

Evaluation comparée de méthodes de contrôle et de décision en matière de développement durable

élaboré par

F. Carlevaro, M. Garbely, S. Genoud, GUEPE

de la part de

l'office fédéral de l'énergie

juillet 2002

Impressum

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen des Bundesamtes für Energie;
www.ewg-bfe.ch

Auftragnehmer:

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE), Université de Genève

Autoren:

Fabrizio Carlevaro

Myriam Garbely

Stéphane Genoud

Begleitgruppe:

R. Meier, Programmleiter Energiewirtschaftliche Grundlagen

D. Altwegg, Bundesamt für Statistik

U. Brodmann, Faktor Consulting + Management

P. Eichenberger, Entec, St. Gallen, Vertretung Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit

F. Gubler, Ecoplan

N. Perritaz, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

U. Seewer, Bundesamt für Raumentwicklung

D. Spreng, Centre for Energy Policy and Economics CEPE, ETH Zürich

F. Walter, Ecoplan

F. Andrist, Bundesamt für Energie

M. Beck, Bundesamt für Energie

2002

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Energiewirtschaftliche Grundlagen“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

Vertrieb: BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern, www.bbl.admin.ch/bundespublikationen

BBL, Vertrieb Publikationen, Bestellnummer: 805.046.1d

Évaluation comparée de méthodes de contrôle et de décision en matière de développement durable

Mandat du Programme de recherches
« Fondements de l'économie énergétique »
de l'Office fédéral de l'énergie

Rapport final du projet OFEN No. 78207

CONCEPTION D'UNE PROCEDURE D'AIDE A LA
DECISION EN MATIERE DE POLITIQUE ENERGETIQUE
BASEE SUR DES CRITERES ET DES INDICATEURS
DE DEVELOPPEMENT DURABLE

Mai 2002

Fabrizio CARLEVARO, Myriam GARBELY et Stéphane GENOUD

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)
Université de Genève

Table des matières

L'essentiel en bref	5
Das Wichtigste in Kürze	7
Avant-propos	9
1 Représentation du développement durable par des indicateurs	11
1.1 La notion de développement durable	11
1.2 Cadres conceptuels de définition d'indicateurs de développement durable	12
1.3 Place de l'énergie dans le développement durable	15
2 Monitoring du développement durable	19
2.1 Les indices composites d'indicateurs	19
2.2 L'agrégation statistique d'indicateurs	25
2.3 Le benchmarking	27
2.4 Les méthodes multicritères	32
3 Applications	37
3.1 Calcul d'un indice composite de développement durable pour le chauffage résidentiel	37
3.2 Analyse statistique des possibilités d'agrégation des indicateurs énergétiques de l'Agence internationale de l'énergie	40
3.3 Analyse de l'efficacité environnementale d'un ensemble de pays par la méthode DEA	49
3.4 Analyse de l'efficacité environnementale d'un ensemble de pays par la méthode ELECTRE	52
Bibliographie	59
Annexes	61
A1 Test de Spearman	61
A2 Données de l'Agence Internationale de l'Énergie	62
A3 Données du Programme des Nations Unies pour le Développement	65

L'essentiel en bref

En tant que signataire de l'Agenda 21, la Suisse s'est engagée en 1992 à concevoir et à mettre en œuvre une politique de développement durable tant au plan national qu'international. Ce même Agenda appelle un contrôle des résultats de cette politique par un système d'indicateurs permettant le suivi du développement durable mais aussi une prise de conscience de ses exigences et de ses implications.

S'appuyant sur le cadre méthodologique développé par la Commission du développement durable des Nations Unies et l'information statistique existante, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage et l'Office fédéral de la statistique ont jeté récemment les bases d'un tel système d'indicateurs pour la Suisse. Cette première proposition appelait des approfondissements dans toutes les dimensions essentielles du développement durable et, notamment, dans sa dimension énergétique.

Réalisée dans le cadre d'un projet de l'Office fédéral de l'énergie consacré à la « Durabilité : critères et indicateurs pour le domaine énergétique », notre étude se veut une contribution à un tel approfondissement. Conscients du défi méthodologique que pose la synthèse de l'information fournie par un système multidimensionnel d'indicateurs pour dégager une vision compréhensive de l'état et de l'évolution d'un pays, nous nous sommes attachés à comparer et à expérimenter quatre démarches générales de monitoring du développement durable dans le domaine énergétique.

La première repose sur le calcul d'**indices composites** qui agrègent l'information contenue dans plusieurs indicateurs afin de mesurer l'évolution d'une dimension importante du développement durable qui échappe à toute observation unidimensionnelle directe. Cette démarche est illustrée par la présentation du calcul d'un indice composite de développement durable pour le chauffage résidentiel. Il s'agit d'une moyenne pondérée des indicateurs de développement durable des différents systèmes de chauffage utilisés exprimant, d'une part, le rendement énergétique du système de chauffage si celui-ci est alimenté par une énergie primaire non renouvelable et, d'autre part, la durabilité du système de chauffage lorsqu'il utilise une source d'énergie primaire renouvelable.

La deuxième approche vise aussi, en définitive, le calcul d'indices composites d'indicateurs mais elle diffère de la première par le fait qu'elle justifie l'agrégation d'indicateurs sur une base statistique, à savoir par la similitude de leur évolution spatiale ou temporelle. Cette démarche utilise les **méthodes de réduction de dimension**, développées en analyse statistique des données, pour partager un système d'indicateurs en groupes d'indicateurs pouvant faire l'objet d'une agrégation en raison de la similitude de leur évolution statistique. Nous appliquons cette démarche aux indicateurs d'usage et d'efficacité de l'énergie élaborés par l'Agence internationale de l'énergie pour quatre pays. Cette application se limite à

détecter les indicateurs susceptibles d'un regroupement en raison d'une évolution temporelle semblable sans toutefois proposer un indice composite particulier en vue de leur agrégation.

La troisième approche applique les **méthodes de mesure de l'efficacité productive** des économistes à la comparaison de la performance entre pays en matière de développement durable. L'une de ces méthodes, l'analyse par enveloppement des données ou méthode DEA, est expérimentée avec un ensemble d'indicateurs extraits de la base de données utilisée par le Rapport mondial sur le développement humain du Programme des Nations Unies pour le développement, pour réaliser un benchmarking de la performance environnementale de plusieurs pays.

La quatrième approche utilise, dans le même but de comparaison des performances en matière de développement durable, les **méthodes multicritères d'aide à la décision**. Quoique conçues pour aider le décideur à affiner son processus de décision en examinant la cohérence et la logique de ses préférences, ces méthodes s'avèrent aussi pertinentes en analyse comparative, pour établir un classement d'entités selon leurs capacités à réaliser des missions complexes pouvant présenter des aspects contradictoires. Nous illustrons l'utilisation de cette méthodologie par une application de la méthode multicritère Electre IV à la comparaison des performances environnementales des mêmes pays et sur la base des mêmes indicateurs analysés par l'approche précédente.

Pour conclure, les résultats de ces deux approches sont comparés afin de mettre en évidence leur portée et leurs limites. Il apparaît que les deux méthodes de benchmarking utilisées conduisent à des classements très proches et qu'elles présentent un ensemble de propriétés communes qui les rendent attractives pour un monitoring du développement durable basé sur des ensembles d'indicateurs hétérogènes.

Das Wichtigste in Kürze

Als Mitunterzeichnerin der Agenda 21 hat sich die Schweiz 1992 verpflichtet, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene eine Politik der nachhaltigen Entwicklung zu verfolgen und umzusetzen. Diese Agenda fordert zur Kontrolle dieser Politik ein Indikatorensystem, das erlaubt, die nachhaltige Entwicklung mitzuverfolgen und zugleich deren Auswirkungen abzuschätzen.

Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft und das Bundesamt für Statistik haben unlängst die Grundlagen eines Indikatorensystems für die Schweiz entworfen. Das stützt sich zum einen auf den methodologischen Rahmen der Kommission der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung, und zum andern auf die bestehenden statistischen Informationen. Der Vorschlag der beiden Bundesämter verlangt eine Vertiefung aller wesentlichen Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung, insbesondere der Dimension Energie.

Unsere Studie, die wir im Auftrag des Bundesamtes für Energie und im Rahmen des Projektes "Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich" realisiert haben, versteht sich als Beitrag zu der oben erwähnten Vertiefung. Die Synthese der Information aus einem Indikatorensystem stellt methodologisch eine grosse Herausforderung dar. Um den Zustand und die Entwicklung eines Landes besser hervorzuheben, haben wir uns darum bemüht, vier allgemeine Ansätze des Monitoring der nachhaltigen Entwicklung im Energiebereich zu vergleichen und zu testen.

Der erste Ansatz beruht auf der Berechnung von **Composite Indexe**, welche die Informationen aus mehreren Indikatoren aggregieren, um den Verlauf einer wichtigen Dimension der nachhaltigen Entwicklung zu messen, die keiner direkten eindimensionalen Beobachtung zugänglich ist. Dieser Ansatz wird durch die Berechnung eines Composite Index der nachhaltigen Entwicklung für die Beheizung von Wohnraum veranschaulicht. Es handelt sich um ein gewichtetes Mittel der Indikatoren der nachhaltigen Entwicklung der verschiedenen angewandten Heizungssysteme. Diese Indikatoren drücken einerseits den exergetischen Ertrag des Heizungssystems aus, wenn dieses durch eine nicht erneuerbare Primärenergie versorgt wird, und andererseits die Nachhaltigkeit des Heizungssystems, wenn es eine erneuerbare primäre Energiequelle verwendet.

Der zweite Ansatz zielt im Prinzip auch auf die Berechnung von Composite Indexe von Indikatoren ab, aber er unterscheidet sich vom ersten dadurch, dass er die Aggregation von Indikatoren auf einer statistischen Grundlage rechtfertigt, nämlich durch die Ähnlichkeit ihrer räumlichen oder zeitlichen Entwicklung. Dieser Ansatz stützt sich auf **Methoden zur Dimensionsreduktion**, die in der statistischen Datenanalyse entwickelt wurden, um ein Indikatorensystem in Indikatorengruppen aufzuteilen. Für vier Länder wenden wir diesen Ansatz auf Energiegebrauchs- und Energieeffizienzindikatoren an, die von der

internationalen Energieagentur erarbeitet wurden. Diese Anwendung beschränkt sich darauf, die auf Grund eines ähnlichen zeitlichen Verlaufs für eine Gruppierung in Frage kommenden Indikatoren aufzuspüren, ohne jedoch einen besonderen Composite Index zu ihrer Aggregation vorzuschlagen.

Der dritte Ansatz wendet die **Methoden zur Messung der produktiven Effizienz** der Ökonomen an zum Leistungsvergleich zwischen Ländern in bezug auf die nachhaltige Entwicklung. Eine dieser Methoden, die Data Envelopment Analysis (DEA) Methode, wird an mehreren Indikatoren aus der Datenbank des „Bericht über die menschliche Entwicklung“ des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen getestet, um ein Benchmarking der Umweltleistung mehrerer Länder zu verwirklichen.

Der vierte Ansatz benutzt zum gleichen Leistungsvergleich mehrerer Länder **Multikriterien-Methoden für Entscheidungsprobleme**. Obschon diese Methoden als Beitrag zur Entscheidungshilfe geschaffen wurden, wobei sie die Kohärenz und die Logik der Präferenzen prüfen, eignen sie sich ebenfalls zur Vergleichsanalyse. Dabei werden Einheiten entsprechend ihrem Vermögen, komplexe Aufträge zu erledigen, die widersprüchliche Aspekte beinhalten können, geordnet. Zum Umweltleistungsvergleich derselben Länder und ausgehend von denselben im vorangehenden Ansatz analysierten Indikatoren, wenden wir die Multikriterien-Methode Electre IV an.

Schliesslich werden die Ergebnisse dieser zwei Ansätze verglichen, um ihre Tragweite und ihre Grenzen hervorzuheben. Es zeigt sich, dass beide angewandten Benchmarking-Methoden zu sehr ähnlichen Ranglisten führen, und dass sie eine Anzahl gemeinsamer Eigenschaften besitzen, die sie für Monitoring der nachhaltigen Entwicklung auf Grund heterogener Indikatoren attraktiv machen.

Avant-propos

Le présent travail s'inscrit dans un projet mis au concours en mai 2000 par la direction du programme de recherches sur les « Fondements de l'économie énergétique de l'Office fédéral de l'énergie » (OFEN) sous le titre : « Durabilité : critères et indicateurs pour le domaine énergétique ».

En réponse aux offres reçues, l'OFEN proposa la réalisation de l'étude à un partenariat formé, d'une part, par les bureaux d'études ECOPLAN et Faktor Consulting + Management AG (ECOPLAN + FC) et, d'autre part, par le Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE) de l'Université de Genève. Au premier partenaire était confié le volet principal de l'étude, portant sur la définition des critères et des indicateurs de durabilité pour le domaine énergétique, tandis que le second était chargé d'un volet complémentaire visant le développement d'une procédure d'aide à la décision en matière politique, s'appuyant sur les résultats du volet principal.

Ce découpage du projet impliquait une subordination du second volet au premier qui aurait retardé considérablement le début des travaux du CUEPE. C'est pourquoi, il fut décidé de réaliser les deux projets en parallèle, avec une coordination entre les deux projets visant à permettre l'intégration des résultats de l'étude d'ECOPLAN + FC à celle du CUEPE dans la phase finale de notre étude. Lors des réunions avec le groupe d'accompagnement des deux projets, il apparût rapidement que l'étude d'ECOPLAN + FC n'aurait pas fourni des indicateurs immédiatement utilisables dans le cadre des méthodes d'analyse quantitative couvertes par notre étude. De ce fait, notre plan de travail initial fut écourté de ce dernier objectif et réorganisé selon les deux étapes suivantes :

Évaluation comparée des méthodes de contrôle et de décision en matière de développement durable ;

Application à des critères et indicateurs existants.

