures
(France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

6 Empreinte partielle des pâturages

L'empreinte partielle liée aux pâturages est liée à la consommation de fourrage pour la production de bétail du pays d'une part, et de l'estimation des quantités de fourrage utilisés pour l'élaboration des produits d'origine animale (animaux vivants ou produits laitiers par exemple) importés ou exportés. En ce qui concerne la production de bétail du pays, le calcul de l'empreinte distingue les quantités d'animaux produites (en tonnes de viande ou en têtes de bétail, converties en tonnes de matières sèches équivalentes) et les produits cultivés destinés à l'élevage.

La formule se résume à l'expression suivante où EF signifie Ecological Footprint:

$$EF_{\text{pâturage}} = EF_{\text{consommation fourrage}} + EF_{\text{import herbe sous forme bétail}} - EF_{\text{export herbe sous forme bétail}}$$

Avec la distinction :

$$EF_{\text{consommation fourrage}} = EF_{\text{demande alimentation animale}} - EF_{\text{offre alimentation animale}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{pâturage}} = 19Mhag = 20Mhag + 3Mhag - 4Mhag$$

6.1 Empreinte de la consommation de fourrage

L'empreinte partielle due à la consommation de fourrage est en fait le résidu excédentaire des besoins en nourriture nécessaires à la production d'animaux vivants. Pour cela, on compare l'empreinte de la consommation d'aliments par le bétail à la biocapacité des pâturages, l'empreinte des produits de l'élevage étant le **minimum** de ces deux résultats.

$$EF_{\text{consommation fourrage}} = \text{MINIMUM}[\text{besoin en fourrage}, \text{Biocapacité}_{\text{pâturage}}]$$

Remarques : Ce calcul est quasi systématiquement inutile car la biocapacité est plus faible que les quantités produites (seulement 2 cas contraires entre 1961 et 2005). Dans plus de 90% des cas il apparaît que l'empreinte de l'élevage est la biocapacité en pâturage.

On peut s'interroger sur le choix de la formule de l'empreinte très particulière de l'élevage lorsqu'on voit comment les produits de la pêche sont appréhendés. Les concepteurs de l'empreinte auraient pu utiliser une approche d'équivalence similaire à celle de la pêche à savoir mobiliser un équivalent en calories pour déterminer des hectares de culture (on utilise souvent la formule « 7 calories végétales nécessaires pour produire 1 calorie animale »). Le calcul serait alors plus simple et cohérent avec celui de la pêche. Il traduirait mieux le fait qu'un régime carné consomme plus de ressources globales qu'un régime végétarien.

6.1.1 Biocapacité des pâturages

Les données utilisées sont issues de CORINE Land Cover¹⁹, CLC. Les surfaces retenues pour estimer la surface des pâturages correspondent aux postes de la nomenclature CLC suivants²⁰ :

- B23 : prairies
- B24 : zones agricoles hétérogènes
- B32 : milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

¹⁹ CORINE Land Cover est une base de données européenne d'occupation biophysique des sols obtenue par photo-interprétation d'images satellites avec une nomenclature en 44 postes.

²⁰ Postes retenus dans *NFA Data 2008*.

Ces données sont multipliées par le facteur d'équivalence et par le facteur de culture Yf_{pasture} des pâturages (le détail du calcul de Yf est détaillé dans le chapitre consacré à l'étude des biocapacités).

$$\text{Biocapacité}_{\text{pâturage}} = \text{surface CLC}_{\text{herbe}} \times Yf_{\text{pasture}} \times Eq_{\text{facteur}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$\text{Biocapacité}_{\text{pâturage}} = 20275672 \text{ hag} = (16095313 \text{ ha} + 3334147 \text{ ha}) \times 2,10 \text{ wha} / \text{nha} \times 0,50 \text{ hag} / \text{wha}$$

Note : wha signifie hectare mondial.

6.1.2 Consommation d'aliments à destination de l'élevage

L'empreinte de la consommation d'aliments résulte de la différence entre la demande et l'offre en nourriture. Pour cela, on travail en tonne de matière sèche équivalente, soit :

- Pour la demande en alimentation
La quantité de matière sèche agricole qu'il faudrait utiliser pour produire les tonnes de viandes ou têtes de bétail.
- Pour l'offre en alimentation
La quantité de matière sèche agricole produite à usage alimentaire pour le bétail ou les résidus des productions agricoles destinées à l'Homme utilisés en alimentation animale.

Attention, la liste des produits destinés à l'élevage est différente de celle des produits à usage humain. Ceci provient du fait que certains produits ont des noms différents selon qu'ils sont utilisés en alimentation humaine ou animale (cf. guidebook p46 'Feed Name', drawn from the previous revision of the FAOSTAT Supply Utilization Accounts), is used in this worksheet to perform the lookup for 'Market Feed Percent' based on the record's name as animal feed instead of its ProdSTAT name as crop product").

$$\text{Besoin en fourrage} = (\text{feed}_{\text{demande}} - \text{feed}_{\text{offre}}) \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$\text{Feed}_{\text{consommation}} = 22 \text{ Mhag} = (11445581 \text{ t} - 57005779 \text{ t}) \times \frac{0,50 \text{ hag} / \text{wha}}{1,30 \text{ t} / \text{wha}}$$

Note : wha signifie hectare mondial.

6.1.2.1 Demande en alimentation animale

Les données de départ sont les productions animales²¹, en tonnes ou en têtes, ce qui entraîne des problèmes de compatibilité entre unités. 7 catégories sont concernées : cheptel porcin, volailles, œufs, bétail, bisons « buffalos », cheptel caprin, cheptel ovin.

Pour obtenir les quantités de matière sèche utiles, on multiplie les productions animales par le Feed efficiency (quantité de nourriture nécessaire pour produire une tonne d'animal) pour les données en tonnes, et par le feed intake (quantité de nourriture par tête par jour) pour les données en têtes de bétail.

²¹ Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2007b. "FAOSTAT2." ProdSTAT database.

<http://faostat.fao.org/site/526/default.aspx>

Accessed January, 2007.

L'origine de ces valeurs est clairement identifiée²².

$$\begin{aligned}
 & \text{Feed}_{\text{demande}} \\
 & = \\
 & \sum_{\text{produits disponibles en tonnes}} (\text{production bétail}_{\text{tonnes}} \times \text{feed efficiency}) \\
 & + \\
 & \sum_{\text{produits disponibles en têtes}} (\text{production bétail}_{\text{têtes}} \times \text{feed intake} \times 365)
 \end{aligned}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$\text{Feed}_{\text{demande}} (\text{porcs}) = 8072520 \text{ t}_{\text{dm}} / \text{an} = 2018130 \text{ tonnes} / \text{an} \times 4 \text{ t}_{\text{dm}} / \text{t}_{\text{viande}}$$

$$\text{Feed}_{\text{demande}} (\text{caprins}) = 670556 \text{ t}_{\text{dm}} / \text{an} = 1224759 \text{ têtes} \times 1,5 \text{ kg}_{\text{dm}} / \text{tête} / \text{an} \times 365 / 1000$$

Note : t_{dm} est l'abréviation de tonne de matière sèche.

6.1.2.2 Offre en alimentation animale

C'est la somme des produits agricoles à usages d'élevage répartis selon trois types d'usage ou d'origine :

- Production nationale à destination de l'alimentation animale : Feed market
- Résidus de la production agricole utilisés en alimentation animale : Feed residue
- Foin et fourrage : Grass supply

$$\text{Feed}_{\text{offre}} = \text{Feed}_{\text{market}} + \text{Feed}_{\text{residue}} + \text{Grass}_{\text{supply}}$$

Cette distinction d'usage permet d'éviter des doubles comptes.

6.1.2.2.1 Production nationale à destination de l'alimentation animale

A partir de la production nationale de produits agricoles²³, on calcule la part des cultures cultivées uniquement à destination de l'alimentation animale. Pour ce faire on utilise la constante market feed percent de la FAO²⁴.

$$\text{Feed}_{\text{market}} = \sum (\text{production agricole} \times \text{market feed percent})$$

Exemple de calcul (2005) :

$$\text{Feed}_{\text{market}} (\text{maïs}) = 9\,639\,009 \text{ t}_{\text{feed}} / \text{an} = 13\,687\,659 \text{ t} / \text{an} \times 0,704 \text{ t}_{\text{feed}} / \text{t}$$

²² Haberl et al. 2007. Quantifying and mapping the human appropriate of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *PNAS* 104 (31): Table 9.

²³ Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2007b. "FAOSTAT2." ProdSTAT database.

<http://faostat.fao.org/site/526/default.aspx>

²⁴ FAOSTAT Supply Utilization Accounts.

6.1.2.2 Résidus de la production agricole utilisés en alimentation animale

Chaque produit cultivé est multiplié par le % de matière sèche (Dry Matter %²⁵) qu'il génère puis par la part de ce produit utilisé comme aliment (residue feed ratio).

On obtient ainsi la quantité de résidus de chaque produit agricole à usage d'alimentation animale.

$$Feed_{residus} = \sum (\text{production agricole} \times \%_{\text{dry matter}} \times \text{Residue Feed Ratio})$$

Exemple de calcul (2005) :

$$Feed_{residue} (\text{légumineux}) = 110507t_{residue} / an = 1754078t / an \times 90\% \times 0,07t_{residue} / t$$

6.1.2.3 Foin et fourrage

Chaque quantité de produits cultivés à usage alimentaire pour bétail²⁶ est multipliée par le pourcentage de matière sèche générée²⁷.

On tient également compte des produits importés et exportés (sans application du taux de matière sèche pour eux !).

$$Grass_{supply} = \sum ((\text{production agricole} \times 15\%_{\text{dry matter}}) + \text{import} - \text{export})$$

En résumé :

La somme de ces 3 composantes donne l'offre en alimentation animale, que l'on soustrait à la demande pour obtenir l'empreinte du besoin en fourrage pour le bétail selon la formule expliquée plus haut :

$$\text{Besoin en fourrage} = (\text{feed}_{\text{demande}} - \text{feed}_{\text{offre}}) \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

La comparaison de cette empreinte du besoin en fourrage pour l'alimentation du bétail avec la biocapacité des pâturages donne l'empreinte partielle de la consommation de fourrage.

Remarque : facteur de rendement

Le facteur de rendement utilisé dans la formule ci-dessus est, selon le guide méthodologique du GFN « le rendement national de la production de fourrage ». Or la valeur présente dans les fichiers du GFN, 1,30 tonne de matière sèche par hectare ne correspond ni au rendement français (13,10 tonnes de matière sèche par hectare) ni au rendement moyen mondial (6,19 tonnes de matière sèche par hectare) utilisés dans la formule de la biocapacité des pâturages (voir paragraphe 3 ci-après).

6.2 Empreinte liée aux importations de cultures sous forme de produits de l'élevage

La méthode utilisée pour obtenir cette empreinte partielle sert au calcul de deux empreintes partielles :

- l'empreinte des importations de cultures

Il s'agit d'estimer la quantité des différentes cultures importées sous forme de bétail, grâce à la part de chaque céréale dans l'alimentation des espèces animales.

²⁵ Haberl et al. 2007. Quantifying and mapping the human appropriate of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *PNAS* 104 (31).

²⁶ Le maïs, le trèfle, la luzerne, le sorgho, les légumineuses, le ray-grass et l'herbe à usage de fourrage et d'ensilage, ainsi que les mélanges herbes et légumes, les produits de fourrage, les foins non légumineux, les foins (Hay), et les foins non définis.

²⁷ Constante GFN avec cet avertissement : " For lack of better data, we assume all given yields are wet weight, and assume a constant % dry weight for all forage and silage crops".

On additionne les différentes composantes entrant dans l'alimentation animale à l'exclusion des produits issus de la pêche et du fourrage (Grass).

- l'empreinte des importations de fourrage sous forme de produits de l'élevage

On estime la quantité de fourrage importée sous forme de produits de l'élevage²⁸, un pays importateur se verra ainsi imputer la quantité de nourriture utilisée dans le pays d'origine du produit.

La formule est la suivante :

$$EF_{import_livestock} = \sum [imports \times \sum_{aliments} (\frac{Feed_mix}{TX_extraction} \times Feed_intensity)]$$

Remarque :

Les données de commerce extérieur sont exprimées soit en tonnes, soit en têtes de bétail (pour seulement 6 espèces animales) dans le même fichier de données. Ceci oblige à utiliser des taux de conversion des têtes en tonnes de viande. L'origine de ces taux de conversion n'est pas clairement identifiée dans le guidebook²⁹.

De plus, si l'on applique les taux de conversion indiqués dans le guidebook³⁰ mais également dans le fichier GFN on n'obtient pas les mêmes résultats que ceux disponibles dans le NFA data 2008.

Autre interrogation, les taux de conversion ne sont pas identiques pour un même produit qu'il s'agisse d'importations ou d'exportations. Exemple en 1978 : porcs, importations=1658 Kt/an (onglet 'prodstat_n') multiplié par 0.0017 (contre 0.095 en valeur théorique annoncée (onglet 'Cnst_grazing')) donne 2755 tonnes (onglet livestock_efi); pour les exportations on a 221 kt/an multipliées par 0.13 (contre 0.095 en valeur théorique annoncée) donnant 30 210 tonnes.

6.2.1 Feed mix

Il s'agit de la part de chaque produit nécessaire à la production d'une tonne de produits de l'élevage.

Ainsi par exemple, pour obtenir une tonne de bœuf, il faut utiliser 800 kg de maïs, 160 kg de soja, 5,52 tonnes d'herbe (pâturage), etc.

L'origine de cette donnée est renseignée comme ceci dans le guidebook du GFN (p 55) : "This data come from....the FAO?".

6.2.2 Taux d'extraction

De même que dans le cas des cultures, il s'agit de convertir les produits secondaires en tonnes de produits primaires nécessaires à leur élaboration. Le taux d'extraction est constant sur la période 1961-2005.

Remarque :

1 - Il faut vérifier que les quantités de produit primaire nécessaires à l'obtention de produits transformés sont stables sur une si longue période malgré les progrès technique et l'évolution des rendements.

2 - Les taux d'extraction ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour les cultures.

Ainsi pour le code 1602.50, bovine meat, other preparations, le taux d'extraction est de 0,48 dans le calcul de l'empreinte pâturages contre 0,39 dans le calcul de l'empreinte cultures.

²⁸ Animaux vivants, mais également cuir, lait, laine...

²⁹ Zacks et al (Justin has ref) **tel quel dans le guidebook.**

³⁰ For few products, tradestat_n worksheet provides data in terms of heads rather than tonnes. Animal weights drawn from the cnst_grazing worksheet are thus used to convert to tonnes.

6.2.3 Feed intensity

Cette variable est obtenue en divisant le facteur d'équivalence des cultures par le rendement agricole mondial.

On a ainsi :

$$\text{Feed intensity} = \frac{\text{facteur d'équivalence}_{\text{cultures}}}{\frac{\text{production mondiale}}{\text{surface mondiale}}}$$

Les données de production et de surface mondiales sont issues du FAO (voir le traitement des cultures).

6.3 Biocapacité associée aux pâturages

La biocapacité est la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour les 5 types d'usage de terres : terres cultivées, pâturages, forêt, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

On a la formule suivante, avec Bc pour biocapacité :

$$\text{Biocapacité} = BC_{\text{cultures}} + BC_{\text{pâturages}} + BC_{\text{forêt}} + BC_{\text{pêche}} + BC_{\text{artificialisation}}$$

Avec dans le cas des pâturages :

$$BC_{\text{pâturages}} = \text{Surface disponible}_{\text{pâturages}} \times Y_f \times Eq_{\text{facteur}}$$

6.3.1 Surface disponible

Les données concernant la surface sont issues de Corine Land Cover, des statistiques de la FAO ou du GLC³¹.

La source privilégiée, complète pour l'ensemble des postes concernés, est CLC.

Les surfaces retenues pour estimer la biocapacité des pâturages correspondent aux postes de la nomenclature CLC suivants :

- B23 : prairies
- B32 : milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

6.3.2 Facteurs d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sols en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

Comme dans le cas des empreintes partielles, ce facteur d'équivalence sert à transformer la biocapacité d'un pays en hectares globaux de façon à rendre possibles les comparaisons internationales.

6.3.3 Facteurs de culture

Les facteurs de cultures sont égaux au rapport entre rendements nationaux et rendements mondiaux.

$$Y_f = \frac{Rdt_{\text{national}}}{Rdt_{\text{mondial}}}$$

³¹ Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Center and European Commission. Global Land Cover 2000. IES, Italy. <http://www-tem.jrc.it/glc2000/>

Dans le cas des pâturages, ce facteur Y_f est le rapport entre les rendements de production de matière sèche. Le GFN utilise ainsi un rendement à l'hectare du pâturage français de 13,10 tonnes de matière sèche comparé à un rendement moyen mondial de 6,19 (valeurs constantes de 1961 à 2005).

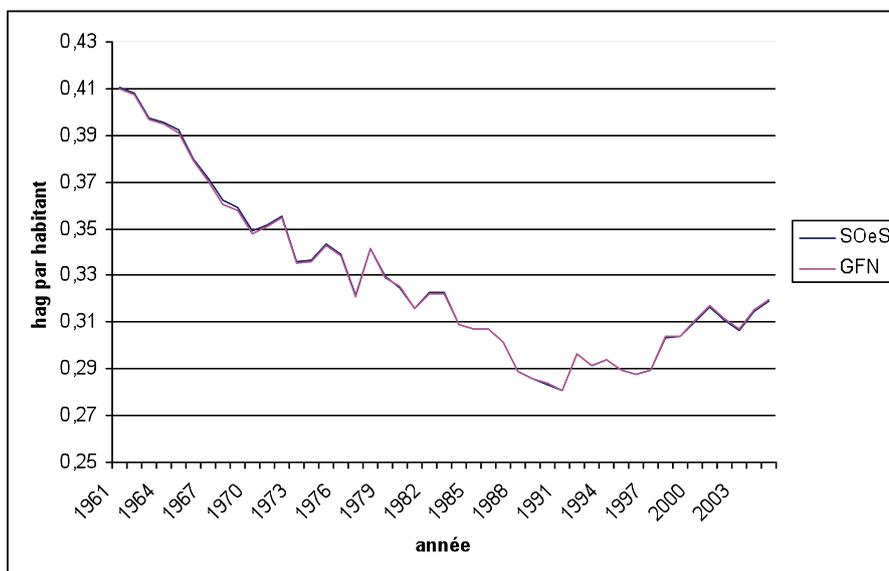
$$Y_{f_{\text{pâturages}}} = \frac{13,10}{6,19} = 2,12$$

6.4 Résultats

6.4.1 Empreinte

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte. Le calcul est correctement reproductible.

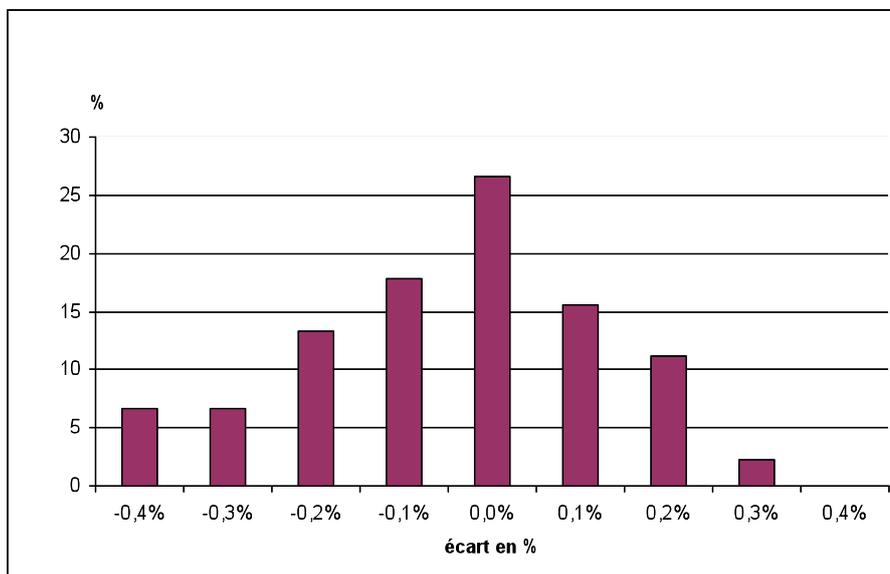
Figure 21 : comparaison de l'évolution de l'empreinte partielle des pâturages (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et de ceux du GFN est compris entre - 0,4% et +0,3%. L'écart moyen est de 0,05% et l'écart médian de 0,02%.

Figure 22 : distribution des écarts entre l'empreinte partielle des pâturages (France : 1961-2005)

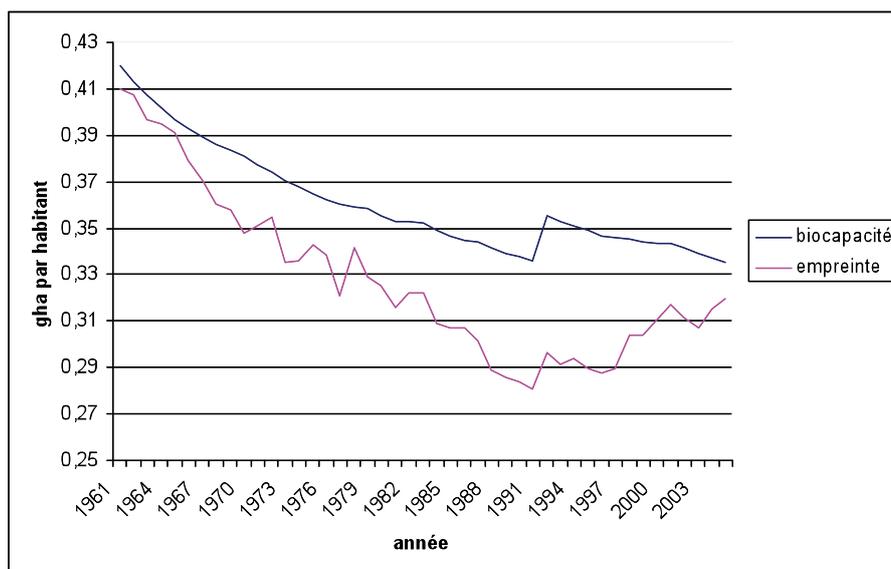


Source : GFN, traitements SOeS.

6.4.2 Excédent ou déficit écologique des pâturages

La comparaison avec l'empreinte partielle des pâturages montre un excédent écologique sur la période d'étude. L'augmentation subite de la biocapacité des pâturages entre 1991 et 1992 provient d'une augmentation brusque du facteur d'équivalence des pâturages, qui passe d'une valeur d'environ 0,47 hag/wha à 0,50 hag/wha après 1992.

Figure 23 : comparaison de l'empreinte partielle et de la biocapacité des pâturages (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

7 Empreinte partielle de l'artificialisation

Contrairement aux autres empreintes partielles qui sont reflètent l'espace nécessaire à la consommation de produits issus des cultures, de l'exploitation de la forêt ou de la pêche, l'empreinte de l'artificialisation reflète la surface occupée par les infrastructures humaines.

Cette empreinte se décompose en fait en deux éléments, avec EF pour Ecological Footprint :

$$EF_{\text{artificialisation}} = EF_{\text{occupation sol}} + EF_{\text{énergie hydroélectrique}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{artificialisation}} = 15\,342\,127 \text{ hag} = 15\,341\,389 \text{ hag} + 737 \text{ hag}$$

7.1 Empreinte de l'occupation du sol

Il s'agit en fait du poste B1 de la nomenclature CLC³². On considère que ces terres artificialisées occupent uniquement des terres arables. Cette hypothèse est discutable et fait l'objet de nombreux débats. Cela revient à dire que les villes et infrastructures sont systématiquement situées sur des terres agricoles, ou susceptibles de le redevenir.

Le caractère discutable des hypothèses retenues pour tenir compte de l'artificialisation et de la surface nécessaire à la production d'énergie hydroélectrique est d'ailleurs reconnu par le GFN dans le guide méthodologique :

- *Infrastructure areas are assumed to occupy former cropland. This assumption will overestimate both the Footprint and biocapacity of infrastructure areas located on formerly low-productivity areas. However, since the Footprint and biocapacity of built-up land are equal, any inaccuracies in this assumption apply equally across Footprint and biocapacity. Arid countries in particular may be subject to a systematic overestimate of their infrastructure Footprint and biocapacity.*
- *Hydro areas are assumed to occupy world average land. This assumption will overestimate the hydro Footprint in countries where unproductive land (e.g., barren rock) has been flooded, and underestimate the hydro Footprint in countries where very productive land (e.g., cropland) has been flooded.*

La formule de l'empreinte de l'occupation du sol est donc identique à celle de la biocapacité de l'occupation du sol :

$$EF_{\text{occupation sol}} = \text{Biocapacité}_{\text{occupation sol}} = \text{surface du poste B1}_{\text{CLC}} \times Rdt_{\text{facteur}} \times Eq_{\text{facteur}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{occupation sol}} = 15\,341\,389 \text{ hag} = 2\,743\,002 \text{ ha} \times 2,12 \text{ wha / nha} \times 2,64 \text{ hag / wha}$$

Note : wha signifie hectare mondial.
nha signifie hectare national.

7.1.1 Poste B1 de la nomenclature CORINE Land Cover

L'origine des données CLC utilisées par GFN est la suivante : World Resources Institute. 2007. "EarthTrends: Environmental Information." Global Land Cover Classification Database. <http://earthtrends.wri.org>.

Les données CLC de 1990 et 2000 ont été utilisées pour le calcul. D'autres estimations seront bientôt faites avec les données de la base 2006 produite par le SOeS et d'ores et déjà disponibles.

³² CORINE Land Cover est une base de données européenne d'occupation biophysique des sols obtenue par photo-interprétation d'images satellites avec une nomenclature en 44 postes. Trois versions existent : 1990, 2000 et 2006. Cette base permet entre autres de calculer des statistiques d'occupation des sols (territoire artificialisés, terres agricoles, espaces naturels,...) et d'en analyser les évolutions.

7.1.2 Facteur de rendement

Le facteur de rendement utilisé pour cette empreinte est en fait le facteur de culture Yf des cultures utilisé dans les calculs de biocapacité, c'est le rapport entre les surfaces mondiales et les surfaces nationales utilisées pour la production des produits agricoles primaires³³. Seuls sont retenus les produits dont les deux types de surfaces sont disponibles l'année du calcul.

$$\text{Facteur rendement}_{\text{artificialisation}} = Yf_{\text{cultures}} = \frac{\sum \text{surface fictive cultivée mondiale}}{\sum \text{surface cultivée nationale}} \frac{\text{produits primaires}}{\text{produits primaires}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$\text{Facteur rendement}_{\text{artificialisation}} = Yf_{\text{cultures}} = 2,12 \text{wha} / \text{nha} = \frac{28\,572\,090 \text{ wha}}{13\,507\,721 \text{ nha}}$$

Note : wha signifie hectare mondial.
nha signifie hectare national.

Des sources de données différentes doivent être identifiées pour effectuer un calcul alternatif.

7.1.3 Facteur d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sol en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

Le facteur d'équivalence utilisé est celui des cultures, conformément à l'hypothèse d'infrastructures situées sur les terres bio productives.

7.2 Empreinte liée à la consommation d'énergie hydroélectrique

On convertit l'énergie produite par les centrales hydroélectriques des barrages en hectares globaux. Ceci revient à considérer que les terres submergées par les barrages sont des terres productives de rendement moyen³⁴.

La formule de l'empreinte de l'énergie hydro-électrique est :

$$EF_{\text{énergie hydroélectrique}} = \text{production}_{\text{énergie hydroélectrique}} \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{énergie hydroélectrique}} = 737 \text{gha} = 56768 \text{MWh} / \text{an} \times \frac{1 \text{gha} / \text{wha}}{77 \text{MWh} / \text{wha} / \text{an}}$$

Note : wha signifie hectare mondial.

³³ Les données de production agricoles sont celles utilisées pour l'empreinte partielle des cultures, source FAO, nomenclature en 178 produits (données France et données Monde).

<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

³⁴ An equivalence factor of 1 to hydro area, reflecting the assumption that the area inundated by hydroelectric reservoirs has world-average productivity.

7.2.1 Production hydroélectrique

Il s'agit de la consommation d'énergie d'origine hydro-électrique en MegaWatt par heure. Cette donnée est datée de 2007 provient de British Petroleum³⁵.

7.2.2 Facteur de rendement

La surface des terres immergées par les barrages hydroélectriques n'est pas une donnée disponible dans Corine Land Cover. Pour pallier cette absence d'information, le facteur de rendement est un facteur de conversion qui permet d'estimer la surface inondée à partir de la moyenne de production d'électricité en fonction de la surface de la retenue d'eau sur les 20 plus grands barrages du monde (WWF2000)³⁶.

Ceci est confirmé dans le livre « L'empreinte écologique » de Boutaud et Gondran (p. 72).