Dans la première étape on a passé en revue la littérature spécialisée consacrée aux solutions techniques aux problèmes du contrôle et de l'aide à la décision en matière environnementale, dans le but de dégager celles qui sont potentiellement extrapolables à la problématique du développement durable. Cette phase nous a conduit à retenir quatre approches méthodologiques :

les indices composites d'indicateurs ;

l'agrégation statistique d'indicateurs ;

le benchmarking ;

les méthodes multicritères.

La seconde étape de notre étude a porté sur l'expérimentation de ces approches dans le but de mettre en évidence leur portée et leurs limites, aux plans tant conceptuel qu'opérationnel. En l'absence de données pour la Suisse concernant les différents critères et indicateurs proposés par l'étude de ECOPLAN + FC, nous avons eu recours à d'autres sources de données qui restreignent la portée de nos applications à de simples illustrations des méthodes proposées sans lien fort avec les besoins de la politique énergétique, en général, et de celle de la Suisse, en particulier.

En tant que responsable de l'étude, je tiens à remercier ici les collaborateurs qui en ont assuré la réalisation. Monsieur Stéphane Genoud, assistant, a été chargé de l'étude de la littérature ayant conduit aux propositions méthodologiques retenues et a réalisé les applications visant l'expérimentation des méthodes d'agrégation statistique d'indicateurs et des méthodes multicritères présentées dans les sections 3.2 et 3.4. Madame Myriam Garbely, maître d'enseignement et de recherche, a participé à la seconde étape de l'étude en réalisant l'application de la procédure de benchmarking présentée dans la section 3.3. Dans la présente version finale, le rapport a été rédigé par Madame Garbely et moi-même à partir d'une première mouture préparée par Monsieur Genoud. Je tiens également à remercier ici notre collègue Gérard Antille, pour les conseils qu'il nous a prodigués en matière d'utilisation de sa méthode d'analyse statistique des données, ainsi que les membres du groupe d'accompagnement pour leurs commentaires et suggestions.

Fabrizio Carlevaro

1 Représentation du développement durable par des indicateurs

1.1 La notion de développement durable

Dans les années 80, la communauté internationale s'est penchée sur le problème du développement durable. De cette réflexion est sorti un travail qui fait encore actuellement office de référence : le Rapport Brundtland. Il définit le développement durable comme un développement permettant "la satisfaction des besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins, tout en préservant la diversité des espèces végétales et animales". Cette définition complète l'interprétation littérale du développement durable, qui renvoie à des notions de reproduction des systèmes sociaux dans la durée, par la prise en compte de la notion d'équité dans le développement. Ainsi, d'après cette conception, la satisfaction des besoins fondamentaux (santé, éducation, qualité de vie, énergie, alimentation, logement, mobilité, liberté d'expression, participation aux décisions collectives), ne doit pas être seulement assurée dans la durée mais elle doit être aussi socialement viable en réduisant les inégalités actuelles entre personnes et groupes sociaux, entre pays développés et pays en développement.

Les trajectoires de développement actuelles ont des conséquences à long terme pour les générations futures. Ces trajectoires ont des impacts sur la pauvreté, l'environnement planétaire, la participation des minorités aux décisions, l'aménagement de l'espace, l'équité de distribution des richesses, la gestion des ressources en eaux, la gestion des ressources énergétiques non renouvelables, la sécurité alimentaire, la gestion des forêts, la santé humaine, la gestion des déchets et sur bien d'autres domaines encore. La problématique du développement durable doit ainsi tenir compte de tous ces impacts. Nous constatons ici déjà l'importance d'une approche pluridisciplinaire pour étudier le développement durable.

En matière de développement durable, l'environnement acquiert un statut particulier. C'est le lieu géographique, local ou planétaire (global) où se développent les activités humaines. C'est aussi un véhicule entre le présent et le futur, par la transmission du patrimoine naturel, ainsi qu'un lieu de confrontation entre les temporalités sociales, s'inscrivant dans le court terme, et les temporalités biophysiques, s'inscrivant-elles, dans le long et le très long terme. L'environnement, ce sont aussi des processus naturels qui échappent au contrôle des hommes, et un fournisseur de services essentiels aux collectivités humaines.

Une approche « volontariste » du développement durable implique l'étude des logiques plurielles à l'œuvre dans le cadre des projets de développement (rationalité économique, égalité d'accès, contraintes techniques, efficacité écologique, épuisement des ressources naturelles, risques majeurs). Elle doit s'interroger aussi sur les conséquences à long terme,

notamment sur la structuration de l'espace, les pollutions diffuses, la disponibilité en ressources naturelles et la vulnérabilité des écosystèmes. La connexion des espaces géographiques avec ses conséquences environnementales, économiques, sociales et institutionnelles doit également être prise en compte, de même que la satisfaction des besoins fondamentaux.

La complexité de ces points de vue explique que le développement durable est forcément source de controverses, car il n'y a pas de solutions arrêtées faisant appel à des considérations scientifiques. Pour progresser dans la recherche de solutions rationnelles il convient d'adopter une approche résolument interdisciplinaire qui appelle une réorganisation en profondeur de la recherche.

En matière de décision, les problèmes de développement durable sont confrontés aux irréversibilités potentielles des décisions, à de fortes incertitudes, à une pluralité de points de vues et de pratiques. Toute prise de décision appelle donc à confronter les opinions, les expertises et les pratiques. Dans ce contexte, il faut aussi souligner l'importance du débat démocratique. Le développement durable doit être un choix de société pour qu'il puisse être véritablement mis en œuvre. Les applications, dans différents pays, de l'Agenda 21 sont de très bons exemples du « penser global et agir local ».

1.2 Cadres conceptuels de définition d'indicateurs de développement durable

Il est largement reconnu que toute définition opératoire du développement durable d'un pays doit prendre en compte trois dimensions :

- La **dimension économique**, dans le but d'assurer le maintien ou la croissance du revenu réel par tête dans le long terme ;
- La **dimension environnementale**, dans le but d'assurer la pérennité du potentiel du « capital naturel » à régénérer les ressources énergétiques, matérielles et immatérielles renouvelables et à assimiler les flux de déchets générés par l'activité humaine ;
- La **dimension sociale**, dans le but d'assurer une répartition intra- et inter-générationnelle équitable du bien-être.

L'objet d'un ensemble d'indicateurs de développement durable est de permettre l'évaluation de l'état et de l'évolution d'un pays en matière de développement durable selon ces trois dimensions, tout en facilitant les comparaisons dans l'espace et le temps. Il s'agit d'un outil qui doit répondre à des usages multiples, notamment :

- A un **besoin de communication**, pour informer de manière simple et non ambiguë les autorités et le public sur l'état ou l'évolution d'un pays ou d'une région en matière de développement durable ;

- A un **besoin de description et d'explication**, pour comprendre les déterminants qui sont à l'œuvre dans une chaîne complexe de causalités ;
- Comme **support à la décision**, en fournissant les directions à suivre ou les tendances à corriger.

L'élaboration de tels indicateurs doit ainsi réaliser un difficile compromis entre les attentes nombreuses d'un public varié aux exigences multiples et parfois contradictoires.

Une réflexion quant aux règles à suivre dans la construction d'un système d'indicateurs satisfaisant à ces exigences a été menée par un ensemble de praticiens et d'experts dans le cadre de la Fondation Rockefeller à Bellagio (Italie). Ces travaux ont dégagé les dix principes suivants :

- Ü des objectifs et une vision partagés du développement durable ;
- Ü une perspective holiste ;
- Ü la présence des dimensions essentielles ;
- Ü un champ d'analyse adéquat ;
- Ü un caractère pragmatique ;
- Ü une transparence dans l'élaboration ;
- Ü une clarté dans la communication ;
- Ü un processus participatif ;
- Ü une flexibilité dans la révision ;
- Ü une reconnaissance institutionnelle.

La construction d'un ensemble d'indicateurs basé sur ces principes a toutes les chances de pouvoir obtenir un large consensus, tant d'un point de vue scientifique, que d'un point de vue institutionnel. Dans la pratique, cependant l'élaboration d'indicateurs de développement durable est le résultat d'un compromis entre les principes scientifiques, institutionnels, statistiques et de diffusion de l'information que l'on vient d'énoncer.

Au niveau international, le cadre conceptuel qui s'est imposé pour élaborer un ensemble complet d'indicateurs de développement durable est celui développé par l'OCDE en 1990 sous la dénomination de modèle **Pression-Etat-Réponse (PER)** et repris par la Commission du développement durable des Nations Unies avec l'appellation de modèle **Force motrice-Etat-Réponse**. Selon ce modèle, illustré par la figure 1 tirée de IFEN (1999) les liens existant entre les sphères économiques, environnementale et sociale, traduisent une chaîne causale entre trois maillons :

- Le premier maillon est représenté par les activités humaines de production et de consommation qui se traduisent par des **pressions** exercées sur l'environnement.

- Le deuxième maillon est représenté par l'**état** de l'environnement qui est infléchi par les pressions qu'il subit. Cette modification de la qualité du « capital naturel » rejaillit sur sa capacité à régénérer les ressources énergétiques, matérielles et immatérielles renouvelables et à assimiler les flux de déchets générés par l'activité humaine et, par-là même, affecte la santé et le bien-être des individus. A ce stade, il est important de comprendre tant l'état de l'environnement que ses effets indirects sur l'économie et la société.
- Le troisième maillon est représenté par les acteurs de la société qui réagissent (**réponse**) aux atteintes de leur bien-être par des mesures ou des actions privées ou publiques de gestion et de protection de l'environnement

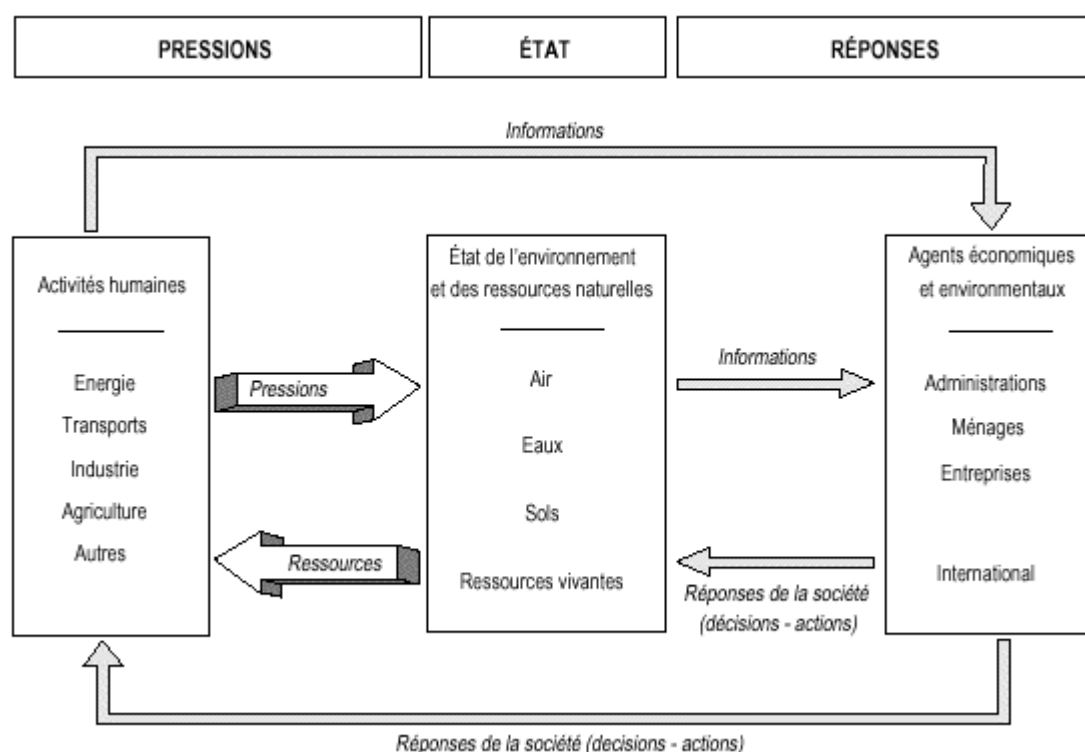


Figure 1 : Modèle P-E-R

Les indicateurs développés dans ce cadre peuvent se situer à différents niveaux d'agrégation schématisés par la figure 2 en forme de « pyramide de l'information statistique ». « Le socle de la pyramide est constitué par les données brutes primaires, collectées par le biais d'enquêtes, de réseaux de mesures ou de sources administratives, par les données individuelles contrôlées et documentées, ainsi que par les données agrégées élémentaires. Cette partie, la plus importante en volume de données, est principalement destinée aux experts. La partie supérieure de la pyramide comprend les indicateurs sectoriels pouvant être intégrés dans des systèmes d'indicateurs de développement durable. Ces derniers peuvent être agrégés numériquement et prendre la forme d'indicateurs

composites ou d'indices voire même être intégrés dans un seul et unique indicateur (de bien-être social et économique par exemple). Ce genre d'intégration n'est, à notre connaissance, pas encore sorti du cadre de la recherche. » OFS & OFEFP (1999).