7.3 Biocapacité associée à l'artificialisation

La biocapacité est la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour les 5 types d'usage de terres : terres cultivées, pâturages, forêt, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

On a la formule suivante, avec Bc pour biocapacité :

$$Biocapacité = Bc_{cultures} + Bc_{pâturages} + Bc_{forêt} + Bc_{pêche} + Bc_{artificialisation}$$

Avec dans le cas des terres artificialisées :

$$Bc_{artificialisation} = Surface\ artificialisée \times Y_f \times Eq_{facteur}$$

Dans le cas de l'artificialisation, l'hypothèse retenue par le GFN est que l'artificialisation se fait au détriment de terres cultivables³⁷, le facteur de cultures retenu est donc celui des terres cultivables³⁸.

7.4 Résultats

7.4.1 Empreinte

La méthode utilisée par le GFN consiste à supposer que la surface artificialisée évolue proportionnellement à la population. De ce fait une surface par habitant est calculée puis multipliée par la population de l'année d'étude pour obtenir une surface artificialisée estimée.

$$CLC_{année} = \frac{CLC_{2000}}{population_{2000}} \times population_{année}$$

En utilisant cette même méthode sur les données CLC du SOeS on obtient un résultat très proche de celui de GFN.

³⁵ Statistical Review of World Energy. <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>

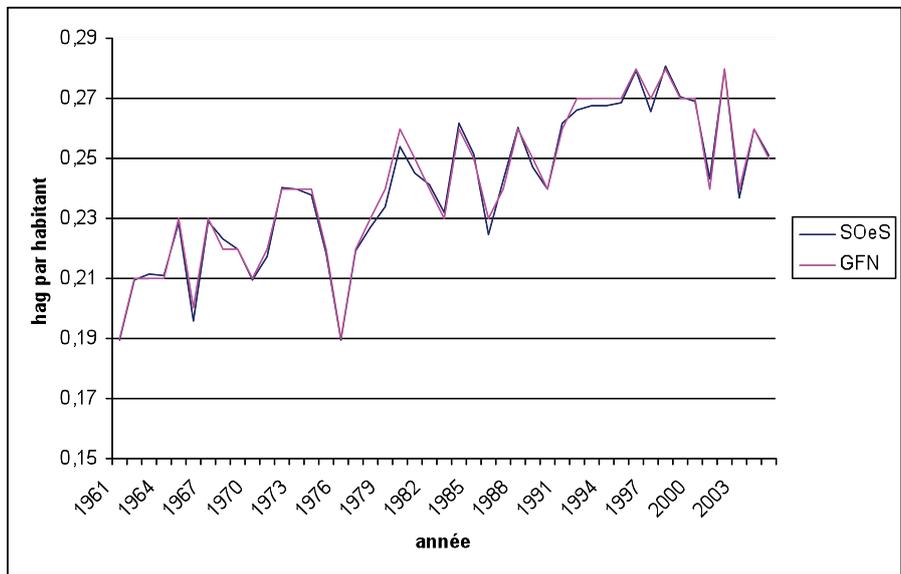
³⁶ The yield value is calculated as a world-average yield of hydroelectricity, which is calculated based on an average from 20 large dams (Goodland 1997).

³⁷ Page 37 de ce rapport

³⁸ Voir détail du calcul de ce facteur de culture $Y_{f.cultures}$ page 27 de ce rapport

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l’empreinte.

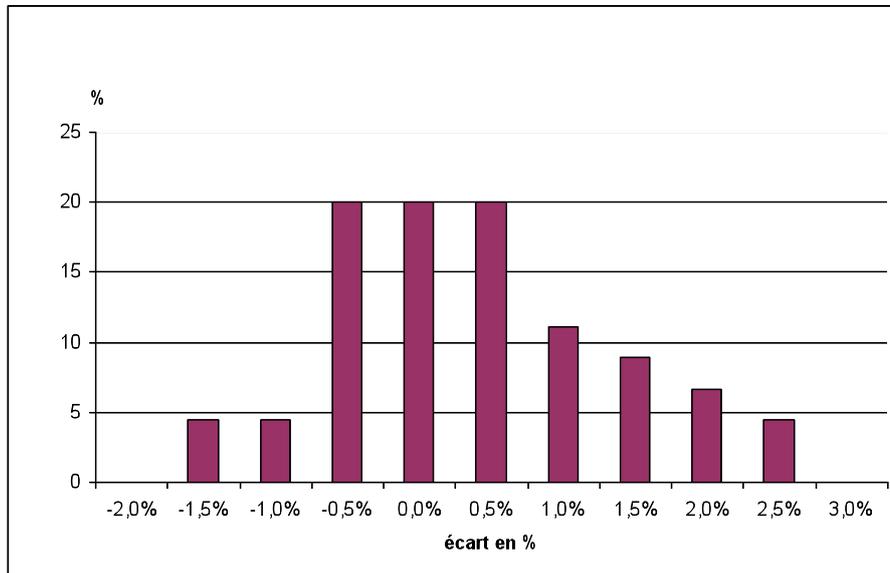
Figure 24 : comparaison de l’évolution de l’empreinte partielle de l’artificialisation (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et de ceux du GFN est compris entre - 1,3 % et + 2,6 %. L'écart moyen est de 0,4 % et l'écart médian de 0,3 %.

Figure 25 : distribution des écarts entre l'empreinte partielle de l'artificialisation (France : 1961-2005)

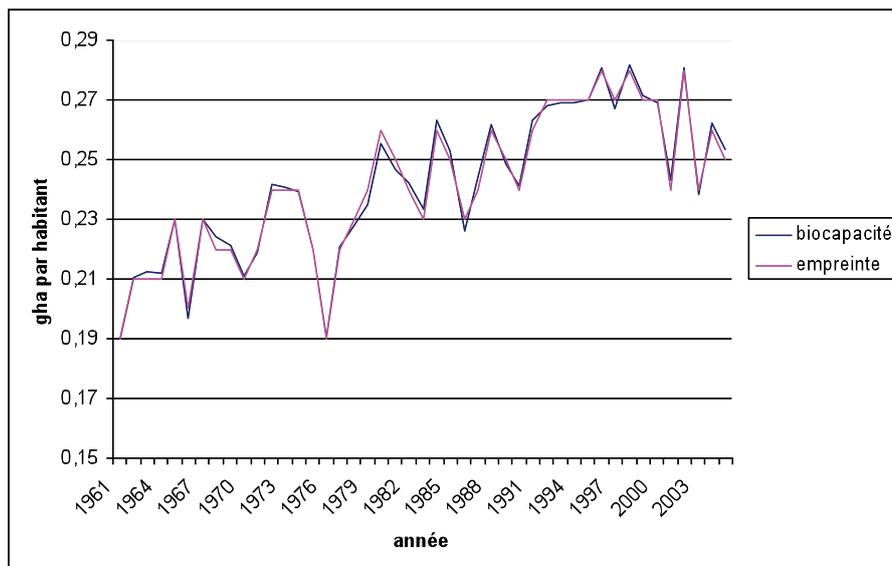


Source : GFN, traitements SOeS.

7.4.2 Excédent ou déficit écologique de l'artificialisation

L'empreinte partielle de l'artificialisation étant égale à la biocapacité de cette même artificialisation augmentée de la consommation en énergie d'origine hydroélectrique, il est logique que la France ne présente ni déficit, ni excédent écologique du à l'artificialisation.

Figure 26 : comparaison de l'empreinte partielle et de la biocapacité de l'artificialisation (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

8 Empreinte partielle de la forêt

L'empreinte partielle liée aux forêts est le résultat de l'agrégation d'une empreinte tenant compte de la production de produits forestiers du pays et d'une empreinte des flux commerciaux de produits forestiers.

La formule se résume à l'expression suivante où EF signifie Ecological Footprint:

$$EF_{\text{forêt}} = EF_{\text{Production forêt}} + EF_{\text{Import forêt}} - EF_{\text{Export forêt}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{forêt}} = 23\,378\,280 \text{ hag} = 18\,726\,733 + 23\,624\,065 - 18\,972\,518$$

L'empreinte liée à la production de produits forestiers est calculée en prenant en compte la production de produits primaires (grumes) et de bois à usage de combustion (fuel wood). Pour les importations et exportations on prend en compte en plus des produits primaires, les produits secondaires.

Remarque : cette distinction primaire secondaire permet d'éviter les doubles comptes dans les productions nationales ; par exemple, une armoire ne sera pas comptabilisée en production locale mais par rapport au seul bois produit ou exporté pour la construire. Cette distinction ne tient par contre pas compte des années de production et d'utilisation des bois produits (stocks).

8.1 Empreinte de la production forestière

De la même façon que pour les composantes cultures, carbone et pâturages, l'empreinte de la production de produits forestiers provient de la multiplication de la production forestière par le rapport entre le facteur d'équivalence et le facteur de rendement :

$$EF_{\text{Production forêt}} = \text{production}_{\text{forêt}} \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{production forêt}} (\text{bois de placage}) = 8\,193\,222 \text{ hag} = 14\,500\,000 \text{ m}^3 \times \frac{1,33 \text{ hag} / \text{wha}}{2,36 \text{ m}^3 / \text{wha}}$$

Note : wha signifie hectare mondial.

8.1.1 Production forestière

La production forestière est déclinée en 16 produits primaires : 13 catégories de bois d'œuvre et 3 catégories de bois de chauffage. Ces données proviennent de la FAO 2007a. "FAOSTAT," ForestSTAT database, disponible sur le site :

<http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#ancor>

8.1.2 Facteur d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sols en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

8.1.3 Facteur de rendement

Le facteur de rendement utilisé est le rendement moyen mondial, soit 2,36 m³ ha/an. Cette valeur est différente du facteur de rendement national : 5,40 m³ ha/an.

L'origine des valeurs de ces rendements n'est pas clairement identifiée³⁹. L'étude des fichiers de données du GFN entre 1961 et 2005 montre que ce facteur de rendement est constant sur la période.

Pour obtenir l'empreinte partielle de la production forestière, on somme la production primaire de bois d'œuvre et la production de bois de chauffage.

8.2 Empreinte liée aux importations de produits forestiers

Le calcul est le même à la différence que les importations et exportations de produits secondaires sont également prises en compte.

$$EF_{\text{import forêt}} = \text{importation}_{\text{forêt}} \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{(Tx_{\text{extraction}} \times Rdt_{\text{facteur}})}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{\text{import forêt}} (\text{panneau de particules}) = 634366 \text{ hag} = 788579 \text{ m}^3 \times \frac{1,33 \text{ hag} / \text{wha}}{0,70 \text{ m}^3 / \text{m}^3_{\text{primaire}} \times 2,36 \text{ m}^3_{\text{primaire}} / \text{wha}}$$

Note : wha signifie hectare mondial.

Le taux d'extraction est un coefficient multiplicateur permettant de convertir les produits transformés en l'équivalent de produit primaire nécessaire à leur obtention. Ces taux d'extraction sont une moyenne pondérée des taux d'extraction moyens des pays européens. La source de cette donnée est l'*European Forest Sector Outlook Survey* (UNECE 2005).

Contrairement à l'empreinte partielle de la production forestière, les produits secondaires et les produits primaires sont comptabilisés pour les importations et les exportations.

8.3 Biocapacité associée à la forêt

La biocapacité est la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour les 5 types d'usage de terres : terres cultivées, pâturages, forêt, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

On a la formule suivante, avec Bc pour biocapacité :

$$\text{Biocapacité} = Bc_{\text{cultures}} + Bc_{\text{pâturages}} + Bc_{\text{forêt}} + Bc_{\text{pêche}} + Bc_{\text{artificialisation}}$$

Avec dans le cas des forêts :

$$Bc_{\text{forêts}} = \text{Surface disponible}_{\text{forêts}} \times Y_f \times Eq_{\text{facteur}}$$

8.3.1 Surface disponible

Les données concernant la surface sont issues de Corine Land Cover, des statistiques de la FAO ou du GLC⁴⁰. La source privilégiée, complète pour l'ensemble des postes concernés, est CLC.

³⁹ combination of sources including the FAO Temperate and Boreal Forest Resource Assessment, FAO's Global Fibre Supply Model, and Global Footprint Network calculations based on IPCC accounting methodology

Les surfaces retenues pour estimer la biocapacité des forêts correspondent au poste B31 (forêts) de la nomenclature CLC.

8.3.2 Facteurs d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sols en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

Comme dans le cas des empreintes partielles, ce facteur d'équivalence sert à transformer la biocapacité d'un pays en hectares globaux de façon à rendre possibles les comparaisons internationales.

8.3.3 Facteurs de culture

Les facteurs de cultures sont égaux au rapport entre rendements nationaux et rendements mondiaux.

$$Y_f = \frac{Rdt_{national}}{Rdt_{mondial}}$$

Dans le cas des forêts, ce facteur Y_f est le rapport entre les rendements nationaux 5,40 m³ ha/an, et mondiaux 2,36 m³ ha/an de grumes (arbres abattus non encore transformés).

8.4 Résultats

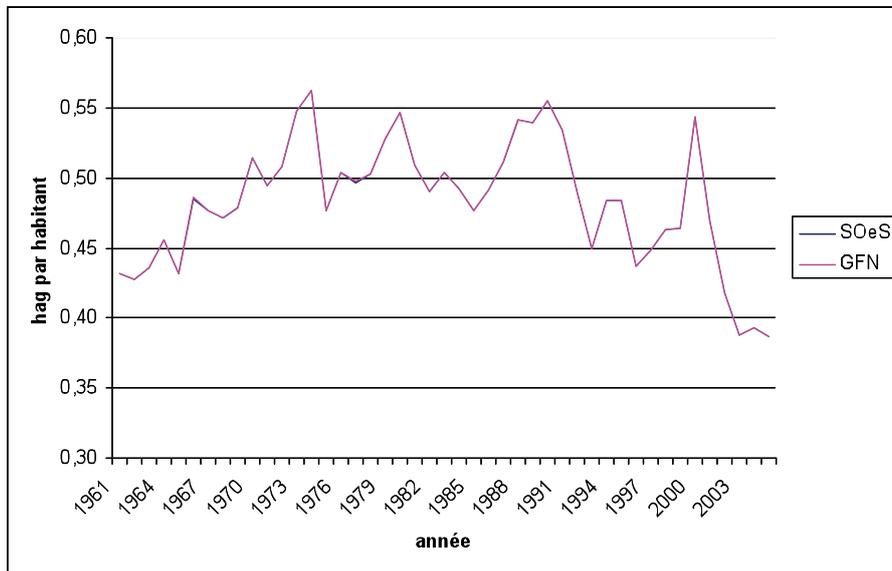
8.4.1 Empreinte

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

Les résultats obtenus sont très proches de ceux du GFN : les deux courbes sont quasiment confondues.