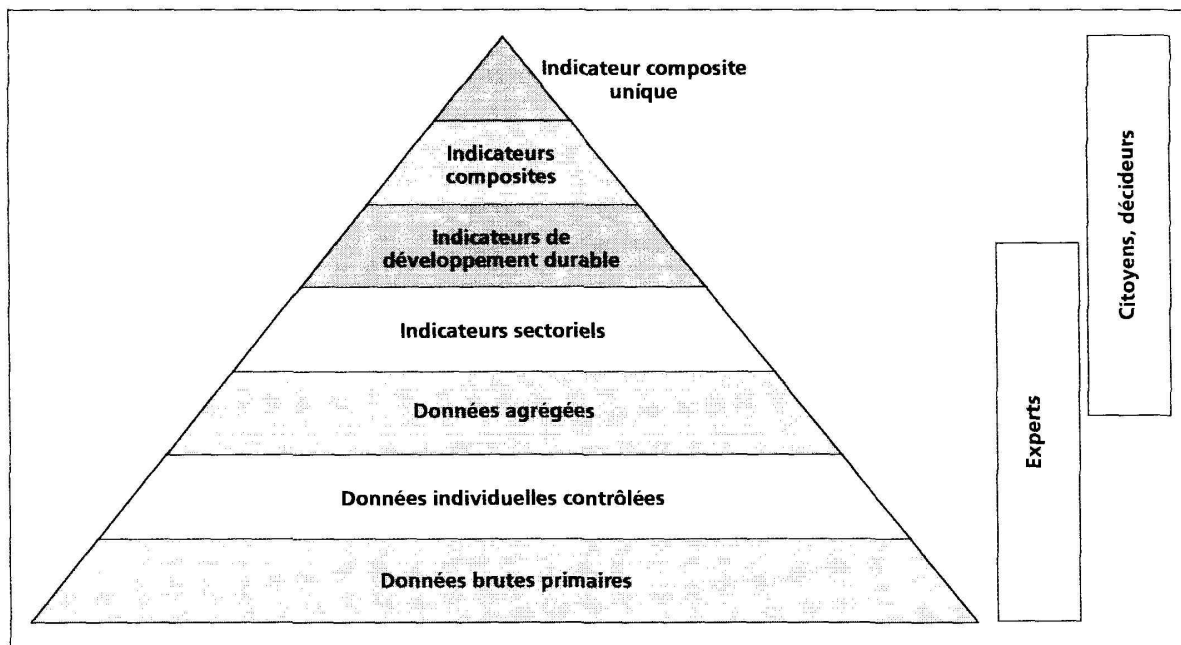


Figure 2 : Pyramide de l'information

1.3 Place de l'énergie dans le développement durable

Comprendre la place de l'énergie dans le développement durable c'est s'interroger sur les fonctions sociales de l'énergie et sur les conséquences de son utilisation par la société. Contrairement à sa conception physique unitaire, fournie par la théorie thermodynamique, la conception « sociale » de l'énergie fait référence à différentes perspectives qui constituent autant d'objectifs, souvent conflictuels, de la politique énergétique d'un pays. Parmi ces perspectives, il convient de distinguer les quatre suivantes.

- **L'énergie en tant que bien économique**

Dans cette perspective, l'énergie est vue comme un ensemble de ressources rares échangées dans l'économie pour satisfaire des besoins individuels et collectifs. Cette conception de l'énergie en tant que marchandise met l'accent sur l'allocation optimale des ressources énergétiques entre les activités économiques de production et consommation. Elle se focalise donc sur les problématiques de la demande et de l'offre d'énergies ainsi que

sur les critères de détermination des prix d'échange de ces produits sur les marchés en fonction de leur productivité et de leur disponibilité.

- **L'énergie en tant que ressource environnementale**

Cette perspective se propose de rendre compte des conséquences sur l'environnement naturel de l'utilisation humaine de l'énergie, tout particulièrement de celles qui sont de nature irréversible comme la pollution radioactive ou toxique des milieux naturels ou les changements climatiques globaux. Elle conduit à distinguer les ressources énergétiques selon la catégorie de risque qu'elles comportent pour le système environnemental, notamment : les ressources renouvelables des non renouvelables, les ressources recyclables des non recyclables et les ressources polluantes des non polluantes.

- **L'énergie en tant que nécessité sociale**

Cette perspective conduit à considérer l'énergie comme une ressource accessible pour tous les individus, dans un souci d'équité sociale et de solidarité à réaliser dans l'espace (entre individus d'une même génération) et dans le temps (entre générations différentes) Cette fonction de l'énergie met l'accent sur la satisfaction des besoins fondamentaux des individus, selon des critères variables dans l'espace et dans le temps avec les cultures et les styles de vie. Elle justifie l'intervention publique là où les mécanismes de marché n'assurent pas la satisfaction des besoins fondamentaux aux individus les plus démunis.

- **L'énergie en tant que ressource stratégique**

Cette fonction de l'énergie s'explique par l'inégalité dans la localisation des ressources énergétiques entre les états. Elle justifie la diversification des sources d'énergies et les mesures de politique internationale visant à assurer la sécurité d'approvisionnement en ressources énergétiques importées. L'enjeu est ici la sécurité du pays en termes d'indépendance de son système économique et social.

Cette conception sociale de l'énergie et les objectifs fondamentaux auxquels elle fait référence se traduit en des exigences concrètes pour la politique énergétique d'un pays et pour le fonctionnement de son secteur énergétique. Ces exigences sont les suivantes:

Ü minimiser les conséquences de la consommation et de la production d'énergie pour **l'environnement**.

Il s'agit, d'une part, des impacts sur l'environnement tels que l'épuisement des ressources naturelles, l'effet de serre, la dégradation de la couche d'ozone, la toxicité et l'écotoxicité, les nuisances (sonores, olfactives et visuelles), et finalement l'altération physique des écosystèmes; et, d'autre part, des risques d'accident liés à la production ou au stockage des différents agents énergétiques.

Ü contribuer au développement global de l'économie.

S'agissant des conséquences sur l'économie, elles sont multiples et diverses, à l'image des services rendus par l'énergie à tous les secteurs de l'économie. Toutefois, WALTER, GUBLER ET BRODMANN (2001) rappellent que les objectifs économiques classiques d'amélioration du bien-être, de croissance qualitative, de plein emploi, de stabilité des prix et d'équilibre des échanges internationaux ne peuvent être transposés à un seul secteur. Seules des conditions cadres peuvent être données, telles que chaque secteur puisse fournir sa contribution optimale au développement global de l'économie. Ainsi un changement structurel qui impliquerait du chômage temporaire dans un secteur ne pourrait pas nécessairement être considéré comme non durable.

Les impacts du secteur énergétique sur l'économie sont les conséquences directes et indirectes de la capacité de ce secteur à satisfaire trois exigences:

- la *satisfaction des besoins énergétiques de l'économie*. Le secteur énergétique doit assurer un approvisionnement fiable et diversifié, l'adéquation de la quantité offerte à la demande et un niveau de prix avantageux et stable.
- *l'efficacité économique de l'approvisionnement et de l'utilisation de l'énergie*. Celle-ci se traduit par l'intensité énergétique de l'économie et par la capacité d'innovation du secteur énergétique. Les conditions cadres doivent également éviter des distorsions sur les marchés au travers de taxes et de subventions qui ne seraient pas liés à l'internalisation des coûts externes.
- la *stabilité économique*, c'est-à-dire la capacité du secteur énergétique à réagir à des changements structurels sans coûts d'ajustement excessifs en termes de prix et d'emploi.

Ü encourager l'équité sociale et la solidarité.

Les exigences du développement durable en termes d'égalité, de solidarité et de redistribution pour assurer la satisfaction des besoins fondamentaux des plus démunis sont du ressort de la politique internationale, notamment de l'aide au développement. A l'échelle d'un pays, les objectifs d'équité et de redistribution interviennent dans la politique sociale, fiscale et régionale. Ces objectifs ne font pas partie des attributions directes de la politique énergétique, si ce n'est dans sa capacité à garantir un service public à l'ensemble des citoyens et à l'ensemble des régions du pays.

Des indicateurs de développement durable pour le secteur énergétique doivent permettre de mesurer ou d'évaluer ces exigences dans toute leur diversité. Ces indicateurs seront donc eux-mêmes multiples et divers. Le modèle ECOPLAN/Faktor¹ propose pour la

¹ Ce modèle se rapproche de la systématique du projet MONET (Monitoring du développement durable) développé par l'OFS et l'OFEFP. Une description détaillée des indicateurs proposés ainsi qu'une indication quant aux coûts de leurs relevés est donnée dans WALTER, GUBLER ET BRODMANN (2001).

dimension énergétique du développement durable, 60 indicateurs regroupés selon quatre types:

- ü des **indicateurs d'effets** qui se réfèrent aux impacts du secteur énergétique sur l'environnement, l'économie et la société. Les impacts sur l'environnement concernent les ressources, les espace vitaux, le climat, la qualité de l'air, la radioactivité et le rayonnement non ionisant. Les impacts sur l'économie prennent en compte la qualité de l'approvisionnement, les prix, l'efficacité et la stabilité. Ils découlent de l'objectif de la couverture efficace des besoins. Les impacts sociaux incluent la solidarité au travers du critère de service public ainsi que des aspects relevant de la participation, de l'individualité et de la sécurité.
- ü des **indicateurs d'activité** qui concernent la production et la consommation d'énergie par l'industrie, les services, les ménages et les transports. Ces indicateurs illustrent l'évolution des facteurs déterminant de la demande finale d'énergie. Les activités sectorielles sont représentées à l'aide d'indicateurs spécifiques à chacun des groupes de consommateurs. Ceux-ci sont complétés par des indicateurs reflétant la structure socio-économique ainsi que certains facteurs exogènes qui influencent le niveau d'activité des différentes catégories de consommateurs.
- ü des **indicateurs de rendement énergétique** dans la production et la transformation de l'énergie et dans son utilisation. Ils se réfèrent à l'efficacité d'utilisation de l'énergie
- ü des **indicateurs politiques** qui illustrent l'impact de la politique énergétique. Ces impacts se font au travers des mesures suivantes: la coopération, l'information, la recherche, les redevances énergétiques, la concurrence, les subventions, les mesures volontaires et les prescriptions.

Les auteurs concluent leurs propositions en rappelant les difficultés et les coûts que représente la quantification d'un grand nombre de ces indicateurs. Des choix doivent être faits entre indicateurs différenciés et complexes à relever, d'une part, et, d'autre part, des indicateurs plus simples, mais également moins coûteux et plus aisés à communiquer. Les auteurs soulignent finalement que la définition de valeurs cibles ou de coefficients de pondération en vue d'une agrégation de ces indicateurs est difficile et trop dépendante de jugements de valeur.

2 Monitoring du développement durable

Nous avons mentionné au chapitre précédent (cf. 1.2) les usages multiples auxquels doit répondre un ensemble d'indicateurs de développement durable, parmi lesquels figure au premier plan l'aide à la décision politique. A ce titre, ces outils doivent permettre la comparaison des situations dans l'espace et le temps, afin d'indiquer les directions à suivre et les évolutions à corriger. Autrement dit, ils doivent servir de clignotants de monitoring, permettant de fixer des objectifs à atteindre et de contrôler la conformité de l'évolution du pays à ces objectifs de durabilité et, le cas échéant, de suggérer le moment et la nature des actions à entreprendre pour rapprocher la situation observée des objectifs souhaités, voire même, d'indiquer les objectifs inappropriés à réviser. Ainsi, dans une optique de politique de développement durable, le monitoring joue un rôle central.

La mise en œuvre pratique d'un monitoring basé sur un système d'indicateurs doit pouvoir s'appuyer sur des méthodes de synthèse permettant de dégager une vision compréhensive de l'état et de l'évolution du pays en matière de développement durable appréhendée par les indicateurs disponibles. L'objectif de ce chapitre est de proposer de telles méthodes pour un monitoring du développement durable dans le domaine énergétique, notamment. Des applications de ces méthodes seront présentées et discutées dans le prochain chapitre.

Les méthodes proposées sont représentatives de quatre démarches générales que nous avons dégagées d'un survol de la littérature relative aux méthodes de contrôle et de décision en matière de gestion environnementale, potentiellement extrapolables à la problématique plus vaste du développement durable.

2.1 Les indices composites d'indicateurs

Le nombre d'indicateurs nécessaire à l'analyse du développement durable d'un système social doit être suffisamment grand pour que toutes les dimensions essentielles du développement durable soient appréhendées. La comparaison spatiale et/ou temporelle d'un tel ensemble comprenant de nombreuses grandeurs constitue un défi méthodologique en raison des nombreuses discordances qui peuvent apparaître dans les résultats des comparaisons basées sur chaque indicateur pris isolément.

L'utilisation d'indices composites, qui agrègent l'information contenue dans plusieurs indicateurs de développement durable, a précisément pour but de mesurer l'évolution d'une dimension importante du développement durable qui échappe, pour des raisons pratiques ou théoriques, à toute observation unidimensionnelle. Cette démarche s'inspire des méthodes

développées par la statistique économique pour mesurer les variations spatiales (par exemple entre deux pays) ou temporelles (par exemple entre deux années) de phénomènes macroéconomiques qui échappent à l'observation directe, tels l'inflation ou la production nationale.

La construction d'un indice composite d'indicateurs de développement durable s'effectue en quatre temps². Dans un premier temps, on définit le champ de l'indice et on sélectionne la liste des indicateurs observables à utiliser comme composantes de l'indice. Dans un deuxième temps, on transforme les indicateurs retenus afin de les exprimer selon un dénominateur commun qui en autorise l'agrégation. Dans un troisième temps, on procède à l'agrégation de ces indicateurs transformés dans le but d'aboutir à une grandeur unidimensionnelle. Pour terminer, on rapporte cette grandeur à la valeur qu'elle prend dans une situation de référence (mise en base de l'indice), dans le but de permettre l'interprétation concrète des évolutions que l'on cherche à mesurer.

Les problèmes que l'on peut rencontrer dans la mise en œuvre concrète de cette démarche exige que l'on précise davantage chacune de ses étapes.