⁴⁰ Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Center and European Commission. Global Land Cover 2000. IES, Italy. <http://www-tem.jrc.it/glc2000/>

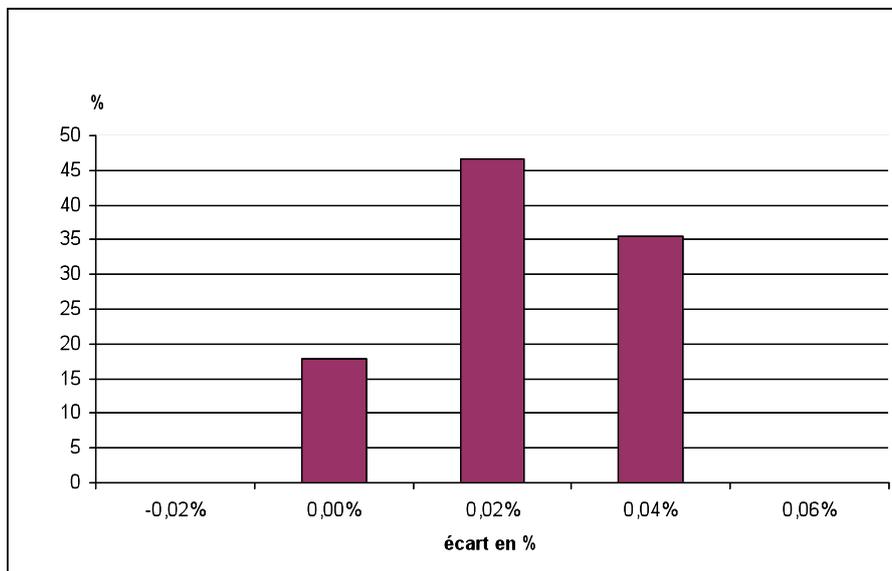
Figure 27 : comparaison de l'évolution de l'empreinte partielle de la forêt (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et de ceux du GFN est compris entre 0 et 0,04 %. Ecart moyen et médian sont de 0,02 %.

Figure 28 : distribution des écarts entre l'empreinte partielle de la forêt (France : 1961-2005)



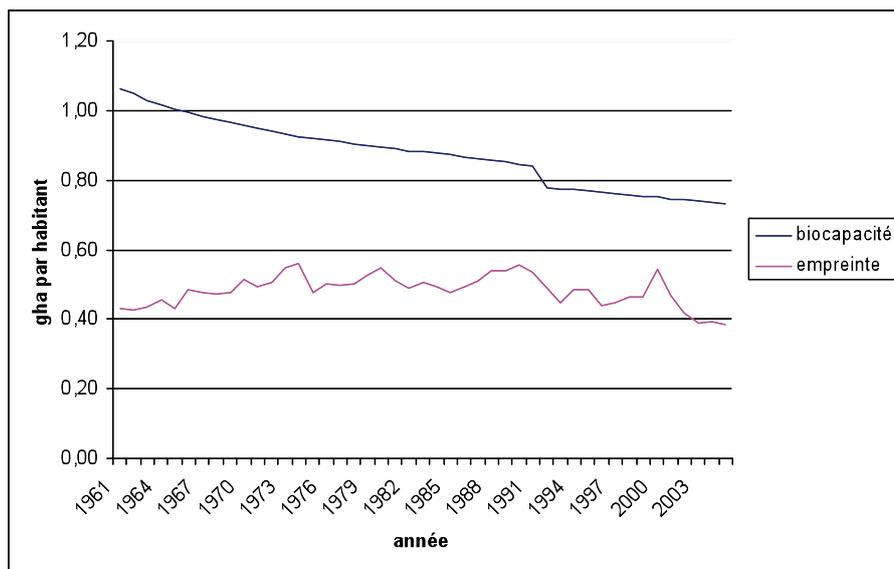
Source : GFN, traitements SOeS.

8.4.2 Excédent ou déficit écologique de la forêt

La biocapacité des forêts doit répondre à deux usages, l'utilisation effective des ressources forestières (empreinte partielle de la forêt) et l'absorption du Carbone issu des activités humaines (empreinte partielle du Carbone).

Si l'on se place du seul point de vue de l'utilisation des ressources forestières, la France est en excédent écologique sur la période d'étude, la biocapacité diminuant de façon régulière mais supérieure de près de 0,5 hag par habitant à l'empreinte partielle de la forêt.

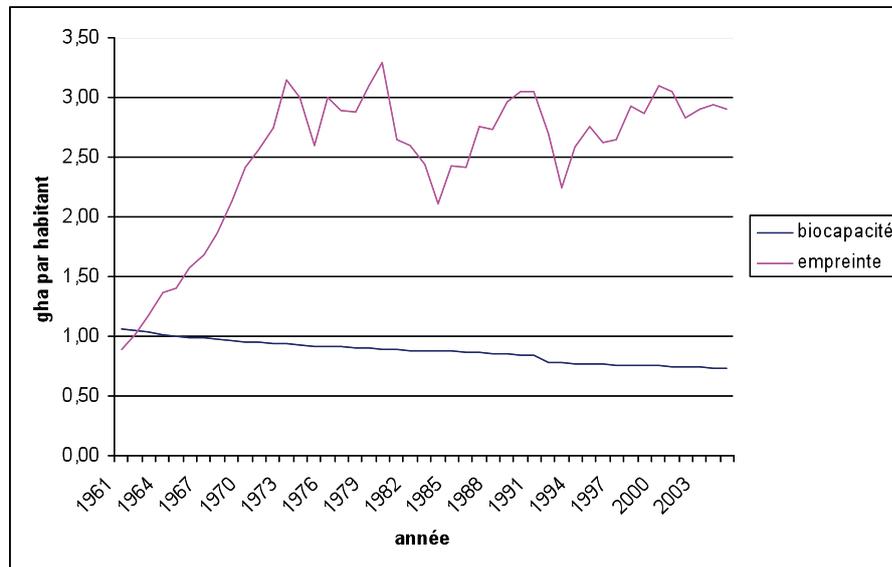
Figure 29 : comparaison de l'empreinte partielle et de la biocapacité de la forêt
(France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

Par contre si l'on compare cette biocapacité à la somme des empreintes partielles du Carbone et de la forêt, on se retrouve en très fort déficit écologique.

Figure 30 : comparaison de l'empreinte partielle du Carbone et de la forêt et de la biocapacité de la forêt (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

9 Empreinte partielle de la pêche

L'empreinte partielle liée à la pêche est le résultat de l'agrégation d'une empreinte tenant compte des captures de poissons (en mer et en eau douce) du pays et d'une empreinte des flux commerciaux de produits issus de la pêche.

La formule se résume à l'expression suivante où EF signifie Ecological Footprint:

$$EF_{fish} = EF_{fish\ marine} + EF_{fish\ inland} + EF_{import\ fish} - EF_{export\ fish}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{fish} = 10259441\ hag = 9124508\ hag + 4020\ hag + 3557211\ hag - 2426298\ hag$$

L'empreinte de la pêche est calculée en divisant le montant de la production primaire de protéines nécessaire à la vie d'une espèce aquatique par une estimation de la production primaire exploitable par hectare de zone marine. Cette production primaire exploitable est basée sur une estimation globale de la production durable d'espèces aquatiques (FAO, 1971⁴¹) converties en équivalents de la production primaire, et divisé par le total disponible de zone marine. Ce calcul tient compte du niveau trophique des espèces de poisson, c'est-à-dire la hiérarchie dans la chaîne alimentaire : une espèce d'un niveau trophique élevé nécessitera plus d'espace.

Remarque : *cette empreinte partielle ne comptabilise pas l'aquaculture. En prévision d'une future comptabilisation de cette activité, deux onglets relatifs à l'aquaculture d'espèces marines et d'eau douce sont néanmoins disponibles dans le fichier NFA data 2008.*

9.1 Empreinte de la pêche

9.1.1 Captures de poissons

Le fichier GFN distingue les captures de poissons de 1326 espèces marines et 234 espèces d'eau douce ("inland water"). Le calcul retient toutes les captures ramenées à terre, quel que soit le lieu de pêche. Ainsi on comptabilise la totalité des prises effectives d'un pays qui pêche dans les eaux internationales ou dans une zone autre que son plateau continental. De ce fait, cette empreinte n'est pas comparable avec la biocapacité de la pêche de chaque nation, cette biocapacité étant calculée sur la seule base de la surface du plateau continental de chaque nation.

La formule appliquée est la même que les prises soient marines ou d'eau douce, ce qui nous conduit à ne détailler le calcul que pour les poissons océaniques.

On utilise les captures de poissons⁴² (pêche) que l'on multiplie par la formule :

$$EF_{fish\ marine} = \text{Fish captures}_{marine} \times \frac{Eq_{facteur}}{Rdt_{facteur}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{fish\ marine}(\text{anguille}) = 485\ hag = 76\ t \times \frac{0,40\ hag / wha}{0,06\ t / wha}$$

Note : wha signifie hectare mondial.

⁴¹ L'estimation de la production durable d'espèces aquatique date de 1971, cette donnée a probablement dû être révisée depuis.

⁴² Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2007c. "Fisheries Global Information System." FishSTAT database. <http://www.fao.org/fishery/figis>

9.1.2 Facteur d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sol en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

9.1.3 Facteur de rendement

On définit la constante APP, Available Primary Productivity⁴³. C'est la part moyenne de surface du plateau continental nécessaire à la production d'une tonne de poisson. Cette donnée est obtenue à partir de la récolte moyenne mondiale de poisson ramenée en production primaire (pp) par hectare rapportée au plateau continental du pays.

Pour la France elle est égale à 4,25 t C pp (ha shelf)⁻¹ /an.

On définit également la variable PPR, Primary Production Required. C'est la production de chaque espèce nécessaire à la production d'une tonne de "poisson" selon la formule de Pauly et Christensen utilisant le niveau trophique de chaque espèce⁴⁴:

$$PPR = \frac{DiscardFactor}{9} \times \left(\frac{1}{TransferEfficiency} \right)^{(TrophicLevel-1)}$$

Avec :

- Discard Factor, le taux de rejet des prises « accessoires ». Cette information n'étant pas disponible pour toutes les espèces, le GFN utilise le même taux pour toutes les espèces⁴⁵.

$$Discard Factor = \frac{0,07 + 0,26}{0,26} = 1,27$$

- Transfer Efficiency, le taux de transfert entre les niveaux trophiques de la chaîne alimentaire (ainsi pour produire une tonne de poisson il faut 10 tonnes de poissons du niveau inférieur). Sa valeur est constante et égale à 10%⁴⁶.

Le facteur 1/9 convertit la biomasse de poisson en la quantité de carbone équivalente⁴⁷.

Exemple de calcul (2005) :

$$PPR(anguille) = 68,30 = \frac{1,27}{9} \times \left(\frac{1}{0,1} \right)^{(3,69-1)}$$

⁴³ **Available Primary Productivity**, the amount of primary productivity that can be sustainably harvested from each hectare of continental shelf area. This is calculated from the FAO estimate of sustainable harvest, multiplied by the PPR for world-average fish and divided by the area of the continental shelf.

⁴⁴ Lorsque le niveau trophique de l'espèce n'est pas connu, on applique un niveau trophique moyen.

⁴⁵ Pauly & Christensen, 1995.

⁴⁶ Pauly & Christensen, 1995.

⁴⁷ The coefficient of 1/9 placed in the front converts wet weight of fish biomass to the mass of its carbon content, as primary productivity is given in tonnes of carbon per hectare.

Le facteur de rendement est ainsi obtenu en faisant le rapport entre ces deux termes. Cette formule fait appel au niveau trophique (position de l'espèce dans la chaîne alimentaire) de chaque espèce de poisson⁴⁸:

$$Rdt_{facteur} = \frac{Available\ Primary\ Productivity}{PPR}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$Rdt_{facteur}(anguille) = 0,06 = \frac{4,25}{68,30}$$

9.2 Empreinte liée aux importations de produits de la pêche

Le calcul distingue les importations et exportations de 117 produits issus de la pêche selon la nomenclature harmonisée de la FAO de 2002 sur les flux de matières⁴⁹.

La formule appliquée est sensiblement la même que celle utilisée pour l'empreinte partielle de la production de poisson marins ou d'eau douce, mais un taux d'extraction est appliqué sur les produits secondaires pour estimer leur équivalence en produit primaire.

$$EF_{fish\ import} = Fish_{import} \times \frac{Eq_{facteur}}{TX_{Extraction} \times Rdt_{facteur}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF_{fish\ import}(\text{anchois préparés}) = 6854\ hag = 7206\ t \times \frac{0,40\ hag / wha}{0,69\ t / t_{primaire} \times 0,60\ t_{primaire} / wha}$$

Note : wha signifie hectare mondial.

9.2.1 Facteur d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sol en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

9.2.2 Facteur de rendement et taux d'extraction

Le facteur de rendement en recourant à la même formule que pour la production de poisson :

$$Rdt_{facteur} = \frac{Available\ Primary\ Productivity}{PPR}$$

⁴⁸ Froese, R. and D. Pauly (Eds.) 2008. "FishBase."

<http://www.fishbase.org>

⁴⁹ a slight FAO modification of the 2002 Harmonized Standard name of the traded products.

Exemple de calcul (2005) :

$$Rdt_{facteur}(\text{anchois préparés}) = 0,60 = \frac{4,25}{\left[\left(\frac{1,27}{9} \right) \times \left(\frac{1}{0,1} \right)^{(2,70-1)} \right]}$$

Dans le cas des produits secondaires, on applique un taux d'extraction constant dans le temps pour opérer la conversion en produits primaires.

9.3 Biocapacité associée à la pêche

La biocapacité est la surface biologiquement productive dont dispose un pays. Elle est calculée pour les 5 types d'usage de terres : terres cultivées, pâturages, forêt, pêcheries (mer et eau douce) et terres artificialisées.

On a la formule suivante, avec Bc pour biocapacité :

$$Biocapacité = Bc_{cultures} + Bc_{pâturages} + Bc_{forêt} + Bc_{pêche} + Bc_{artificialisation}$$

Avec dans le cas de la pêche :

$$Bc_{pêche} = \text{surface plateau continental} \times Y_f \times Eq_{facteur}$$

9.3.1 Surface disponible

Les données concernant la surface sont issues de Corine Land Cover, des statistiques de la FAO ou du GLC⁵⁰. La source privilégiée, complète pour l'ensemble des postes concernés, est CLC.

Les surfaces retenues pour estimer la biocapacité des pêcheries correspondent aux postes B51 (eaux continentales) et B52 (eaux maritimes) de la nomenclature CLC.

9.3.2 Facteurs d'équivalence

Le calcul de ces facteurs d'équivalence résulte d'une pondération des différents types de sols en fonction de leur productivité agricole potentielle (voir chapitre sur le détail de ces facteurs d'équivalence chapitre 2.1.2).

Comme dans le cas des empreintes partielles, ce facteur d'équivalence sert à transformer la biocapacité d'un pays en hectares globaux de façon à rendre possibles les comparaisons internationales.

9.3.3 Facteurs de culture

Les facteurs de cultures sont égaux au rapport entre rendements nationaux et rendements mondiaux.

$$Y_f = \frac{Rdt_{national}}{Rdt_{mondial}}$$

⁵⁰ Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Center and European Commission. Global Land Cover 2000. IES, Italy. <http://www-tem.jrc.it/glc2000/>

Dans le cas de la pêche, on distingue selon que l'on considère les pêches maritimes ou en eau continentale :

- Pêche marine

C'est le rapport entre le rendement par hectare du plateau continental de la France et celui du plateau continental mondial (en kilogramme de biomasse par hectare).

Le GFN utilise des rendements constants entre 1961 et 2005 (820 tonnes par hectare pour la France contre 504 tonnes par hectares pour la moyenne mondiale).

- Pêche en eau douce

Pour ce qui est de l'eau douce, il n'existe pas de statistiques mondiales. Le GFN utilise un facteur de rendement égal à 1 : un litre d'eau douce donne la même quantité de biomasse partout dans le monde.

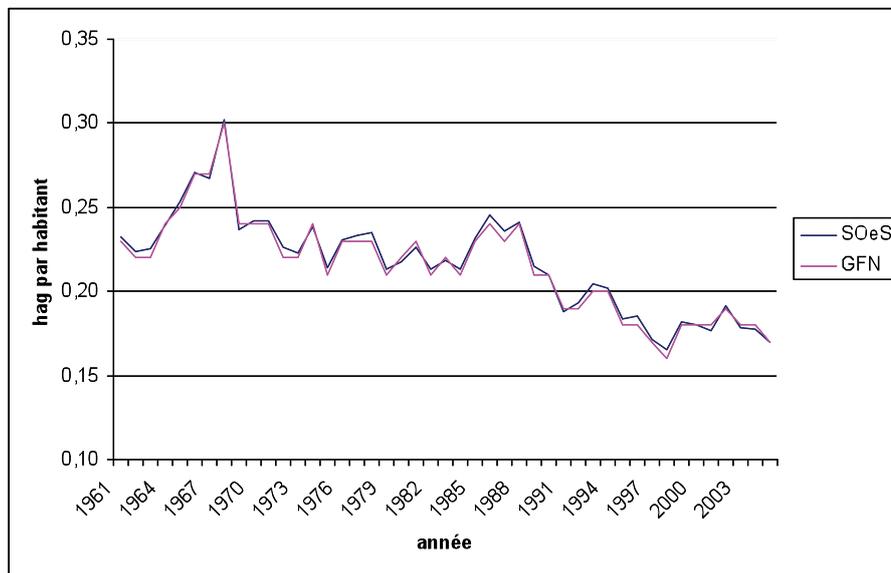
Remarque : cette hypothèse illustre le fait que l'empreinte écologique ne tient pas compte de la qualité physico-chimique des cours d'eau. La pollution des rivières n'est ainsi pas intégrée dans le calcul de la biocapacité.

9.4 Résultats

9.4.1 Empreinte

Les résultats du calcul sont présentés dans la figure ci-après.

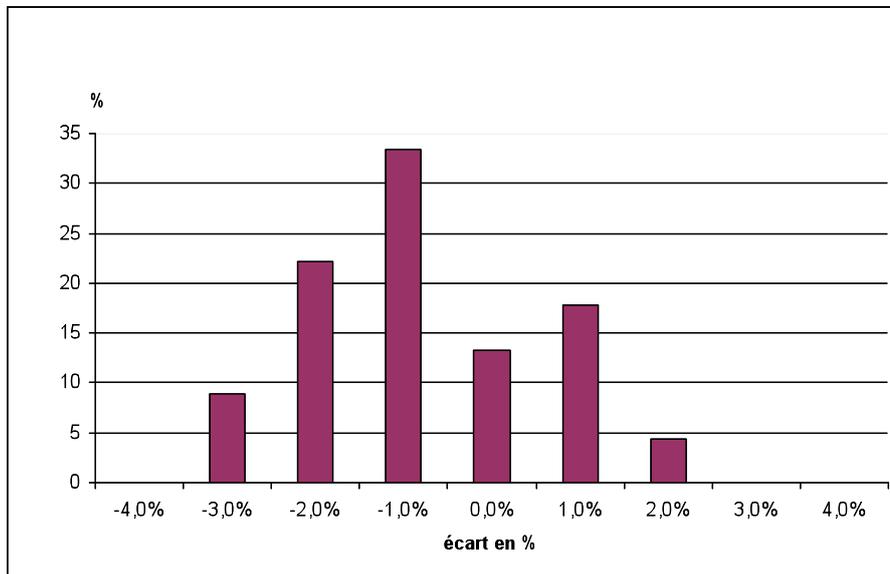
Figure 31 : comparaison de l'évolution de l'empreinte partielle de la pêche (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

L'écart entre le calcul du SOeS et celui du GFN est compris entre - 3,3 % et + 1,9 %. L'écart moyen est de -0,8 % et l'écart médian de - 0,9 %.

Figure 32 : distribution des écarts entre l'empreinte partielle de la pêche (France : 1961-2005)

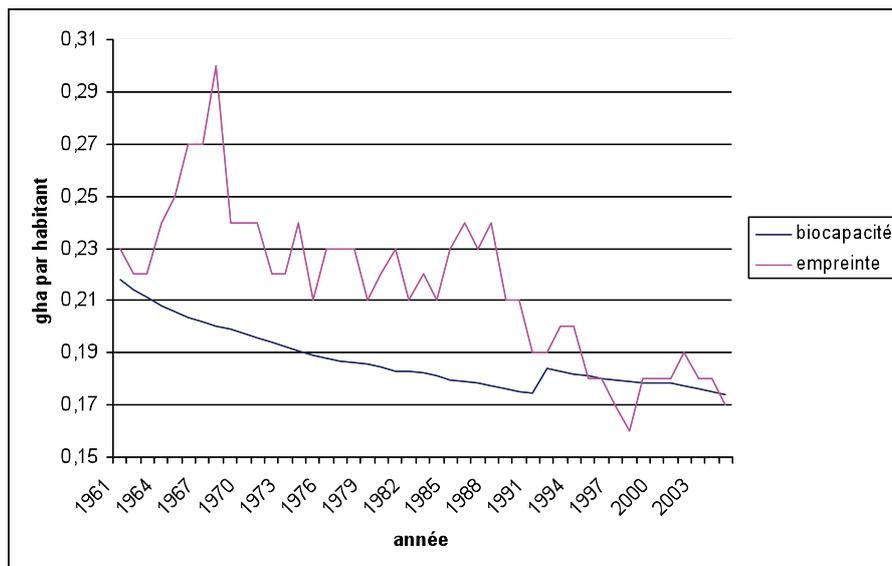


Source : GFN, traitements SOeS.

9.4.2 Excédent ou déficit écologique de la pêche

On constate une situation de déficit écologique jusqu'au milieu des années 90, puis la France devient quasiment excédentaire. L'augmentation de la biocapacité des pêcheries entre 1991 et 1992 provient d'une augmentation brusque du facteur d'équivalence des pêcheries, qui passe d'une valeur d'environ 0,37 hag/wha à 0,40 hag/wha après 1992.

Figure 33 : comparaison de l'empreinte partielle et de la biocapacité de la pêche (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

10 Empreinte écologique

L'empreinte écologique est la somme des 6 empreintes partielles dont le calcul vient d'être détaillé. La formule est donc simple :

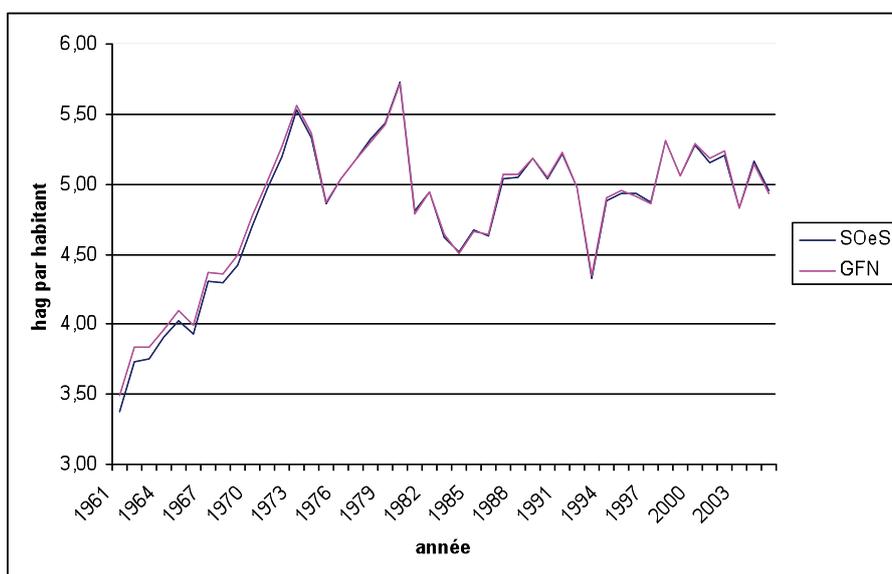
$$EF = EF_{\text{carbone}} + EF_{\text{cultures}} + EF_{\text{pâturages}} + EF_{\text{forêt}} + EF_{\text{pêche}} + EF_{\text{artificialisation}}$$

Exemple de calcul (2005) :

$$EF = 298\,073\,151 \text{ hag} = 152\,547\,415 \text{ hag} + 77\,218\,118 \text{ hag} + 19\,327\,770 \text{ hag} + 23\,378\,280 \text{ hag} + 10\,259\,441 \text{ hag} + 15\,342\,127 \text{ hag}$$

Les résultats du calcul de l'empreinte écologique (figure 34) à partir des données utilisées par le GFN montrent une bonne correspondance entre les valeurs calculées par le SOeS et celles qui sont publiées par le GFN.

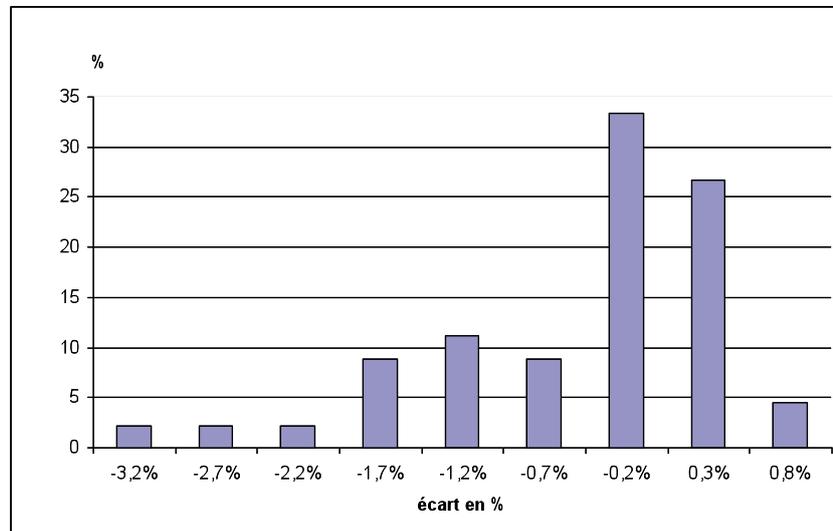
Figure 34 : comparaison de l'évolution de l'empreinte écologique (France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et de ceux du GFN est compris entre -3,2% et +0,5%. L'écart moyen est de -0,5% et l'écart médian de -0,2%.

Figure 35 : distribution des écarts entre l'empreinte
(France : 1961-2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

Sur la période on constate également que cet écart est plus important avant 1975 (écart moyen de -1,5%). La tendance se stabilise après cette période pour varier entre -0,5% et +0,5%.

En étudiant les composantes de cette empreinte, on peut attribuer cet écart essentiellement à la composante *cultures* de l'empreinte écologique.

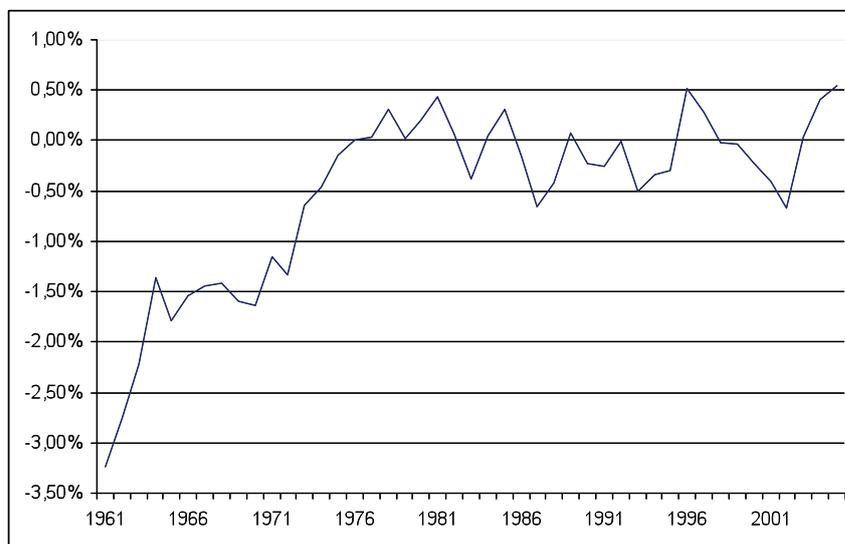
Cette différence dans la valeur de l'empreinte partielle des cultures provient de l'utilisation du facteur de conversion des têtes de bétail en tonnes de viande : les valeurs dans le fichier GFN ne correspondent pas avec celles de la méthode décrite pour les 6 produits d'échanges extérieurs d'animaux vivants.

Exemple en 1978 pour les porcs on constate les écarts suivants :

- 0,0017 t/tête pour les importations, contre 0,095 en valeur théorique annoncée ;
- 0,13 t/tête contre 0,095 en valeur théorique annoncée.

Dans le programme SAS développé par le SOeS, on utilise les coefficients utilisés en 1978.

Figure 36 : évolution des écarts entre l'empreinte
(France : 1961 - 2005)



Source : GFN, traitements SOeS.

11 Bilan de l'exploration (Phase 1)

11.1 Visibilité de phénomènes extérieurs

L'observation détaillée de l'évolution des 6 composantes de l'empreinte écologique révèle des variations surprenantes. Pour l'empreinte partielle du carbone on constate une baisse de 30% entre 1991 et 1993. L'étude des composantes de cette empreinte partielle indique que cette baisse est le résultat d'une chute des émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie pour la production industrielle, associée à une baisse des importations et exportations de produits. Ces résultats sont cohérents avec la situation économique, 1992 étant une année de crise économique sérieuse. On observe ce même phénomène entre 1981 (EF_{carbone}=2,75) et 1984 (EF_{carbone}=1,62), là aussi années de crise économique mondiale.