- **Définition du champ de l'indice et sélection des composantes**

En macro-économie, la délimitation du champ d'un indice composite peut s'appuyer sur une conceptualisation théorique et des conventions méthodologiques largement acceptées par les utilisateurs de ces concepts. Tel n'est pas le cas en matière de développement durable, où les concepts proposés pour décrire ce phénomène multidimensionnel font encore l'objet de nombreuses controverses de la part des utilisateurs. Les besoins et les attentes de ces derniers varient, en effet, selon que l'on a affaire à des spécialistes des sciences de la nature, à des scientifiques des sciences humaines et sociales, à des politiciens ou au grand public. Aussi, le champ d'étude d'un indice composite doit être délimité en fonction des attentes des utilisateurs auxquels il est destiné. Cela implique la mise en place d'un dialogue entre le concepteur de l'indice et ses utilisateurs visant à révéler les besoins de ces derniers et, par-là même, à asseoir la légitimité de l'indice et son acceptabilité.

La sélection des indicateurs à utiliser comme éléments constitutifs de l'indice composite doit répondre à des critères de pertinence et d'opérationnalité. Sans viser l'exhaustivité, ces indicateurs doivent fournir une description aussi compréhensive que possible du champ couvert par l'indice en mettant l'accent sur les aspects qui influencent le plus l'évolution du phénomène mesuré. Ainsi, s'agissant de décrire l'évolution du réchauffement global, on retiendra les émissions de CO₂ en tant que principal gaz à effet de serre mais aussi les gaz non saturés, comme le méthane, dont l'augmentation pourrait avoir des conséquences significatives sur le réchauffement de l'atmosphère. Le choix des composants doit aussi répondre à un souci d'intelligence de la part des utilisateurs de l'indice. En ce sens, il faut éviter d'utiliser des indicateurs dont l'interprétation exige des connaissances scientifiques

² Cette présentation s'inspire de GROSCLAUDE (1995).

poussées, si l'indice est destiné à un public de non-spécialistes. Finalement, le choix des composants doit également être dicté par des considérations d'ordre pratique, à savoir : la disponibilité de bases de données accessibles permettant leur calcul à un coût raisonnable en vue des comparaisons dans le temps et/ou dans l'espace auxquelles est destiné l'indice.

- **Transformation des composantes de l'indice**

Deux approches sont disponibles pour ramener les indicateurs choisis à un dénominateur commun : une approche monétaire, d'une part, et une approche physique, d'autre part.

L'**approche monétaire** consiste à convertir tous les indicateurs exprimés en quantités physiques en valeurs monétaires à l'aide de prix de référence. Cette approche relève donc des domaines d'application de l'analyse coûts-bénéfices, c'est-à-dire de l'agrégation de biens et dommages relevant de la sphère marchande ou dont l'évaluation monétaire peut être réalisée par le biais de méthodes fiables d'évaluation économique des biens et services non marchands.

L'**approche physique** peut s'appuyer sur la réduction, la conversion ou la combinaison des indicateurs, en fonction de la complexité du phénomène à décrire et de l'homogénéité des composantes à transformer.

La **réduction** n'est, en général, praticable que dans le cas de phénomènes simples et d'indicateurs homogènes. Elle consiste à exprimer toutes les composantes physiques de l'indice dans une dimension qui leur est commune. Cette approche peut être utilisée notamment dans le cas de consommations énergétiques, en s'appuyant sur le contenu enthalpique (équivalent chaleur) ou exergétique (équivalent travail mécanique) des sources d'énergie, voire d'autres dimensions énergétiques proposées par la pensée « éconómico-écologique », tels l'énergie (équivalent en énergie solaire requis pour produire un joule d'un autre type d'énergie) ou l'extropie (mesure des pertes irréversibles et des pollutions engendrées).

La **conversion** consiste à exprimer les indicateurs pris en compte dans une dimension qui n'est caractéristique d'aucun d'entre eux ou qui est propre seulement à certains d'entre eux. C'est par exemple le cas des émissions de gaz à effet de serre exprimées en équivalents- CO_2 ou des pollutions atmosphériques exprimées en équivalents-acide. En matière d'environnement, la conversion repose théoriquement sur l'existence d'une fonction de dommage (ou dose-effet) qui transforme les doses de polluants émis en dommages subis par l'homme et la nature.

La **combinaison** s'applique lorsque le phénomène à décrire est trop complexe et, partant, les indicateurs sélectionnés sont trop hétérogènes pour pouvoir faire l'objet d'une réduction ou d'une conversion. On transforme alors les composantes de l'indice en grandeurs sans dimension (nombres purs). Parmi les méthodes les plus utilisées pour effectuer une telle transformation on trouve :

- la valeur centrée (sur la moyenne des observations de l'indicateur) et réduite (divisée par l'écart-type des observations de l'indicateur) ;
- la distance à la valeur observée maximale relative (rapportée à l'écart maximum entre valeurs observées de l'indicateur). Cette méthode est utilisée pour le calcul de l'indice de développement humain du Programme des Nations Unies pour le développement;
- l'indice élémentaire de l'indicateur, soit la valeur de l'indicateur rapportée à une valeur de référence, pouvant représenter un objectif de développement durable à atteindre ou la valeur d'une situation historique ou d'un pays de référence.

• Agrégation des composantes transformées de l'indice

Une fois exprimées dans une dimension commune les composantes d'un indice sont agrégées pour aboutir à une grandeur unique. Le choix de la méthode d'agrégation doit rendre compte des formes d'interaction existantes entre les composantes agrégées. Ainsi, dans le domaine de la pollution de l'air, des interactions existent entre les polluants tels que le SO_2 , les NO_x , les COV et l'ozone. Par exemple, on observe qu'en présence de NO_x le rythme de croissance de certaines plantes augmente de 17% alors qu'il diminue de 19% si celles-ci sont exposées à des concentrations identiques de SO_2 ; l'effet combiné de ces deux polluants est, quant à lui, de -43%. D'une façon générale on distingue trois formes d'interaction, soit : la superposition, la synergie et l'antagonisme.

Il y a **superposition** lorsque l'effet combiné de deux composantes est égal à la somme de leurs effets individuels. L'agrégation de ces composantes transformées, notées x_1 , x_2 se fait alors par une fonction d'agrégation additive, soit :

$$F(x_1, x_2) = F(x_1, 0) + F(0, x_2).$$

Il y a **synergie** entre deux composantes lorsque leur effet combiné est supérieur à la somme de leurs effets séparés. Si l'indice est une fonction croissante (respectivement décroissante) de ses composantes, l'agrégation se fait alors par une fonction sur-additive (respectivement sous-additive), soit :

$$F(x_1, x_2) > F(x_1, 0) + F(0, x_2) \quad (\text{respectivement } F(x_1, x_2) < F(x_1, 0) + F(0, x_2)).$$

Enfin, il y a **antagonisme** si l'effet combiné des composantes est inférieur à la somme de leurs effets séparés. L'agrégation de ces composantes doit alors faire appel à une fonction d'agrégation sous-additive, si l'indice est une fonction croissante de ses composantes, et à une fonction d'agrégation sur-additive, si l'indice est décroissant.

Une situation extrême d'antagonisme, qualifiée de **neutralité**, se présente lorsque l'effet combiné des composantes est égal à l'effet individuel le plus important. Pour un indice composite mesurant la qualité de l'air à partir de la concentration de différents polluants cela signifierait que la qualité de l'air est déterminée par le polluant dont la concentration est la plus dommageable. Dans ce cas, la fonction d'agrégation des composantes s'écrit :

$$F(x_1, x_2) = \text{Max} \{ F(x_1, 0) ; F(0, x_2) \}$$

si l'indice composite est croissant, et

$$F(x_1, x_2) = \text{Min} \{ F(x_1, 0) ; F(0, x_2) \}$$

dans le cas où l'indice est décroissant.

En pratique, les méthodes utilisées pour agréger les composantes d'un indice composite sont : l'addition, la multiplication ou la sélection.

L' **addition** correspond à une situation de superposition. Elle est utilisée sans pondération, lorsque les composantes agrégées ont été préalablement transformées par réduction ou par conversion. La fonction d'agrégation s'écrit alors :

$$F(x_1, x_2) = x_1 + x_2 .$$

Lorsque les indicateurs agrégés ont été transformés par conversion, en raison de leur hétérogénéité, on les agrègera plutôt à l'aide d'une somme pondérée, c'est-à-dire par une fonction d'agrégation de la forme :

$$F(x_1, x_2) = w_1 x_1 + w_2 x_2$$

où w_1 et w_2 désignent des coefficients de pondération (positifs et tels que $w_1 + w_2 = 1$).

La **multiplication** correspond à des situations de synergie (indice croissant) ou d'antagonisme (indice décroissant). La fonction d'agrégation s'écrit dans ce cas :

$$F(x_1, x_2) = x_1^{w_1} x_2^{w_2} .$$

La **sélection** est utilisée en cas de neutralité. Dans le cas d'un indice croissant, la fonction d'agrégation qui lui correspond s'écrit :

$$F(x_1, x_2) = \text{Max} \{ x_1 ; x_2 \}$$

alors que pour un indice décroissant il s'agit de :

$$F(x_1, x_2) = \text{Min} \{ x_1 ; x_2 \} .$$

Toutes ces méthodes d'agrégation apparaissent comme des cas particuliers de la fonction d'agrégation suivante :

$$F(x_1, x_2) = (w_1 x_1^{-p} + w_2 x_2^{-p})^{-1/p} .$$

L'addition, la multiplication et la sélection s'obtiennent en particulier en particulierisant le paramètre p de cette formule aux valeurs 1, 0 et $+\infty$, respectivement. Plus généralement, pour un indice composite croissant (respectivement décroissant) cette formule d'agrégation permet de représenter, par un choix approprié de la valeur du paramètre p , des situations de synergie (lorsque $p > 1$, respectivement $p < 1$), de superposition (lorsque $p = 1$) ou d'antagonisme (lorsque $p < 1$, respectivement $p > 1$).

Ajoutons que le recours à des pondérations différenciées ne se justifie, en général, que pour agréger des indicateurs très hétérogènes, pour lesquels une transformation par réduction ou conversion n'est pas réalisable. Pour définir ces pondérations il conviendra de se référer à

des avis d'experts et de corroborer leurs propositions par un dialogue avec les utilisateurs de l'indice.

- **Mise en base de l'indice**

La dernière étape de calcul d'un indice composite consiste à rapporter le résultat de l'agrégation de ses composantes à une valeur de référence, appelée base de l'indice. Cette mise en base de l'indice a pour but de normaliser l'agrégat des composantes afin qu'il exprime une variation par rapport à la valeur de référence. Le choix de cette base revêt donc une importance particulière, car elle conditionne l'interprétation concrète des valeurs de l'indice.

La sélection d'une valeur de référence de l'indice dépend de la fonction de l'indice. A cet égard, on distingue deux catégories d'indices, à savoir : les indices normatifs et les indices descriptifs.

Un **indice normatif** a pour but d'évaluer une variation par rapport à un objectif politique. La base d'un tel indice correspondra donc à une norme légale, à un standard scientifique ou à une valeur à atteindre en vertu d'un engagement politique, comme par exemple le niveau des émissions de gaz à effets de serre inscrit au protocole de Kyoto.

Un **indice descriptif** vise, en revanche, les comparaisons dans l'espace et le temps. Pour un indice destiné à décrire une évolution temporelle, la base sera généralement la valeur de l'agrégat pour la première période de calcul. Il convient toutefois de veiller à ce que ce choix corresponde à une situation représentative ou typique du phénomène, c'est-à-dire ni anormalement élevée ni anormalement basse. S'agissant d'un indice destiné à évaluer des écarts dans l'espace, par exemple entre pays, on choisira comme base soit la valeur de l'agrégat d'un pays particulier (base vedette), soit une mesure de tendance centrale de la distribution spatiale des valeurs de l'agrégat, comme la moyenne ou la médiane (base représentative).

Ajoutons, que si l'agrégation est réalisée sur des indices élémentaires des composantes (transformation par combinaison), l'agrégat exprime déjà un indice composite dont la base est définie implicitement par les bases des indices élémentaires.

2.2 L'agrégation statistique d'indicateurs

L'agrégation statistique des indicateurs de développement durable vise, comme les indices composites présentés dans la section précédente, la réduction du nombre d'indicateurs à prendre en compte lors d'une analyse destinée à mettre en évidence l'évolution du développement durable d'un pays, à comparer l'état du développement durable d'un pays à celui d'autres pays ou encore à évaluer la réalisation d'objectifs politiques en matière de développement durable. Les procédures d'agrégation statistique se différencient toutefois de l'agrégation basée sur des indices composites par le fait qu'elles justifient l'agrégation de deux ou plusieurs indicateurs de développement durable par la similitude de leur évolution spatiale ou temporelle.

Dans ce contexte, les méthodes de réduction de dimension développées en analyse statistique de données peuvent fournir des solutions intéressantes. Ces méthodes visent à remplacer les observations faites sur un vecteur de variables de grande dimension par celle d'un vecteur de variables latentes de très petite dimension. L'intérêt de cette réduction de dimension est multiple :

- recherche de variables explicatives ou discriminantes les plus informatives ;
- compression des bases de données ;
- visualisation graphique des tendances ou des disparités entre observations d'un ensemble nombreux de variables ;
- construction d'indices synthétiques.

Une méthode classique de réduction de la dimension d'une matrice de plusieurs observations d'un ensemble de plusieurs variables, est l'**analyse en composantes principales**. Elle définit les variables latentes comme combinaisons linéaires des variables observées, non corrélées entre elles, et à variance maximum. Ces composantes principales conservent donc "au mieux" les disparités entre observations et par-là même constituent des "facteurs explicatifs" latents de ces disparités, que l'on peut parfois interpréter concrètement. La réduction de dimension est obtenue en prenant en considération seulement les composantes principales à forte variance.