De la même façon, l'EF_{cultures} passe de 1,63 à 1,20 (- 26 %) entre 2002 et 2003, année de la canicule.

Limite :

Pour confirmer cette impression, il serait intéressant de comparer les grandes crises économiques et les années à la météo inhabituelle et de les comparer avec l'évolution des empreintes de ces années.

11.2 Facteurs d'équivalence

Les facteurs d'équivalence n'interviennent que lors de l'agrégation des différents espaces. Sans l'utilisation de ces facteurs d'équivalence, on obtiendrait une empreinte écologique en hectares ne permettant pas de comparaison entre les différents types de sol. Le rôle de ces facteurs d'équivalence est de créer une surface théorique unique, l'hectare global, par pondération des différents types de sol (terre cultivable, forêt, pâturage,...) en fonction de leur productivité agricole potentielle. De ce fait ils sont identiques pour chaque pays et ils permettent de comparer les différents résultats nationaux.

Limite :

Le fait que les terres artificialisées soient considérées comme des terres agricoles productives est sujet à caution. Ces surfaces ne sont pas utilisées, ni utilisables en tant que terres cultivables à bon rendement agricole, ce qui est l'hypothèse du facteur d'équivalence artificialisation égal au facteur d'équivalence terres cultivables, en l'état ou sans modifications importantes.

Ainsi, il est peu imaginable que Paris, par exemple, soit transformé en champ de blé en une année, ce changement d'utilisation de la surface de Paris nécessiterait de lourds investissements de démolition (déchets à prendre en compte) et de dépollution des sols.

Avantage :

Ce facteur permet de comparer des activités et des utilisations de l'espace peu compatibles ou difficilement comparables. Les productions industrielles sont ainsi facilement représentables par la visualisation de la surface équivalente nécessaire à leur production ou transport...

11.3 Solidité des constantes de conversion

De nombreuses constantes de conversion sont utilisées dans le calcul des empreintes partielles (taux d'extraction, énergie grise (Embodied Energy), Feed Ratio...). Ces constantes servent à transformer des productions de produits secondaires en équivalent en produit primaires (cultures, pâturage), ou encore à transformer des quantités de produits en tonnes de CO₂ (Embodied Energy).

Ces constantes ont des origines parfois bien renseignées (FAO, United Nations). Parfois au contraire, l'origine est soit interne au GFN (énergie grise⁵¹), soit carrément inconnue (taux d'extraction pour les produits de pâturage, feed mix pour l'alimentation du bétail également⁵²).

⁵¹ The values in 'EmbEn' are drawn from a supporting Global Footprint Network database including information collected from a variety of sources. Product Ecology Consultants. 2008. SimaPro.

⁵² Tel quel dans le guidebook : **This data come from....the FAO?**

Il en va de même pour les constantes telles que le taux de séquestration du CO₂ par les océans ou encore le taux de séquestration du carbone par les forêts, etc.

Limite :

L'identification floue de l'origine de certaines constantes ne joue pas en faveur de la transparence du calcul de l'empreinte par GFN. Un travail de validation de chacune de ces constantes portant sur la fiabilité de la source et de l'ordre de grandeur de la constante est nécessaire avant de conclure quant à la robustesse de la méthode.

11.4 Données

Les données utilisées par le GFN sont issues principalement de la FAO pour les productions agricoles, les importations de produits agricoles, de bétail, les produits forestiers) et des Nations unies pour les importations de produits industriels. Les données concernant la consommation d'énergie pour la production ou le chauffage proviennent de l'International Energy Agency. Pour les données concernant l'occupation du sol, les sources sont multiples et hiérarchisées, en privilégiant CORINE Land Cover dès que possible. Ces origines, bien qu'officielles et sérieuses, posent parfois quelques problèmes.

Données commerce international des Nations Unies

Le niveau de détail est très élevé. On distingue ainsi 625 produits d'importation, selon la nomenclature SITC_Rev1, disponible sur le site des nations unies. Ces produits sont ensuite transformés en tonne de CO₂ liée à leur transport grâce à la constante énergie grise dont l'origine n'est pas clairement identifiée par le GFN. Cette énergie grise est disponible pour chaque produit dans la même nomenclature SITC_Rev1.

Cette méthode est cohérente et robuste, mais elle oblige à utiliser des données utilisant cette nomenclature.

Le problème de l'utilisation de cette nomenclature SITC_Rev1 est l'ancienneté de cette nomenclature, elle date de 1961 et les correspondances avec les nomenclatures actuelles (SITC_Rev4, SHNC) ne sont pas facilement disponibles. Pour une utilisation des données de flux de matière autres que celles des Nations unies, il faudra d'abord soit trouver une correspondance avec cette SITC_Rev1 pour pouvoir appliquer les énergies grises, soit trouver des énergies grises dans la nomenclature des données.

Ceci peut constituer un frein très fort pour le calcul alternatif d'une empreinte partielle du carbone (poste principal de l'empreinte écologique).

Données de production agricole de la FAO

De la même façon, les données agricoles issues de la FAO sont apparemment fiables, mais la nomenclature utilisée⁵³ également n'est pas identifiée⁵⁴.

Comme dans le cas du carbone, l'obtention des taux d'extraction dans une nomenclature plus accessible est nécessaire pour calculer une empreinte alternative des cultures.

Données d'occupation du sol Corine Land Cover

Le GFN utilise les données de Corine Land Cover pour appréhender l'occupation des sols. Ces données sont fiables elles aussi, mais elles ne sont disponibles que pour 1990, 2000 et 2006. Les données CLC antérieures et postérieures aux années de disponibilité des données CLC sont obtenues en divisant la surface CLC par la population de l'année de publication de CLC (ce qui donne une occupation par personne), cette information étant ensuite multipliée par la population de l'année d'étude.

$$CLC_{année} = \frac{CLC_{2000}}{population_{2000}} \times population_{année}$$

⁵³ Donc les constantes de conversion associées.

⁵⁴ Il semblerait qu'elle corresponde à la nomenclature Annexe I du traité de la CE mais ceci est à confirmer.

Cette méthode est discutable, car elle suppose que l'augmentation de population se traduit par une augmentation proportionnelle de l'occupation du sol. Or l'élasticité de la consommation d'espace aux variations de la population dépend du type de zone considéré : pôle urbain, couronne périurbaine, urbain multi polarisé, pôle rural, couronne d'un pôle rural ou encore rural isolé (nomenclature Zauer de l'Insee).

11.5 Niveau de détail du calcul

Les données utilisées sont parfois extrêmement détaillées ; c'est le cas pour les flux commerciaux (625 produits), l'agriculture (550 produits), la pêche (plus de 1300 produits).

Elles sont au contraire parfois très détaillées : seulement 6 secteurs pour les émissions de CO₂ provenant de la combustion d'énergie fossile.

Or ce niveau de détail ne reflète pas le poids plus ou moins important de l'empreinte partielle associée. Ainsi l'énergie fossile (6 postes) représente 40% de l'empreinte totale, alors que la nomenclature de la pêche est très détaillée pour une contribution de seulement 5%.

Il apparaît intéressant de réfléchir au niveau de détail qu'il est souhaitable de retenir.

Est-il pertinent de distinguer les importations de pieuvres vivantes des importations de pieuvres congelées, alors que l'énergie consommée par les industries manufacturières est déclinée en seulement 35 sous catégories ?

11.6 Cas particulier de l'empreinte du carbone

Une question apparaît lorsque l'on compare le calcul de l'empreinte partielle du carbone avec les autres empreintes partielles : ces empreintes sont-elles cumulables ?

L'empreinte partielle du carbone détermine la surface nécessaire à l'absorption des émissions de CO₂ générées par les activités humaines, alors que les empreintes des cultures ou de la forêt tiennent compte des surfaces nécessaires à la production des ressources renouvelables (céréales, bois de chauffage, poisson...). On compare ainsi des surfaces effectivement utilisées pour répondre par exemple aux besoins en céréales de la France à des émissions converties en surfaces utilisées pour leur absorption.

12 Conclusions de la phase 1

Une série de questions précises va être envoyée au GFN afin d'éclaircir les raisons de l'utilisation d'un taux de séquestration du carbone par la forêt inférieur à celui du GIEC, ou encore obtenir plus d'informations sur la méthodologie utilisée pour déterminer l'énergie grise.

L'identification et la collecte de sources alternatives de données et de constantes permettant des calculs alternatifs d'empreinte vont être la priorité de la phase 2.

Dans cette perspective on étudiera la faisabilité de l'introduction de la notion de rendement agricole soutenable et son influence sur l'empreinte partielle des cultures.

Dans la même optique, les données des douanes sur les flux de matières seront utilisées pour estimer les flux commerciaux utilisés dans l'empreinte partielle du carbone.

On soumettra également le calcul de l'empreinte à des hypothèses de réduction des gaz à effet de serre par exemple.

SECONDE PARTIE :

Hypothèses alternatives

Quelques remarques préalables

Ce travail présente les résultats de la seconde phase du travail au sein du SOeS sur l'empreinte écologique. Il s'agit ici, après avoir analysé le mode de calcul de l'empreinte du GFN, d'étudier l'influence d'hypothèses alternatives sur les résultats.

Ces hypothèses alternatives seront sont les suivantes :

- influence de l'utilisation d'une autre source de données pour les flux commerciaux sur le résultat de l'empreinte de l'énergie ;
- influence de l'utilisation d'une autre source de données pour les productions agricoles de produit primaires françaises ;
- influence de la valeur du taux de séquestration du CO₂ par les forêts ;
- influence de l'application d'une politique publique de réduction des émissions de CO₂ sur l'empreinte de l'énergie ;
- influence de l'introduction d'une notion de rendement agricole « soutenable » sur la biocapacité des cultures.

13 Influence de l'utilisation des données des douanes sur l'empreinte partielle du carbone

L'empreinte partielle du carbone est le résultat de l'agrégation d'une empreinte utilisant les émissions de CO₂ des activités productives du pays et d'une empreinte estimant les émissions de CO₂ induites par les flux commerciaux de produits manufacturés (émissions de CO₂ provenant de la fabrication et du transport de ces marchandises).

La formule se résume à cette l'expression suivante :

$$EF_{\text{carbone}} = EF_{\text{émissions CO}_2} + EF_{\text{import CO}_2} - EF_{\text{export CO}_2}$$

Avec : $EF_{\text{émissions CO}_2} = EF_{\text{consommation énergie fossile}} + EF_{\text{bunker fuel}}$

13.1 Principe du calcul

Dans ce calcul alternatif, l'empreinte de la consommation d'énergie fossile n'est pas modifiée, on conserve ainsi les données sur les émissions de CO₂ émises par les activités productives tous secteurs confondus (voir *rapport technique phase 1*).

L'empreinte écologique des importations et exportations de CO₂ est en fait une transformation des flux commerciaux de produits manufacturés (en tonne) en équivalent CO₂ grâce à un facteur de conversion appelé Energie Grise (Embodied Energy). Ce CO₂ résultant des flux commerciaux est ensuite transformé en gha selon la formule suivante :

$$\begin{aligned} & EF_{\text{import énergie}} \\ & = \\ & CO_2_{\text{import}} \times \text{World Elec Heat Carbon Intensity} \times \text{Gigajoule to terrawatt} \\ & \quad \times \\ & \quad \text{Intensité Carbone} \end{aligned}$$

L'obtention des émissions de CO₂ équivalentes dues aux flux de matières résulte du produit des flux commerciaux (en tonne) et de l'énergie grise.

$$CO_{2\text{import}} = \text{Flux Commerciaux} \times \text{Energie Grise}$$

Les données utilisées par le GFN sont les données des Nations unies⁵⁵. Ces flux concernent 625 produits référencés selon la nomenclature SITC_Rev1. Un facteur de conversion, appelé énergie grise, est associé à ces 625 produits, facteur permettant de passer de tonnes de produit en tonne de CO₂ nécessaires à leur fabrication et leur transport. Cette énergie grise est logiquement disponible dans la même nomenclature SITC_Rev1.

13.2 Spécificités de l'utilisation des données des douanes

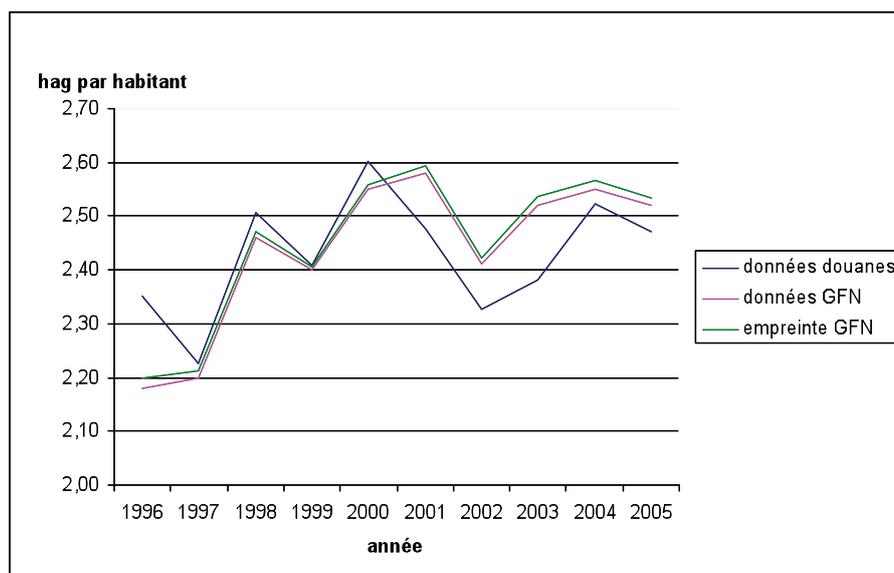
Nous disposons au SOeS des données sur les flux de matière des douanes françaises. Les données utilisées ne concernent que la période 1996-2005.

Un problème se pose pour la reproductibilité alternative d'un calcul de l'empreinte, la nomenclature de ces données est le SHNC_6 (système harmonisé, nomenclature combinée en 6 positions) regroupant quelques 5700 postes, nomenclature différente de celle des données utilisées par le GFN (SITC_Rev1). Un travail préalable consiste à transformer les données des douanes dans la nomenclature SITC_Rev1 de façon à pouvoir appliquer les coefficients multiplicateurs de l'énergie grise.