Une autre méthode classique d'analyse des données, l'**analyse canonique**, permet de réduire la dimension de deux matrices de n observations portant sur deux ensembles de variables. Elle définit un couple de variables canoniques comme des combinaisons linéaires de chaque ensemble des variables observées ayant la corrélation la plus forte. Ce couple de variables latentes est donc celui qui conserve "au mieux" les interrelations entre les deux groupes de variables. Un deuxième couple de variables canoniques, défini par le même critère, peut être trouvé en imposant une corrélation nulle avec le premier couple de variables canoniques. En itérant cette procédure, on détermine un ensemble orthogonal de couples de variables canoniques permettant de reproduire la structure de corrélation entre

les deux ensembles de variables observées. La réduction de dimension est obtenue en prenant en considération seulement les couples de variables canoniques fortement corrélées. On parvient ainsi à simplifier l'analyse des interrelations entre les deux ensembles multidimensionnels de variables observées.

Ces deux méthodes classiques ont fait l'objet de nombreuses généralisations, notamment pour analyser des ensembles de variables observées selon la double dimension spatio-temporelle (observations répétées dans le temps d'un ensemble d'unités statistiques, comme des pays, par exemple). Parmi ces méthodes nous avons retenu celle proposée récemment par ANTILLE (2001), car elle permet de partager un ensemble d'indicateurs de développement durable, observés dans le temps pour un ensemble de pays, en groupes d'indicateurs semblables par rapport à leur évolution temporelle. Cette partition peut alors servir de justification à une agrégation des indicateurs de chaque groupe, notamment à l'aide d'indices composites, dans le but de réduire la taille du système d'indicateurs à analyser. En effet, le regroupement des indicateurs pouvant faire l'objet d'une agrégation est réalisé de telle sorte à reproduire « au mieux » les disparités observées entre les pays en matière de développement durable à l'aide des agrégats.

Présentée succinctement, cette méthode d'agrégation statistique procède en trois étapes.

- Partant d'une suite de matrices $X_t = [x_{ijt}]$, $t = 1, \dots, T$ où t désigne l'indice des périodes d'observation, $i = 1, \dots, n$ celui des indicateurs de développement durable retenus et $j = 1, \dots, m$ celui des pays observés, on procède d'abord à une analyse en composantes principales d'une « matrice compromis » X_c des matrices X_t , définie comme leur moyenne temporelle. Réalisée sur la matrice X_c centrée et réduite, cette analyse en composantes principales fournit des variables latentes, non corrélées entre elles, qui expliquent « au mieux » les disparités entre pays, en matière de développement durable, telles qu'elles ressortent de la comparaison de la valeur moyenne des indicateurs sur la période d'observation.
- Dans la deuxième étape on positionne, par projection, les lignes des matrices X_t dans l'espace des composantes principales ayant la plus forte variance. Cette opération a pour but de déterminer les « trajectoires temporelles » Z_t , $t = 1, \dots, T$ des indicateurs de développement durable dans l'espace des facteurs explicatifs latents les plus importants. Notons que cette interprétation n'a de sens que si les composantes principales déterminées par la matrice compromis X_c restent stables dans le temps, c'est-à-dire qu'elles représentent, avec une bonne approximation, les composantes principales de chaque matrice X_t .
- Dans la troisième étape, on procède à la comparaison de ces trajectoires Z_t , $t = 1, \dots, T$, afin de détecter les groupes de trajectoires semblables, justifiant un regroupement des indicateurs correspondants en vue de leur agrégation. Ce regroupement est réalisé sur la base d'une procédure de classification hiérarchique qui regroupe successivement les couples d'indicateurs dont les trajectoires dans l'espace susmentionné sont proches, la

proximité entre deux trajectoires étant mesurée par leur distance euclidienne, qui correspond à une visualisation géométrique de la distance entre ces trajectoires.

2.3 Le benchmarking

Le benchmarking est une comparaison de la performance entre institutions ou entités ayant les mêmes domaines d'activité dans le but de définir une meilleure pratique et de situer l'ensemble des institutions par rapport à cette meilleure pratique. S'agissant d'activités productives, la performance peut être assimilée à l'efficacité de la production c'est-à-dire à l'utilisation optimale d'un ensemble d'inputs pour obtenir un ensemble d'outputs.

Ce concept renvoie d'abord aux conditions techniques dans lesquelles est réalisée la production. Une production pourra être qualifiée de **techniquement efficace** si elle est réalisée sans gaspillage de ressources. En présence d'un seul input et d'un seul output, cela revient à utiliser la plus faible quantité d'input pour produire une quantité donnée de l'output ou, réciproquement, à produire la plus grande quantité possible d'output réalisable avec une quantité donnée d'input. En présence d'inputs et d'outputs multiples, ces notions d'**efficacité productive** sont généralisées en envisageant des variations le long d'échelles des vecteurs d'inputs et d'outputs. Si des prix existent pour tous les inputs et outputs, des notions économiques d'efficacité peuvent aussi être envisagées, notamment basées sur la minimisation du coût de production d'une quantité donnée d'outputs, sur la maximisation de la recette de la vente de la production réalisée avec une quantité donnée d'inputs ou, encore sur la maximisation du bénéfice résultant de l'activité de production. Transposées au développement durable, ces notions économiques d'efficacité font apparaître les mêmes difficultés d'application qu'une analyse coûts-bénéfices. C'est pourquoi, seule l'efficacité productive sera envisagée par la suite.

Une méthode classique de benchmarking initialement développée pour comparer des activités productives et dont les développements récents ont montré qu'elle permet d'inclure des composantes environnementales est l'**analyse par enveloppement des données** ou méthode DEA, du terme anglais « Data Envelopment Analysis ». Développée par CHARNES, COOPER ET RHODES (1978), la DEA est une approche pour mesurer l'efficacité qui ne requiert aucune connaissance approfondie du processus de production des unités de décision à évaluer. Au cours des 20 dernières années la DEA a inspiré de nombreux travaux de recherche dans des domaines aussi variés que les services financiers, les soins de santé, les transports, l'éducation et les services publics les plus divers. Des travaux plus récents ont également incorporé des composantes environnementales dans cette approche par l'introduction d'outputs indésirables.

Les unités de décision peuvent être des entreprises, des filières de production, mais également des administrations, des services publics ou des institutions à but non lucratif.

Toutefois les unités considérées dans une analyse doivent être relativement homogènes c'est-à-dire utiliser des inputs et des outputs comparables.

L'efficacité mesurée par la DEA est une efficacité relative, qui compare les unités observées à la meilleure pratique du secteur. Pour une activité de production, cette meilleure pratique est définie comme la frontière des possibilités de production dans l'espace des outputs (produits) et des inputs (facteurs de production). La frontière caractérise le niveau maximum de production accessible pour une utilisation donnée des inputs ou, de manière équivalente, la quantité minimale d'inputs nécessaire pour produire un niveau d'output donné. Aussi, une production est efficace si l'output réalisé et les inputs utilisés constituent un point sur la frontière de production. En deçà de la frontière, la production est inefficace. Une production inefficace gaspille des facteurs. La frontière de production joue ainsi un rôle de critère ou de norme par rapport auquel est jugée l'efficacité.

Ce rôle de norme distingue le concept d'efficacité de celui, plus traditionnel, de **productivité**. Alors que la productivité est définie comme un rapport entre outputs et inputs, l'efficacité elle, fait référence à une distance entre les quantités d'outputs et d'inputs observés et celles qui définissent la frontière. Le concept d'efficacité fait par définition référence à la norme sur laquelle il est construit alors qu'une telle norme est absente du concept de productivité³.

Le modèle classique de la DEA construit la frontière de production à l'aide de combinaisons linéaires des observations dans l'espace des inputs et outputs. Ces combinaisons linéaires définissent une frontière de production linéaire par morceaux qui "enveloppe" les observations par le haut de sorte qu'aucune observation ne se situe au-dessus de la frontière (voir la figure 3). Les pondérations servant à calculer les combinaisons linéaires sont obtenues par la solution de problèmes de programmation linéaires faisant intervenir les quantités d'inputs et d'outputs utilisés par les unités de l'échantillon servant à construire la frontière. La frontière de production ainsi déterminée représente donc la meilleure pratique au sein de ce groupe d'unités.

L'approche DEA classique propose trois mesures d'efficacité productive.

- **L'efficacité productive qui économise les inputs**

Pour une unité produisant un vecteur d'outputs en quantités y_0 en utilisant un vecteur d'inputs en quantités x_0 , on cherche la réduction proportionnelle maximale des quantités d'inputs, soit le vecteur εx_0 où $0 \leq \varepsilon \leq 1$ désigne le facteur de réduction, permettant à une unité efficace de réaliser la même production. Une unité efficace est définie par une combinaison linéaire des vecteurs d'inputs et d'outputs d'un échantillon d'unités observées, soit par $x_{\text{eff}} = X\lambda$ et $y_{\text{eff}} = Y\lambda$ où X et Y désignent les matrices des vecteurs d'inputs et d'outputs des unités de l'échantillon. Le facteur de réduction ε est déterminé par le programme d'optimisation suivant :

³ Pour une présentation détaillée de la relation entre les concepts d'efficacité et de productivité ainsi que de la manière dont ils permettent d'incorporer et d'identifier le progrès technique, voir THIRY ET TULKENS (1989).

minimiser ε

sous les contraintes : $\varepsilon \mathbf{x}_0 \geq \mathbf{X}\lambda$, $\mathbf{y}_0 \leq \mathbf{Y}\lambda$

La minimisation est réalisée par rapport au vecteur de pondérations $\lambda \geq \mathbf{0}$ (rendements à l'échelle constants) éventuellement astreintes à une somme comprise entre 0 et 1 (rendements à l'échelle décroissants) ou égale à 1 (rendements à l'échelle variables). Dans la figure 3 la distance horizontale à la frontière $\mathbf{x}_0 - \varepsilon \mathbf{x}_0 = (1-\varepsilon)\mathbf{x}_0$ mesure donc l'économie d'inputs réalisable par une production efficace des outputs \mathbf{y}_0 . Partant, pour une unité efficace $\varepsilon = 1$ tandis que pour une unité inefficace $\varepsilon < 1$. Le facteur de réduction proportionnelle des inputs ε mesure donc, sur une échelle sans dimension, croissante et comprise entre 0 et 1, le **degré d'efficacité productive** de l'unité analysée, cette efficacité étant d'autant plus élevée que ce degré est proche de 1.

- **L'efficacité productive qui augmente les outputs**

Dans ce cas on cherche l'augmentation proportionnelle maximale des quantités d'outputs, soit le vecteur $\mu \mathbf{y}_0$ où $\mu \geq 1$ désigne le facteur d'augmentation, réalisable par une unité efficace utilisant la même quantité d'inputs \mathbf{x}_0 . Ce facteur d'augmentation des outputs est ainsi déterminé par le programme d'optimisation suivant :

maximiser μ

sous les contraintes : $\mathbf{x}_0 \geq \mathbf{X}\lambda$, $\mu \mathbf{y}_0 \leq \mathbf{Y}\lambda$

la maximisation étant réalisée, comme précédemment, par rapport au vecteur de pondérations $\lambda \geq \mathbf{0}$ (rendements à l'échelle constants) éventuellement astreintes à une somme comprise entre 0 et 1 (rendements à l'échelle décroissants) ou égale à 1 (rendements à l'échelle variables). Dans la figure 3 la distance verticale à la frontière $\mu \mathbf{y}_0 - \mathbf{y}_0 = (\mu-1)\mathbf{y}_0$ mesure donc l'accroissement d'outputs réalisable par une production efficace utilisant les inputs \mathbf{x}_0 . Partant, pour une unité efficace $\mu = 1$ tandis que pour une unité inefficace $\mu > 1$. Afin de mesurer le **degré d'efficacité productive** de l'unité analysée sur une échelle sans dimension, croissante et comprise entre 0 et 1, il convient d'envisager l'inverse du facteur d'augmentation des outputs, soit la grandeur $e = 1/\mu$. Cette efficacité est alors, comme la précédente, d'autant plus élevée que ce degré e est proche de 1.

- **L'efficacité productive généralisée**

Une notion plus générale d'efficacité productive est obtenue en combinant la réduction des inputs avec l'augmentation des outputs. En posant par exemple $e = \varepsilon$, on définit un **degré d'efficacité productive généralisée** par la solution du programme d'optimisation suivant :

minimiser ε

sous les contraintes : $\varepsilon \mathbf{x}_0 \geq \mathbf{X}\lambda$, $(1/\varepsilon)\mathbf{y}_0 \leq \mathbf{Y}\lambda$

Dans la figure 3 la distance diagonale à la frontière $\mathbf{x}_0 - \varepsilon \mathbf{x}_0 = (1-\varepsilon)\mathbf{x}_0$ et $(1/\varepsilon)\mathbf{y}_0 - \mathbf{y}_0 = ((1/\varepsilon)-1)\mathbf{y}_0$ mesure donc la réduction d'inputs conjointement avec un accroissement d'outputs réalisable par une production efficace.

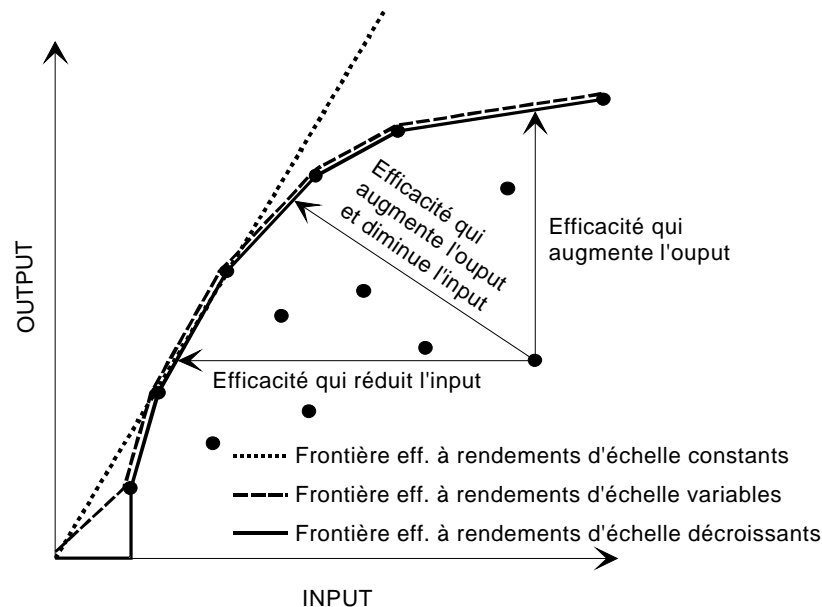


Figure 3 : Frontière efficace

Les développements récents de la DEA prennent en compte l'impact environnemental des activités analysées et considèrent que ces dernières produisent en plus des **outputs désirables** un ensemble d'outputs qualifiés d'**indésirables** (émissions nocives, déchets, pollutions).

Une première proposition consiste à décomposer le problème en étudiant séparément l'efficacité productive de l'efficacité environnementale. L'efficacité productive fait alors référence à la frontière de production conventionnelle exprimant la relation optimale entre inputs et outputs désirables. L'efficacité environnementale, en revanche, est établie dans l'espace des outputs seulement, sur la base d'une frontière de production où les outputs indésirables jouent le rôle d'inputs et les outputs désirables ceux d'outputs. Ces deux efficacités peuvent à leur tour être combinées dans une mesure plus globale de l'efficacité, en envisageant les efficacités productive et environnementale comme deux outputs d'une activité productive utilisant un input unitaire et en recherchant l'efficacité productive de cette activité virtuelle.

Une seconde approche, qui autorise une analyse plus approfondie des causes de l'efficacité environnementale et, partant, semble mieux adaptée à l'intégration de la problématique du développement durable, prend en considération simultanément les inputs et les deux types

d'outputs. Différentes mesures globales de l'efficacité basées sur la méthode DEA peuvent alors être envisagées⁴, notamment :

- par une réduction de l'utilisation des inputs seulement, les quantités d'outputs (désirables et indésirables) restant inchangées;
- en assimilant les outputs indésirables à des inputs et en recherchant la réduction des inputs et des outputs indésirables, la production d'outputs désirables étant gardée fixe ;
- en assimilant les outputs désirables à des inputs et en recherchant la réduction des outputs indésirables, les inputs et les outputs désirables étant contrôlés ;
- par l'augmentation de la production d'outputs désirables, les inputs et les outputs indésirables étant fixés.

Des mesures généralisées de l'efficacité peuvent aussi être envisagées en recherchant simultanément à réduire les inputs et les outputs indésirables et à augmenter les outputs désirables.

La mesure des performances environnementales d'unités de production basée sur le concept d'efficacité productive peut s'appliquer également pour positionner d'autres unités, par exemple des pays, par rapport à la meilleure pratique observée. Dans le contexte du développement durable, il faut, en plus des dimensions environnementales et économiques, intégrer la dimension sociale. Il est possible de le faire par des méthodes équivalentes, c'est-à-dire que les paramètres sociaux seraient traités comme les paramètres environnementaux. Cette démarche n'est toutefois admissible que pour des unités ou pays présentant un niveau de développement comparable. De même que l'efficacité productive ne permet pas de comparer des unités de production utilisant des technologies différentes on ne saurait définir une même frontière pour un pays très pauvre et un pays riche. Pour des niveaux de développement socio-économique très différents il conviendra dès lors de définir des frontières différentes.

Des travaux actuellement en cours proposent d'utiliser la DEA comme procédure d'agrégation des divers indicateurs qui composent l'Indice du Développement Humain (IDH) calculé par le Programme des Nations Unies pour le Développement. L'IDH est une somme pondérée d'indicateurs individuels très divers (PNB par habitant, espérance de vie, taux d'alphabétisation, émissions de CO₂, etc.). Il dépend de manière cruciale du choix des pondérations, ce qui le rend politiquement sensible et qui comporte un risque de manipulations. Dans ce contexte la méthode DEA présente l'avantage de fournir un indice composite dont les pondérations sont déterminées de manière endogène par la méthode⁵.

⁴ Voir notamment KORHONEN ET LUPTACIK (2000), TYTECA (1996), ALLEN (1999) et DYCKHOFF ET ALLEN (2001).

⁵ Une discussion des premiers résultats de ces travaux est donnée dans MAHLBERG ET OBERSTEINER (2001).

2.4 Les méthodes multicritères

Approcher le développement durable dans toute sa globalité implique la définition de critères et d'objectifs souvent conflictuels et non commensurables. Une analyse comparative des performances dans l'espace et dans le temps doit être à même d'intégrer de tels critères et objectifs.

Les méthodes multicritères d'aide à la décision ont précisément été développées pour traiter des problèmes à objectifs multiples tout en considérant des critères très divers et souvent antagonistes. Comme leur nom l'indique ces méthodes se sont développées pour aider le décideur à affiner son processus de décision en examinant la cohérence et la logique de ses préférences. Elles s'utilisent également pour allouer des ressources ou pour planifier des projets.

Ces méthodes ont par ailleurs également prouvé leur pertinence en analyse comparative, c'est-à-dire pour le classement de performances globales lorsque les entités concernées poursuivent des missions complexes pouvant présenter des aspects contradictoires, ce qui plaide en faveur de leur utilisation pour comparer des performances en termes de développement durable. Les méthodes d'analyse multicritère sont nombreuses et diverses. Elles se distinguent dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information. Toutes comportent quatre grandes étapes, dont les trois premières sont communes à toutes les méthodes et ne présentent que de faibles variations⁶. Ces étapes sont les suivantes:

- **dresser la liste des actions potentielles**
- **dresser la listes des critères à prendre en considération**

Ces critères découlent des conséquences des actions et ils permettent au décideur d'exprimer ses préférences. La définition des différents types de critères fait appel aux notions d'indifférence, de préférence stricte, de préférence faible ou de non-comparabilité. L'ensemble des critères devra former une famille cohérente c'est-à-dire respecter des exigences d'exhaustivité, de cohésion et de non-redondance (ROY, 1985). De nombreuses méthodes demandent d'affecter des poids ou coefficients d'importance aux différents critères.

⁶ Pour une introduction succincte aux méthodes multicritères d'aide à la décision voir BEN MENA (2000) et pour présentation détaillée des différentes méthodes voir ROY (1985) et MAYSTRE, PICTET ET SIMOS (1994).

- **établir le tableau des performances (ou matrice d'évaluation)**

Ce tableau renferme l'ensemble des évaluations de chaque action selon chaque critère ainsi que des informations complémentaires tels que des seuils et des poids éventuels.

- **agréger les performances**

Il s'agit d'établir le modèles des préférences globales sur l'ensemble des actions potentielles. Les méthodes d'agrégation présentent une grande diversité, et leur choix dépendra des exigences de l'utilisateur. Trois approches opérationnelles peuvent être distinguées, soit :

- L'approche du critère unique de synthèse évacuant toute non-comparabilité (**agrégation complète**). Elle suppose que tous les jugements soient commensurables et transitifs.
- L'approche du sur-classement de synthèse acceptant la non-comparabilité et l'intransitivité (**agrégation partielle**). Dans cette approche la technique consiste à comparer les actions deux à deux et à vérifier si, selon certaines conditions, l'une des deux actions surclasse l'autre ou pas. A partir de toutes ces comparaisons on tente ensuite de réaliser une synthèse. Les méthodes d'agrégation partielles se différencient par leur façon de réaliser ces deux étapes. Ces méthodes d'agrégation partielle peuvent couvrir aussi bien des problèmes de choix, de tri ou de classement d'actions. Elles ont donné lieu à de très nombreuses applications dans le domaine de la gestion de l'environnement.
- L'approche du jugement local interactif avec itération essai-erreur (**agrégation locale et itérative**). Cette technique s'applique à des ensembles d'actions potentielles très grands, voire infinis lorsque les actions varient en continu. Partant d'une solution de départ on cherche dans son voisinage s'il n'y en a pas de meilleure et ce de manière répétitive.

La figure 4 qui suit, tirée de MAYSTRE, PICTET ET SIMOS (1994), présente les méthodes et à quelles approches elles s'attachent.

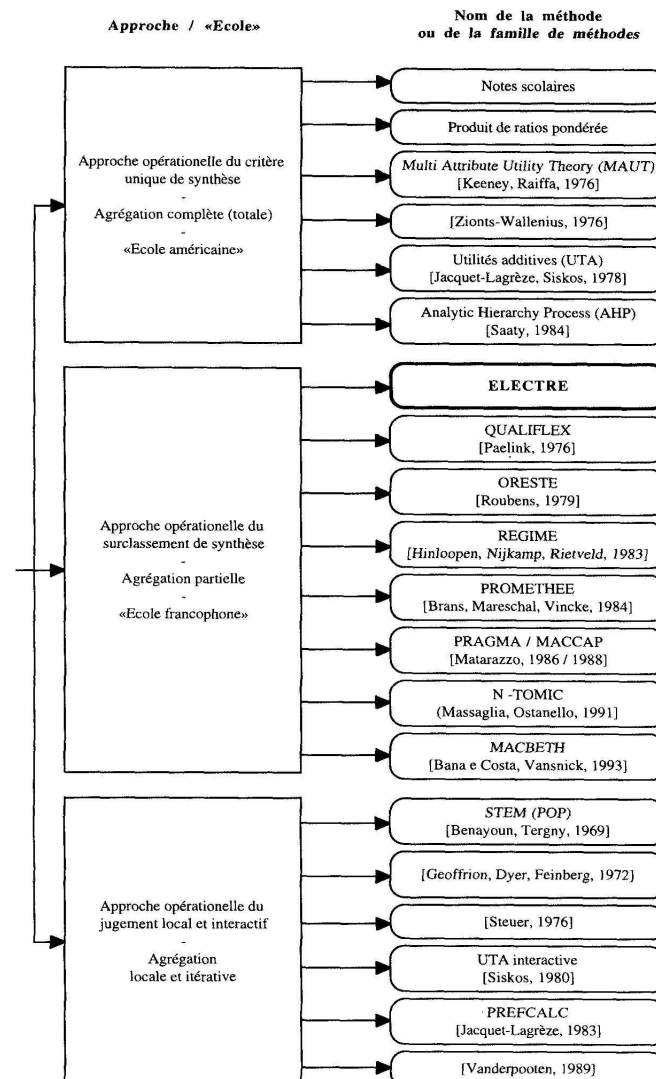


Figure 4 : Approches opérationnelles et méthodes

La figure illustre le foisonnement des méthodes multicritères dont certaines comportent de nombreuses variantes. Cette abondance pose le problème du choix de la méthode adéquate, choix qui dépendra évidemment du type de résultats souhaité et de la qualité et de la quantité de l'information disponible. ROUSSEAU ET APOSTOL (2000) rappellent par ailleurs que le choix de la méthode adéquate est lié à la manière dont les critères interagissent entre eux. Ils proposent trois notions qui permettent d'appréhender cette interaction et de faciliter le choix de la méthode. Ces trois notions sont :

- Le **choix d'un type de compensation** c'est-à-dire de la manière dont une mauvaise évaluation dans un critère peut être compensée ou non par une bonne évaluation dans un autre critère. L'agrégation globale est l'exemple type d'une méthode fortement compensatoire, ce qui n'est pas le cas pour les méthodes d'agrégation

partielle qui sont des méthodes non compensatoires. Pour ce qui concerne l'environnement et a fortiori le développement durable, les méthodes compensatoires ne conviennent pas, car elles permettraient de compenser, par exemple, un impact grave sur l'environnement par une bonne performance économique.

- **Le choix primordial des coefficients de pondération.** Les acteurs, concernés par les problèmes du développement durable, sont d'accord pour dire que tous les impacts n'ont pas le même poids, cependant l'obtention d'un consensus autour des poids relatifs est souvent difficile. Dans le domaine de l'environnement, différentes procédures ont été proposées pour établir ces poids: tenir compte de l'opinion publique à l'aide de sondage, tenir compte de l'état bio-physico-chimique ou recourir à une approche économique consistant à choisir les coefficients en fonction du coût sociétal de la pollution. Mais quelle que soit l'approche choisie, une part de subjectivité est inhérente au choix des coefficients de pondération. « L'important reste cependant de pouvoir identifier clairement la part de subjectivité et la part d'objectivité. » (ROUSSEAU ET APOSTOL, 2000).
- **L'indépendance des critères.** Si certains critères interagissent sur la décision finale, il faut trouver une solution permettant de tenir compte de cette interaction. Une solution envisageable consiste à agréger les critères interactifs par une méthode d'agrégation globale prenant en compte les interactions (voir la section 2.1).

Par leur caractère non compensatoire et leur capacité à intégrer des performances non-comparables et intransitives les méthodes d'agrégation partielle sont le mieux adaptées pour des problématiques de développement durable.

Parmi ces méthodes d'agrégation partielle le choix d'une méthode particulière ou d'une de ses variantes dépend de la problématique et des informations disponibles. Ces méthodes se classent selon trois grandes problématiques:

- **choix de l'action** ou de l'ensemble d'actions le plus adéquat. Pour ce problème de décision on aura recours à la méthode Electre I et à ses variantes. Electre I transforme les performances en notes, Electre Iv utilise les vraies valeurs munies d'un veto et Electre Is définit des seuils de préférence et d'indifférence pour chaque critère.
- effectuer un **tri des actions**, c'est à dire scinder les actions en des classes définies à l'avance. La Trichotomie de Moscorola et Roy trie les actions en bonnes, douteuses et mauvaises, tandis que Electre TRI permet de traiter un nombre plus élevé de classes.
- **classer les actions** et les regrouper en classes d'équivalence qui ne sont pas préalablement définies. En présence de pondérations des critères on appliquera Electre II, tandis que Electre III permet d'intégrer des notions floues et d'effectuer un surclassement avec un indice de crédibilité. En l'absence de pondérations des

critères on aura recours à Electre IV. D'autres méthodes permettent d'intégrer des valeurs ordinales pour les critères (Qualiflex ou Oreste) ou de remplacer le surclassement par une notion de préférence large (Prométhée).