13.3 Résultats

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

Figure 37 : comparaison de l'évolution de l'empreinte partielle du carbone selon la source des données entre 1996 et 2005



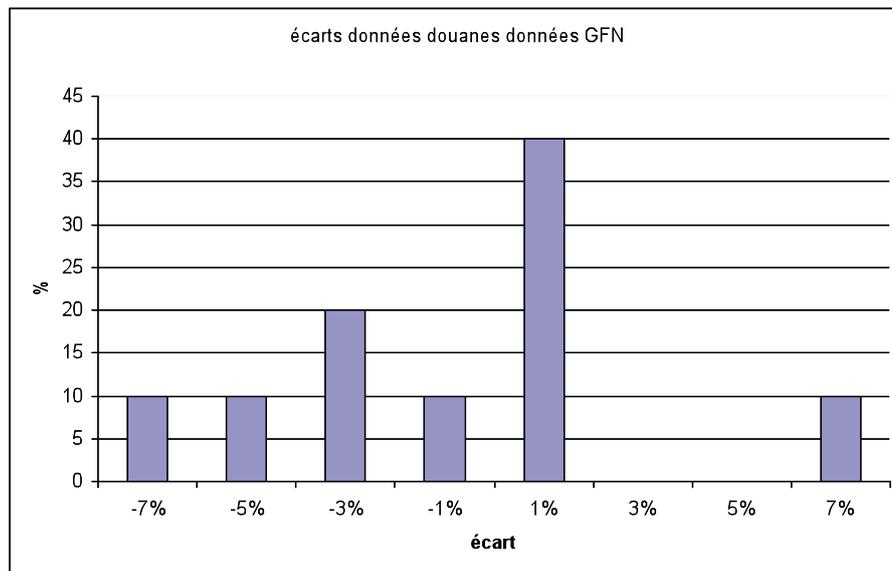
Source : GFN, Douanes ; traitements SOeS.

On constate que les évolutions sont comparables (tendances identiques) mais avec des écarts qui sont relativement importants selon les années.

L'écart entre les valeurs issues des calculs du SOeS et celles du GFN varie entre - 7 % et + 7%. L'écart moyen est de -0,8 % avec un écart médian de -0,8%.

⁵⁵ UN (United Nations) Comtrade 2007a. United Nations Commodity Trade Statistics Database
<http://comtrade.un.org/>

Figure 38: distribution des écarts entre l'empreinte entre 1996 et 2005



Source : GFN, Douanes ; traitements SOeS.

En conclusion

Les résultats obtenus avec les données des douanes sont comparable à ceux du GFN dans les tendances d'évolution de l'empreinte du carbone. Les écarts en valeur de l'empreinte partielle du carbone ainsi obtenue varient entre -7 % et +7 % ce qui n'est pas négligeable, mais l'étude de la distribution de ces écarts montre qu'ils sont dans 50% des cas compris entre -1% et +1 %. On note toutefois que l'empreinte calculée à partir des données des douanes est systématiquement inférieure à celle du GFN après 2001, tendance à confirmer pour les prochaines années.

14 Influence de l'utilisation d'autres données agricoles sur l'empreinte partielle des cultures

L'empreinte partielle liée aux cultures est le résultat de l'agrégation d'une empreinte tenant compte de la production de produits agricoles du pays et d'une empreinte des flux commerciaux de produits agricoles.

La formule se résume à l'expression suivante où EF signifie Ecological Footprint:

$$EF_{Cultures} = EF_{Production\ agri} + EF_{Import\ agri} - EF_{Export\ agri}$$

14.1 Principe du calcul

Les données utilisées par le GFN pour calculer l'empreinte partielles des cultures proviennent de la Food and Agriculture Organization⁵⁶ (FAO).

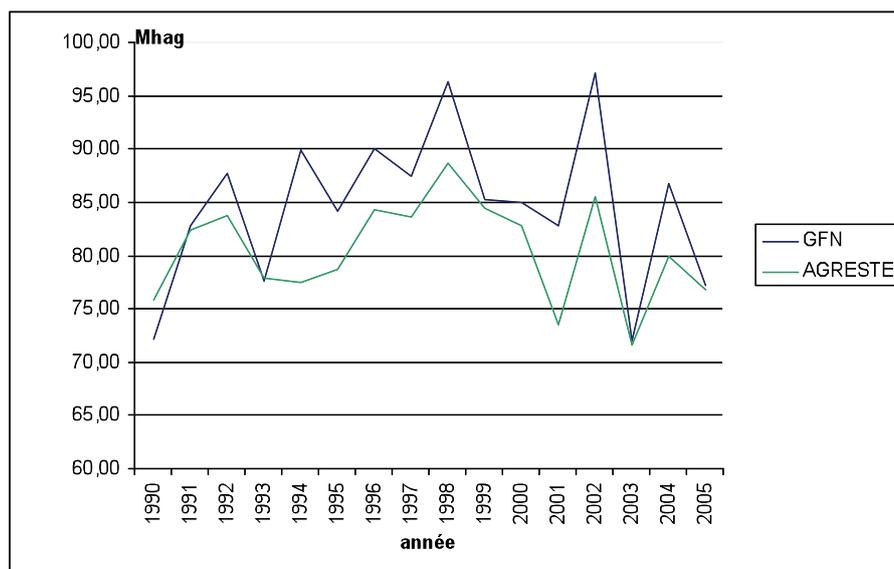
Nous disposons au SOeS de données sur la production agricole, concernant la période 1990-2005. Ces données proviennent de l'Agreste⁵⁷.

Un problème se pose pour la reproductibilité alternative d'un calcul de l'empreinte, les nomenclatures des données utilisées par le GFN et des données de l'Agreste ne correspondent pas. Une première étape du travail consiste à identifier code à code les produits agricoles primaires des deux sources.

14.2 Résultats

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

Figure 39 : comparaison de l'évolution de l'empreinte partielle de la production agricole selon la source des données entre 1990 et 2005



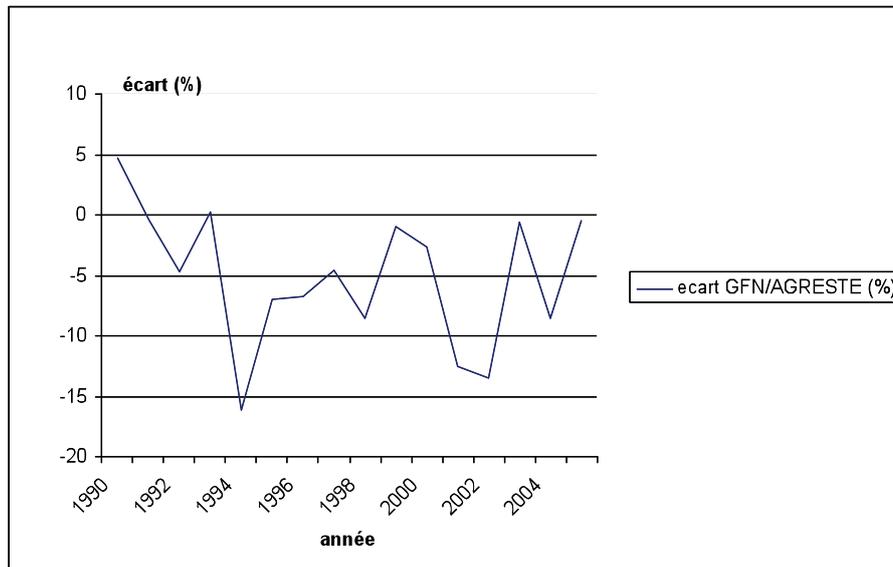
Source : GFN, Agreste ; traitements SOeS.

Les résultats obtenus avec les données de l'AGRESTE sont majoritairement inférieurs à ceux du GFN. Cette différence provient probablement d'un problème de réaffectation des postes entre les 2 nomenclatures. On constate également une forte instabilité des écarts, avec des valeurs allant de +5% à -14% selon les années. Cette comparaison avec une source de données alternative n'est pas probante.

⁵⁶ Les données de production agricole proviennent de la FAO et concernent 178 produits primaires disponibles sur le site <http://faostat.fao.org/site/526/default.aspx>.

⁵⁷ Service statistique du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Figure 40 : écarts entre les empreintes partielles de la production agricole entre 1990 et 2005



Source : GFN, Agreste ; traitements SOEs.

15 Influence de la valeur du ratio de séquestration du carbone

Dans le calcul de l'empreinte partiel du carbone, le facteur de rendement est le rapport entre le facteur de séquestration du carbone, calculé à partir du taux de séquestration potentiel de la forêt⁵⁸, et la constante C to CO₂.

$$Rdt_{facteur} = \frac{\text{Facteur Séquestration carbone}}{C \text{ to } CO_2}$$

Facteur de séquestration du carbone : cette donnée est fournie par le rapport de l'IPCC⁵⁹ de 2006⁶⁰, disponible sur le site <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, sa valeur est de 0,97 tonne de carbone par hectare par an :

C to CO₂ est le rapport des poids atomiques de C et O dans CO₂ soit 0,273 (Masse atomique de C=12,011 u ; masse atomique de O=15,999 u)

$$\text{On a : } Rdt_{facteur} = \frac{0,97}{0,27} = 3,59$$

15.1 Principe du calcul

Lors de la phase de reproduction des calculs, on a constaté que la valeur utilisée dans le fichier de calcul du GFN est inférieure à la valeur du ratio de séquestration du CO₂ publiée par le GIEC⁶¹.

⁵⁸ The 'Carbon Sequestration Factor' estimates the annual carbon sequestration of a hectare of world average bioproductive land. This factor is based on the sequestration potential of world average forest. This factor is calculated by supporting Global Footprint Network workbooks, which are available upon request.

⁵⁹ IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (créé par la World Meteorological Organization (WMO) et l'United Nations Environment Programme (UNEP)).

⁶⁰ 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture Forestry and Other Land Use. IPCC, Geneva.

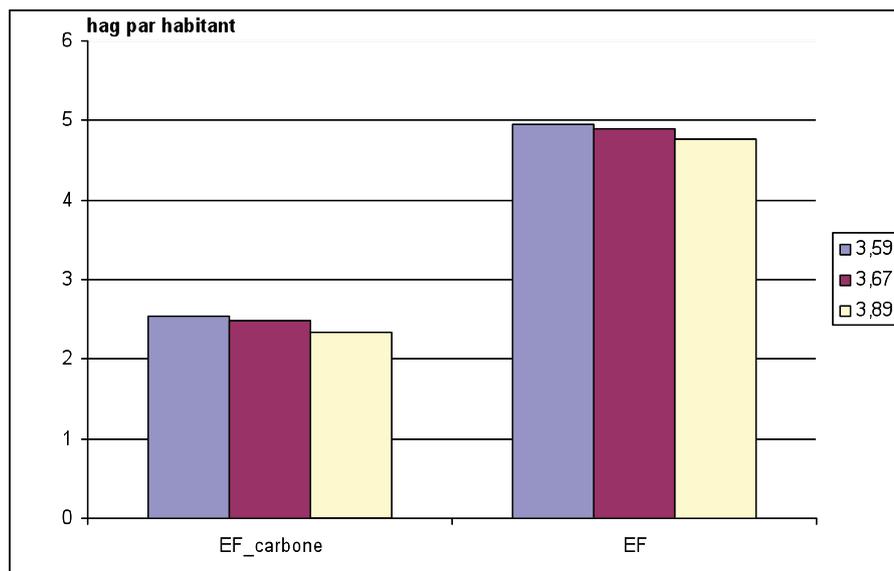
⁶¹ Voir p17 de ce rapport

Du fait de la part prédominante de l'empreinte du carbone sur l'empreinte totale, le travail effectué par le SOeS a été d'étudier l'influence de la valeur de ce ratio de séquestration sur la valeur de l'empreinte partielle du carbone ainsi que sur l'empreinte totale.

15.2 Résultats

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

Figure 41: empreinte partielle du carbone et empreinte totale selon la valeur du taux de séquestration du CO₂

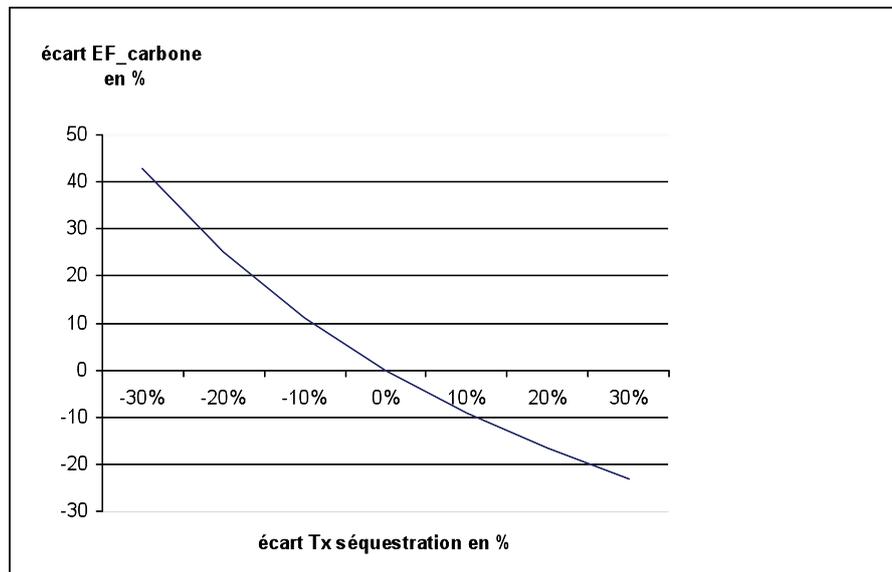


Source : GFN, traitements SOeS.

La valeur du taux de séquestration utilisée n'est pas sans conséquence sur l'empreinte. Ainsi l'utilisation du taux de 3,89 tonnes de CO₂/Ha préconisé par le GIEC au lieu des 3,59 utilisés par le GFN, entraîne une réduction de l'empreinte de la France de 0,2 hag par habitant (4,76 hag/habitant contre 4,96 hag/habitant).

De plus l'influence de la valeur de ce taux de séquestration n'est pas linéaire, on a ainsi une majoration de l'empreinte partielle du carbone de +45% pour une réduction de seulement -30% de la valeur de ce taux de séquestration alors qu'une réduction de -10% n'entraîne une majoration de seulement +11%.

Figure 42 : influence de la valeur du taux de séquestration du carbone sur l'empreinte



Source : GFN, traitements SOeS.

16 Influence d'une réduction des émissions de GES sur l'empreinte partielle du carbone

L'empreinte partielle du carbone est le résultat de l'agrégation d'une empreinte utilisant les émissions de CO₂ des activités productives du pays et d'une empreinte estimant les émissions de CO₂ induites par les flux commerciaux de produits manufacturés (émissions de CO₂ provenant de la fabrication et du transport de ces marchandises).

La formule se résume à cette l'expression suivante :

$$EF_{\text{carbone}} = EF_{\text{émissions CO}_2} + EF_{\text{import CO}_2} - EF_{\text{export CO}_2}$$

Avec : $EF_{\text{émissions CO}_2} = EF_{\text{consommation énergie fossile}} + EF_{\text{bunker fuel}}$

16.1 Principe du calcul

On applique les objectifs de réduction de 25% des émissions de gaz à effet de serre⁶² et on applique aussi un objectif de réduction par 4 des émissions de GES. En ce qui concerne l'empreinte écologique, cela revient à réduire les émissions de CO₂ des activités productives de 25 et de 75%.

⁶² Engagement de l'UE à 27

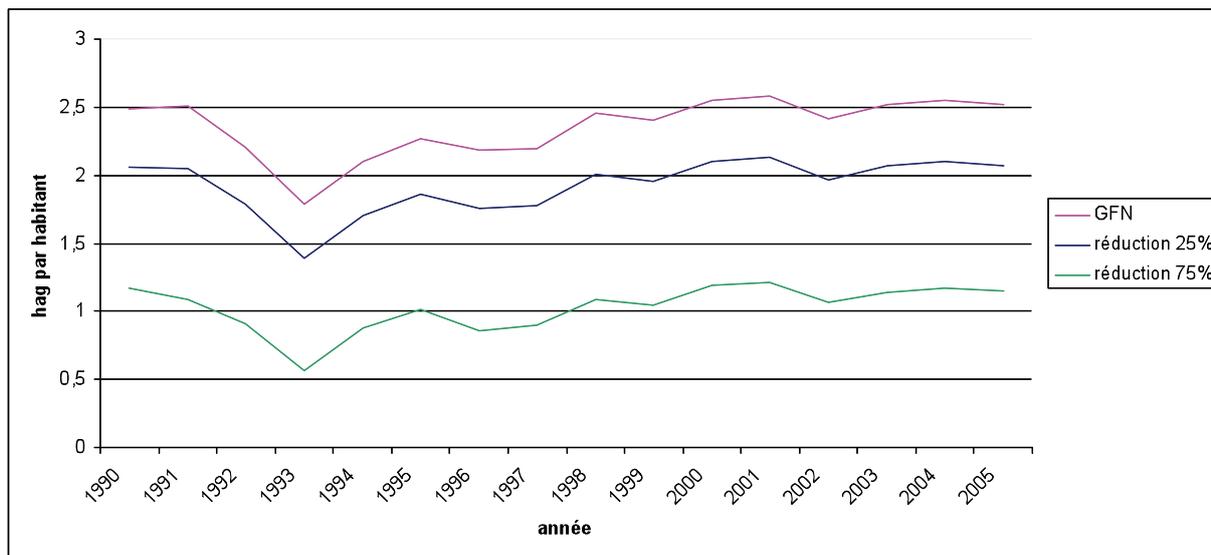
$$EF_{\text{consommation énergie fossile}} = \text{Energie consommée} \times (1 - Tx_{\text{séquestration océans}}) \times \frac{Eq_{\text{facteur}}}{Rdt_{\text{facteur}}}$$

Dans ce calcul alternatif, les autres postes ne sont pas modifiés, on conserve ainsi les valeurs de l'énergie grise utilisées par le GFN (voir chapitre 4.2.1.2).

16.2 Résultats

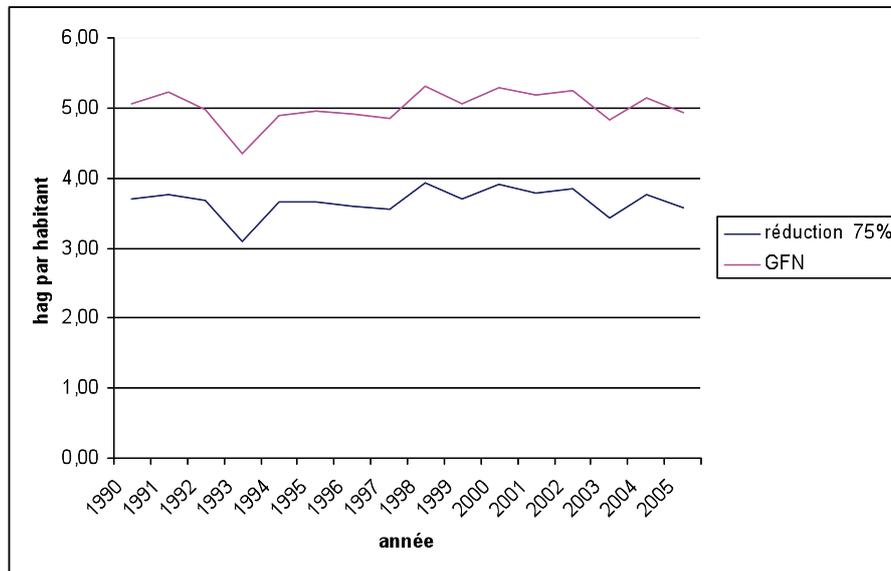
La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

Figure 43 : influence d'une réduction des émissions de CO₂ sur l'empreinte partielle du carbone entre 1990 et 2005



Source : GFN, traitements SOeS.

On constate que la réduction de 25% des émissions de CO₂ entraîne une réduction de l'empreinte partielle du carbone d'environ 0,5 gha par habitant, soit une réduction finale de l'empreinte de seulement 10% (4,50 hag/habitant contre 4,93 hag/habitant).

Figure 44 : influence d'une réduction de 75% des émissions de CO₂ sur l'empreinte écologique entre 1990 et 2005

Source : GFN, traitements SOeS.

De la même façon, la figure 44 montre que l'application de l'objectif de réduction par 4 des émissions de CO₂ entraîne une réduction de 35 % à 40 % de l'empreinte totale.

Ce résultat est à affiner. En effet, ce calcul ne considère qu'une réduction du CO₂ émis par les activités productives de la France, les valeurs de l'énergie grise étant identiques à celles actuellement utilisées (la méthodologie de calcul de cette énergie grise n'étant pour le moment pas connue, il est difficile de connaître la part de CO₂ qu'ils contiennent).

17 Influence de l'introduction de la notion de rendement agricole « soutenable » sur la biocapacité des cultures

La biocapacité des cultures est calculée selon la formule suivante, onglet "Yf_crop" du fichier GFN :

$$BC_{\text{cultures}} = \text{surface cultivable}_N \times \frac{\text{Surface fictive cultivée}_W}{\text{Surface cultivée}_N} \times Eq_{\text{facteur}}$$

17.1 Principe du calcul : notion de rendement agricole « soutenable »

Une proposition, est de tester l'effet de l'introduction du rendement des cultures en agriculture biologique (d'où un calcul de empreintes = production/ (rdt bio)). En effet l'agriculture biologique est la seule référence mondiale de soutenabilité globalement admise. L'agriculture bio est relativement bien codifiée et encadrée juridiquement, pas seulement pour la communauté européenne. D'autre part, cette forme d'agriculture fait partie des recommandations internationales (FAO, et rapports internationaux de l'IAASTD⁶³ - Johannesburg 2008⁶⁴). Une raison supplémentaire d'utiliser l'agriculture biologique est le fait que lorsque l'on travaille sur la monétarisation des impacts environnementaux, on prend cette référence.

En ce qui concerne les données statistiques disponibles l'IFOAM⁶⁵ dispose de statistiques communément admises. A un niveau français, plus officiellement, l'Agence bio⁶⁶ dispose d'éléments.

⁶³ International Assessment of Agricultural Science and technology development

⁶⁴ <http://www.greenpeace.org/raw/content/belgium/fr/press/reports/iaastd-summary-fr.pdf>

⁶⁵ International Federation of Organic Agriculture Movements <http://www.ifoam.org/>

Devant l'absence de statistiques complètes sur ce sujet, le travail effectué par le SOeS consiste à étudier l'influence d'une baisse de rendement de 15% et de 30% (fourchette haute de la réduction de rendement résultant d'un passage à l'agriculture biologique) sur la valeur de la biocapacité des cultures.

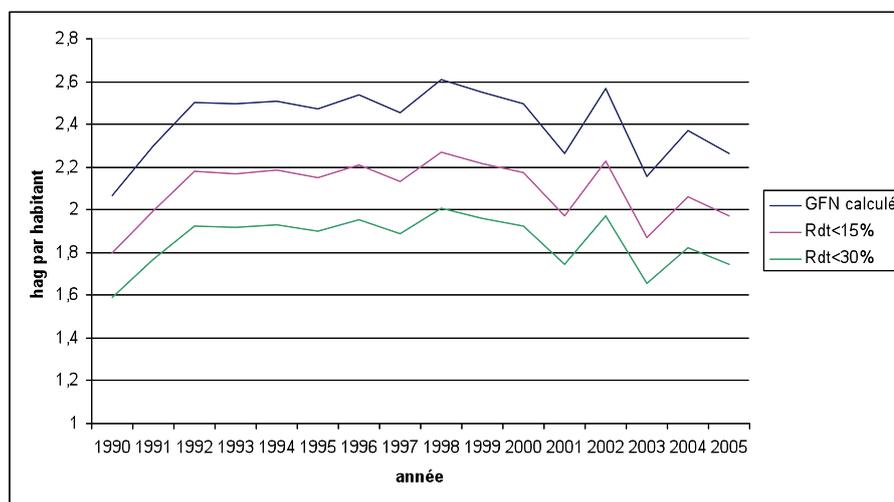
Dans la formule de la biocapacité des cultures, la surface cultivable_N ne change pas, ni la surface cultivée_N, la baisse de rendement national n'ayant une influence que sur la surface fictive cultivée mondiale.

$$\text{surface fictive cultivée}_{\text{mondiale}} = \frac{Rdt_{\text{national}}}{Rdt_{\text{mondial}}} \times \text{surface cultivée}_{\text{nationale}}$$

17.2 Résultats

La figure suivante présente les résultats obtenus grâce au programme SAS de calcul de l'empreinte.

Figure 45 : influence d'une réduction de 15% et de 30% des rendements agricoles sur la biocapacité des cultures entre 1990 et 2005



Source : GFN, traitements SOeS.

On constate une réduction de la biocapacité des cultures, de 13% lorsque la réduction de rendement est de 15% et de 23% pour une réduction de rendement de 30%.

L'hypothèse d'une réduction globale des rendements par un passage à une agriculture biologique se traduit par une diminution de la biocapacité des cultures. Néanmoins il convient de nuancer cette conclusion. En effet dans ce calcul alternatif, le passage à une agriculture biologique se traduit par la seule baisse des rendements agricoles, sans prise en compte des effets induits par une telle modification des pratiques agricoles, diminution de la production, des importations et exportations d'engrais⁶⁷, mise en concurrence des terres cultivables avec les pâturages... Il est fort compliqué de par la méthodologie de l'empreinte de déterminer simplement tous les postes impactés par une telle modification des pratiques agricoles.

⁶⁶ <http://www.agence-bio.org/>

⁶⁷ En 2005, les importations d'engrais représentent, en masse, 2,5% des importations de biens, les exportations 0,5%.

18 Conclusions de la phase 2

La phase 2 du test a permis d'évaluer l'influence de jeux de données ou d'hypothèses alternatifs sur la valeur de l'empreinte écologique. Elle a également donné lieu à un exercice de simulation portant sur un changement radical de production agricole.

Les conclusions de cette seconde phase sont riches d'enseignement :

- le calcul de l'empreinte partielle du carbone à partir des données des douanes est correctement reproductible, à la condition d'établir une table de correspondance entre nomenclatures ;
- la nomenclature utilisée par le GFN pour la production de produits agricoles n'a pas pu être clairement identifiée, malgré les demandes de précision formulées par le SOeS ; en conséquence, faute d'avoir pu établir une correspondance satisfaisante avec la nomenclature d'Agreste, le test est resté trop imprécis pour fournir des résultats interprétables ;
- la valeur du taux de séquestration du CO₂ par la forêt utilisé par le GFN est différente de celle préconisée par le GIEC. Cette différence induit un écart de 0,2 hectares globaux en termes d'empreinte. Cette influence des constantes de conversion renforce la nécessité de clarifier la méthodologie d'obtention de l'énergie grise. Elle justifie également d'obtenir davantage de précisions concernant les taux d'extraction utilisés pour les produits secondaires ;
- l'impact d'une réduction des émissions de CO₂ et le passage à une agriculture biologique ont été testés « toutes choses égales par ailleurs ». L'exercice révèle les limites, voire les dangers d'une approche purement mécanique. Pour autant, le mode de calcul de l'empreinte n'est pas propice à une modélisation des effets induits par une mesure de politique économique ou environnementale spécifique.

Commissariat général au développement durable

Service de l'observation et des statistiques

Tour Voltaire

92055 La Défense cedex

Tél. : 01 40 81 13 15 – Fax : 01 40 81 13 30

Courriel : cgdd-soes-orleans@developpement-durable.gouv.fr

Achévé d'imprimer en janvier 2010.

Impression : Imprimerie Nouvelle, utilisant du papier issu de forêts durablement gérées. Certifiée Imprim'vert qui contribue à la protection de l'environnement.

45800 Saint-Jean-de-Braye

N 422175B

Dépôt légal : janvier 2010

ISSN : 2102-4723

ISBN : 978-2-911089-98-5

Retrouver cette publication sur le site :

<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

Conditions générales d'utilisation

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille — 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1^{er} juillet 1992 — art. L.122-4 et L.122-5 et Code pénal art. 425).

Une expertise de l’empreinte écologique

Le concept d’empreinte écologique, élaboré au début des années 90, correspond à la superficie nécessaire pour fournir les ressources consommées et assimiler les rejets d’une population donnée.

L’expertise conduite par le Commissariat général au développement durable – Service de l’observation et des statistiques (CGDD-SOeS) du ministère vise à fournir des éléments permettant de retenir ou au contraire d’écarter le recours à l’empreinte écologique sur la base de critères scientifiques.

Avec l’appui d’un comité de suivi, le SOeS a notamment procédé au chiffrage standard de l’empreinte, à partir des algorithmes de calculs et des données fournies par le *Global Footprint Network* (GFN). Il s’agissait d’apprécier la robustesse méthodologique de l’empreinte sur la base de critères d’évaluation internationaux. À cette fin, le SOeS s’est attaché à identifier les sources de données et les constantes de conversion utilisées par le GFN, puis à analyser la chaîne de calculs pour enfin comparer les résultats.

Parallèlement, le SOeS a réalisé une brève analyse statistique permettant de situer l’empreinte écologique à l’échelle européenne vis-à-vis d’autres indicateurs.

Les conclusions de cette étude sont livrées dans ce numéro 16 de la collection Études & documents.

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l’avenir**

© SOeS, 2010
Dépôt légal : janvier 2010
ISSN : 2102-4723
ISBN : 978-2-911089-98-5