3 Applications

3.1 Calcul d'un indice composite de développement durable pour le chauffage résidentiel

Nous illustrons l'application de la méthodologie des indices composites d'indicateurs décrite au chapitre précédent par la présentation d'un indice de développement durable du chauffage résidentiel récemment proposé par FERRARI, GENOUD ET LESOURD (2001).

Pour délimiter le champ de l'indice et les indicateurs à prendre en considération, les auteurs s'appuient sur l'interprétation des processus de production de Georgescu-Roegen, basée sur la seconde loi de la thermodynamique ou loi de l'entropie. Selon cette interprétation, les processus de production changent des ressources naturelles (énergie et matière) en produits et déchets. La production jointe de déchets, sous forme d'énergie et de matière qui n'ont plus d'utilité économique parce que disponibles dans l'environnement sous une forme dissipée, caractérise la non-durabilité du processus. Dans ces conditions, il est possible de mesurer le degré de durabilité d'un processus de production par sa capacité à éviter les déchets.

S'agissant de mesurer la durabilité d'un processus de production qui transforme des sources d'énergie primaire en énergie de confort thermique pour des locaux résidentiels, les déchets générés par le processus de production sont les rejets de chaleur dans l'environnement produits par le système de chauffage utilisé. Ces rejets de chaleur sont la manifestation physique de l'accroissement d'entropie de l'environnement, que l'on peut mesurer à travers la dégradation qualitative de l'énergie transformée dans le processus de production exprimée en termes d' **exergie**, soit d'après la quantité maximale de travail mécanique que peut fournir la source d'énergie.

Un indicateur mesurant cette dégradation qualitative d'une source d'énergie peut être défini par le rapport suivant, appelé **rendement exergétique** du système qui transforme l'énergie :

$$\Psi = \frac{W}{E}$$

où W désigne l'exergie disponible dans l'énergie de confort thermique produite par le système et E l'exergie disponible dans la source d'énergie utilisée par le système. D'après cet indicateur, le système de chauffage est durable si $\Psi = 1$ et non durable si $\Psi < 1$. Le premier cas traduit la réversibilité du processus de production alors que le second exprime son irréversibilité, due à l'existence de pertes exergétiques non récupérables. Dès lors, ce rendement exergétique peut être vu comme un indice normatif visant à évaluer la durabilité

du processus de production par référence à un objectif d'exploitation sans gaspillages des ressources énergétiques rares, comme les énergies fossiles.

Le calcul de l'exergie d'une source d'énergie fossile se fait en appliquant le coefficient d'efficacité de Carnot au contenu en chaleur ou enthalpie de la source envisagée, soit par la formule :

$$E = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right)$$

où Q est la quantité de chaleur fournie par la combustion de la source d'énergie fossile pendant le processus de production, T_1 la température de combustion de la source d'énergie (source chaude) et T_0 celle de l'environnement (source froide). Ainsi, le contenu exergétique, donc la productivité économique, d'une énergie fossile est d'autant plus grand que sa température de combustion est élevée. La situation extrême où $T_1 = \infty$ définit la forme d'énergie de productivité maximale, identifiée à l'électricité. Une telle source d'énergie peut être transformée en travail incorporé au produit sans donner lieu à des rejets de chaleur dans l'environnement. Le calcul du contenu en exergie W de l'énergie de confort produite, se fait par la même formule, en envisageant toutefois la quantité Q de chaleur transmise aux surfaces chauffées et la température T_1 à laquelle sont chauffés les locaux résidentiels.

Dans l'optique du développement durable, si la source d'énergie primaire utilisée est renouvelable, l'objectif de conservation de la ressource par réduction des pertes exergétiques n'est plus de mise. En effet, l'approvisionnement permanent qu'assure une énergie renouvelable confère au processus de production le caractère d'un processus réversible. L'agrégation de sources d'énergie primaire non renouvelables avec des sources renouvelables doit donc être réalisée en attribuant une valeur unitaire à l'indicateur de développement durable qui caractérise ces dernières.

Sur la base de ces considérations, les auteurs susmentionnés proposent l'indice composite suivant, pour mesurer le degré de durabilité du chauffage résidentiel d'un ensemble d'habitations utilisant des systèmes de chauffage qui diffèrent tant par la source d'énergie primaire utilisée que par la technologie de chauffage employée :

$$\Phi = \frac{\sum_u \Phi_u E_u}{\sum_u E_u} = \sum_u \omega_u \Phi_u$$

où l'on pose $\Phi_u = \Psi_u$ pour une source énergétique non renouvelable et $\Phi_u = 1$ pour une source renouvelable. Cet indice est une moyenne pondérée des indicateurs de développement des différents systèmes de chauffage utilisés, à savoir : le rendement exergétique du système de chauffage si celui-ci est alimenté par une énergie non renouvelable et une valeur unitaire, traduisant la durabilité du système, s'il utilise uniquement une source d'énergie renouvelable. Quant aux coefficients de pondération ω_u ils expriment simplement la part de l'exergie

consommée par chaque système de chauffage dans le contenu exergétique de l'agrégat des énergies primaires utilisées.

Pour évaluer le degré de durabilité du chauffage du parc d'immeubles résidentiels du canton de Genève, les auteurs de l'indice ont retenu les dix systèmes de chauffage suivants :

1. Combustion directe dans une chaudière
2. Chauffage électrique direct utilisant de l'électricité d'origine thermique
3. Chauffage électrique direct utilisant de l'électricité d'origine hydraulique
4. Chauffage électrique direct utilisant de l'électricité d'origine nucléaire
5. Chauffage électrique direct utilisant de l'électricité d'origine « mix-suisse » (2,34% d'origine thermique, 40,05% d'origine nucléaire, 57,61% d'origine hydraulique)
6. Pompe à chaleur utilisant de l'électricité d'origine thermique
7. Pompe à chaleur utilisant de l'électricité d'origine hydraulique
8. Pompe à chaleur utilisant de l'électricité d'origine nucléaire
9. Pompe à chaleur utilisant de l'électricité d'origine « mix-suisse »
10. Cogénération fonctionnant au gaz ou au mazout

Le tableau 1 qui suit présente le rendement exergétique Ψ et le degré de durabilité Φ correspondant à chacun de ces systèmes de chauffage. Les rendements exergétiques sont calculés sur la base d'hypothèses présentées en détail dans FERRARI, GENOUD ET LESOURD (2001). Ces rendements exergétiques mesurent aussi le degré de durabilité du système de chauffage lorsque celui-ci utilise seulement une source d'énergie non renouvelable. Lorsque la source d'énergie primaire est entièrement renouvelable le système de chauffage est assimilé à un système réversible avec un degré de durabilité égal à 100%. Le degré de durabilité d'un chauffage utilisant un mélange d'énergies renouvelables et non renouvelables se calcule comme la moyenne pondérée des degrés de durabilité caractéristiques de ce mode chauffage lorsqu'il est alimenté entièrement par l'une des sources d'énergie primaire du mélange. C'est le cas du chauffage électrique direct et de la pompe à chaleur alimentés par de l'électricité d'origine « mix-suisse ». Le degré de durabilité de ces modes de chauffage se calcule donc à partir des degrés de durabilité des systèmes de chauffage 2, 3 et 4, pour le chauffage électrique direct, respectivement 6, 7 et 8, pour la pompe à chaleur, en utilisant les parts de l'électricité d'origine hydraulique, thermique et nucléaire dans le « mix-suisse ».

Tableau 1 : Rendement exergétique Ψ et degré de durabilité Φ des systèmes de chauffage

Système de chauffage	Ψ %	Φ %
1	5.44	5.44
2	2.72	2.72
3	5.04	100.00
4	1.76	1.76
5	3.67	3.67
6	5.68	5.68
7	10.24	100.00
8	3.60	3.60
9	7.47	59.19
10	6.56	6.56

On constate qu'une durabilité à long terme du chauffage résidentiel du canton de Genève ne serait assurée qu'avec les systèmes de chauffage pouvant utiliser, comme source d'énergie primaire, l'hydroélectricité, soit le chauffage électrique et la pompe à chaleur. Alimentés avec l'électricité consommée actuellement en Suisse, la durabilité de ces systèmes de chauffage tombe à moins de 60%, en raison de l'importance de l'électricité d'origine nucléaire dans l'approvisionnement électrique suisse. Quant aux systèmes de chauffage utilisant une source d'énergie non renouvelable, leur degré de durabilité, égal au rendement exergétique, se situe à un niveau très bas, dans une fourchette variant entre un minimum de 1,76% (chauffage électrique direct avec électricité d'origine nucléaire) et un maximum de 6,56% (cogénération fonctionnant au gaz ou au mazout).

3.2 Analyse statistique des possibilités d'agrégation des indicateurs énergétiques de l'Agence internationale de l'énergie

Dans cette section, nous illustrons la méthode d'agrégation statistique des indicateurs de développement durable présentée sous 2.2 par une application aux indicateurs d'usage et d'efficacité de l'énergie élaborés par l'Agence internationale de l'énergie (IEA,1997). L'objectif de notre application est de mettre en évidence les groupes d'indicateurs pouvant faire l'objet d'une agrégation en raison d'une similitude de leur évolution statistique dans le temps. Notre application se limite à détecter les indicateurs susceptibles d'un regroupement sans toutefois proposer un indice composite particulier en vue de leur agrégation.

Nous avons retenu 27 indicateurs énergétiques observés pour quatre pays (Allemagne, États-Unis, France et Japon) sur une base annuelle de 1973 à 1992. Cette information se présente donc sous la forme d'une suite de 19 matrices annuelles, contenant chacune les

valeurs des 27 indicateurs pour les 4 pays considérés. La figure 5 ci-après illustre la structure tridimensionnelle de cette information :

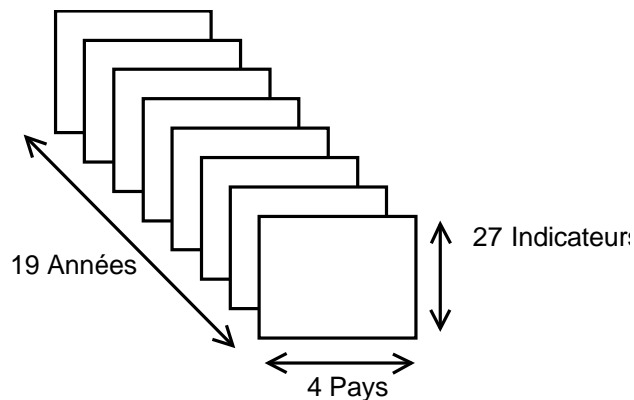


Figure 5 : Structure tridimensionnelle des données de l'AIE

S'agissant de la nature des indicateurs envisagés, nous en présentons ci-dessous leur définition dans leur terminologie anglo-saxonne originale :

1. Car ownership (cars/1000 inhabitants)
2. Car distance driven per capita (1000 vehicle km/capita)
3. Car fuel intensity (l gasoline/100km)
4. Modal energy intensity of car travel (MJ/passenger-km)
5. Aggregate energy intensity for travel (MJ/pkm)
6. Domestic travel intensity of GDP (Pass-km/\$ 1985)
7. Car fuel cost per kilometre (fuel cost/km, 1985 US\$)
8. Energy intensities of trucking (MJ per tonne-km)
9. Aggregate modal intensity of freight (MJ/tonne-km)
10. Truck fuel price
11. Freight energy to GDP (MJ/US \$ (1985))
12. Household light fuel oil prices (US\$/GJ at 1985)
13. Household natural gas prices (US\$/GJ at 1985)
14. Household electricity prices (US\$/GJ at 1985)
15. CO2 emissions from households (kg of C/GJ of primary energy)
16. Electricity intensity: consumption per unit of service sector GDP (MJ/US\$ 1980)
17. Services primary energy use per unit of total GDP (MJ/US\$ 1980)
18. Per capita CO2 emissions from service sector energy use (kgC/capita)
19. Manufacturing output (GDP) per capita (US\$ '000/capita)
20. Energy intensities of steel production (GJ(final) /tonne)
21. Aggregate intensity of delivered energy in manufacturing (MJ/1980 US\$)
22. Impact of structural change on delivered energy use (1973 delivered energy = 100)
23. Impact of intensity change on delivered energy use (1973 delivered energy = 100)
24. Final manufacturing energy per total GDP (MJ/1980 US\$)
25. Industrial heavy fuel oil prices (1980 US\$/GJ)

- 26. Industrial electricity prices (1980 US\$/GJ)
- 27. CO₂ emissions per unit of primary energy use ('000 of C/PJ)

En suivant la démarche proposée par ANTILLE (2001), nous avons calculé, dans une première étape, la moyenne temporelle de ces matrices dans le but d'établir une matrice compromis visant à dégager un nombre réduit de variables latentes expliquant « au mieux » les disparités entre les quatre pays considérés en matière d'usages et d'efficacité de l'énergie. Ces variables latentes ont été déterminées par une analyse en composantes principales effectuée sur les valeurs centrées (sur la moyenne des pays) et réduites (rapportées à l'écart-type entre pays) des 27 indicateurs de la matrice compromis. Les variables latentes retenues sont les deux premières composantes principales de la matrice compromis centrée et réduite. La première de ces variables explique 62,65% de la variabilité spatiale des valeurs compromises des indicateurs ; elle oppose les États-Unis et l'Allemagne au Japon et la France. La deuxième en explique le 22,47%, en opposant, cette fois, les États-Unis et le Japon à l'Allemagne et la France. A eux seuls, ces deux facteurs latents expliquent donc 85% des disparités entre pays, en moyenne temporelle.

Dans une deuxième étape, nous avons procédé, pour chaque indicateur de développement durable envisagé, à la projection de chacune de ses observations annuelles sur les deux axes définis par les deux premières composantes principales susmentionnées. Cette transformation des observations spatio-temporelles des indicateurs a pour but de faire apparaître les trajectoires temporelles de chaque indicateur dans l'espace des facteurs latents les plus discriminants entre pays, en matière d'usages et d'efficacité de l'énergie.

Le figures suivantes présentent les trajectoires temporelles ainsi obtenues pour différents indicateurs. Les deux premières (figures 6 et 7) illustrent l'évolution temporelle de ces projections sur les axes des deux premières composantes principales compromises pour les indicateurs 2 (Car distance driven per capita), 16 (Electricity intensity of services sector per unit of total GDP) et 27 (CO₂ emissions per unit of primary energy use). La troisième (figure 8), présente les trajectoires d'évolution de ces projections dans le plan cartésien défini par ces deux axes pour ces mêmes trois indicateurs.

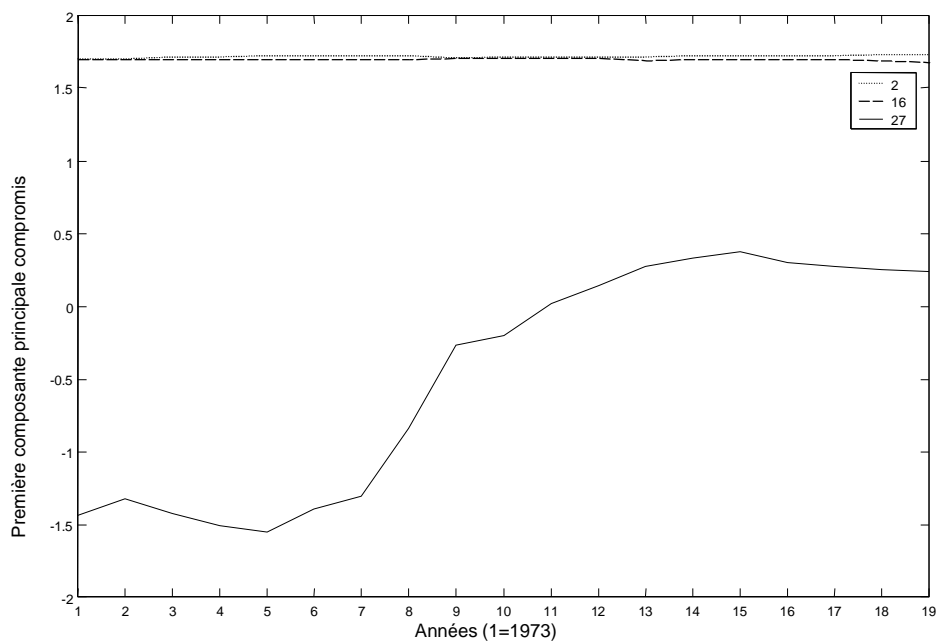


Figure 6 : Trajectoires d'indicateurs de l'AIE projetés sur l'axe de la première composante principale compromis

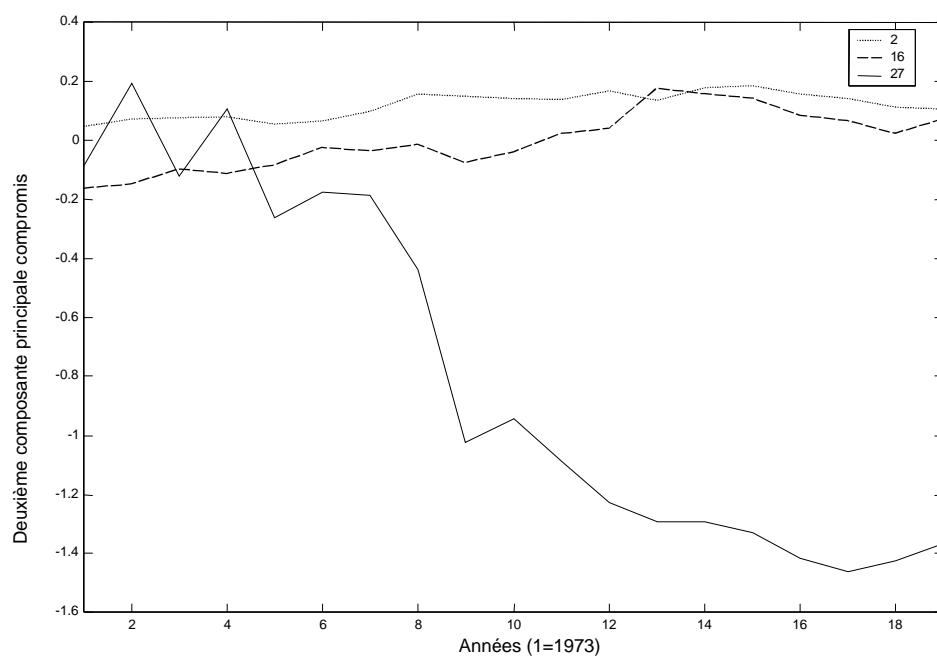


Figure 7 : Trajectoires d'indicateurs de l'AIE projetés sur l'axe de la deuxième composante principale compromis

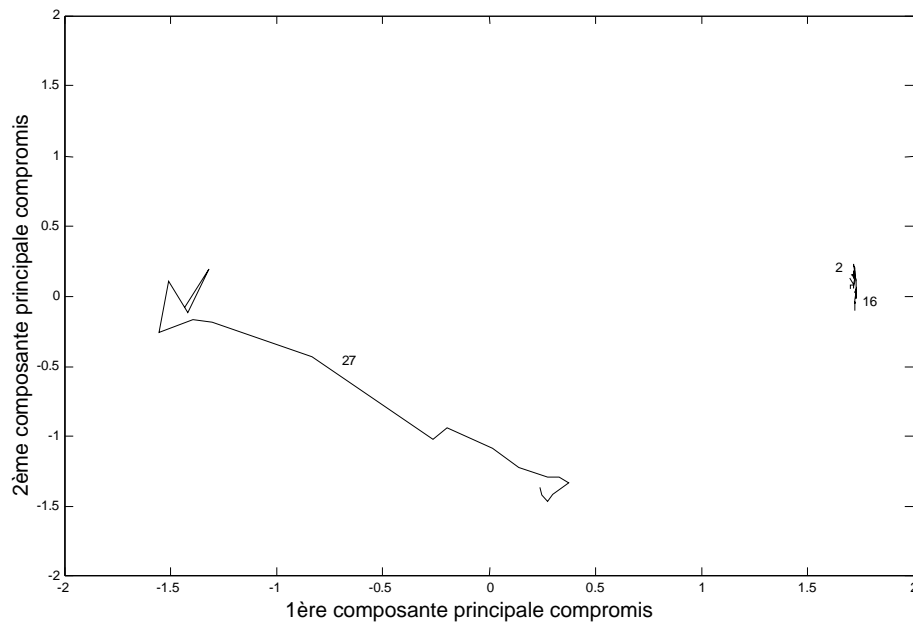


Figure 8: *Trajectoires des indicateurs de l'AIE projetés dans le plan des deux premières composantes principales compromises*

Dans la troisième et dernière étape de la méthode, on procède à la comparaison de ces trajectoires afin de détecter les groupes de trajectoires semblables, justifiant un regroupement des indicateurs correspondants en vue d'une agrégation. Ainsi, l'analyse visuelle des figures 6 et 7 montre une grande proximité des trajectoires des indicateurs 2 et 16, qu'il s'agisse de leur projection sur chacun des axes ou sur le plan des deux premières composantes principales. La trajectoire de l'indicateur 27, en revanche, se démarque très clairement de celle des indicateurs 2 et 16.

ANTILLE (2001) propose de réaliser un tel regroupement à l'aide d'une procédure de classification hiérarchique ascendante. Cette démarche procède à un regroupement par étapes des couples d'indicateurs dont les trajectoires sont proches, la proximité entre deux trajectoires étant mesurée par leur distance euclidienne dans l'espace de projection retenu.

Pour illustrer cette procédure, considérons les distances entre les 5 trajectoires A, B, C, D et E présentées dans la matrice suivante :

Tableau 2 : matrice de distances entre trajectoires

	A	B	C	D	E
A	0				
B	7.4	0			
C	7.56	8.62	0		
D	5.01	6.03	12.47	0	
E	12.43	6.55	4.66	9.28	0

La procédure de classification retenue débute par le choix du couple de trajectoires à distance minimale, dans notre exemple le couple (C,E), pour lequel la distance est de 4,66. La procédure est poursuivie par la fusion de ce couple de trajectoires à distance minimale en une trajectoire unique dont la distance avec les autres trajectoires est évaluée par la plus petite des distances des deux trajectoires fusionnées. Cette opération conduit à une nouvelle matrice de distances entre les trajectoires A, B, D et la trajectoire fusionnée CE, présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : matrice de distances entre trajectoires fusionnées

	C,E	A	B	D
C,E	0			
A	7.56	0		
B	6.55	7.4	0	
D	9.28	5.01	6.03	0

Dans cette nouvelle matrice de trajectoires fusionnées, on recherche à nouveau le couple de trajectoires à distance minimale, soit le couple (A,D), que l'on fusionne à son tour en une trajectoire unique de distance égale à 6,03 avec la trajectoire B et à 7,56 avec la trajectoire fusionnée C,E. Cette procédure de fusion progressive des trajectoires est poursuivie jusqu'à l'obtention d'une trajectoire unique, ce qui donne, dans notre exemple, la succession de regroupements visualisée par le diagramme suivant (figure 9), appelé **arbre de classification**. Ce diagramme représente la valeur de la distance entre deux trajectoires regroupées, appelée indice de proximité, par la hauteur de la branche qui les unit. Par cette hauteur, le diagramme fait ressortir les groupes de trajectoires pouvant faire l'objet d'agrégation, en raison de leur faible distance.

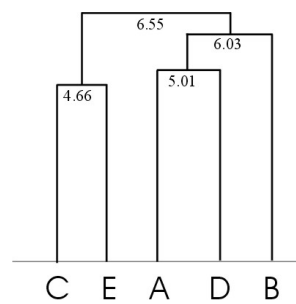


Figure 9 : Arbre de classification des trajectoires du tableau 2

L'application de cette procédure de classification hiérarchique aux trajectoires des indicateurs de l'AIE projetés sur l'axe de la première composante principale compromis conduit à l'arbre de classification suivant (figure 10) :

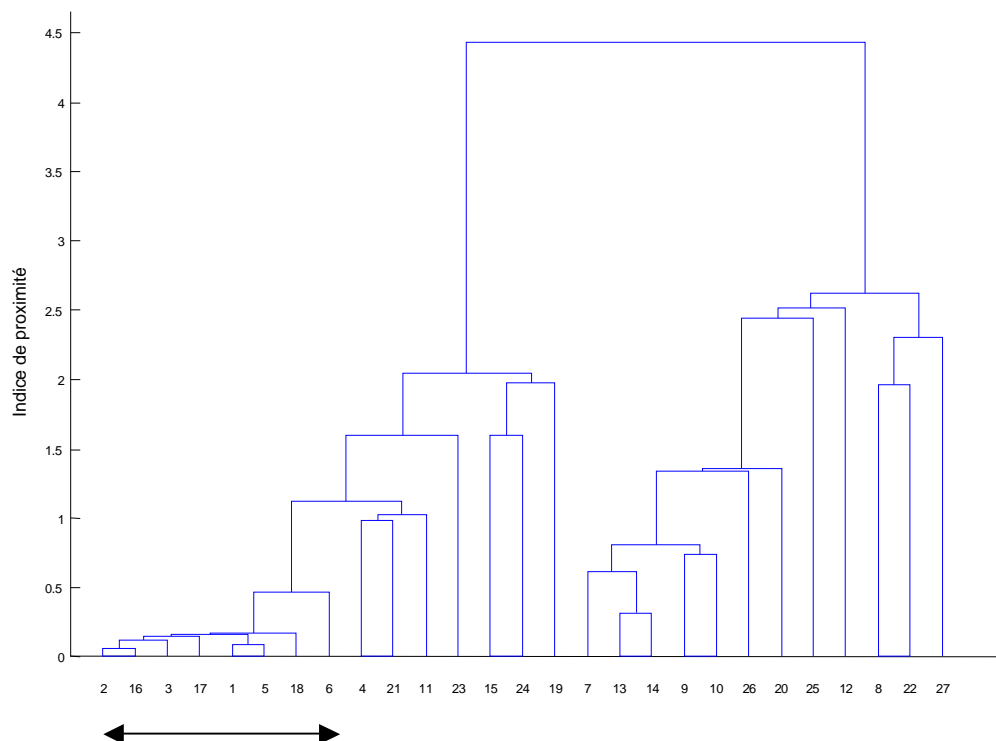


Figure 10 : Arbre de classification des trajectoires des indicateurs de l'AIE projetés sur l'axe de la première composante principale compromis

Ce diagramme fait apparaître un groupe de 8 trajectoires qui présentent un indice de proximité très faible, justifiant leur agrégation. Il s'agit, dans l'ordre d'apparition dans le diagramme, des trajectoires des indicateurs suivants :

- 2 - Car distance driven per capita (1000 vehicle km/capita)
- 16 - Electricity intensity: consumption per unit of service sector GDP (MJ/US\$ 1980)
- 3 - Car fuel intensity (l gasoline/100km)
- 17 - Services primary energy use per unit of total GDP (MJ/US\$ 1980)
- 1 - Car ownership (cars/1000 inhabitants)
- 5 - Aggregate energy intensity for travel (MJ/pkm)
- 18 - Per capita CO2 emissions from service sector energy use (kgC/capita)
- 6 - Domestic travel intensity of GDP (Pass-km/\$ 1985)

Ce regroupement est confirmé par les résultats de l'application de la procédure de classification hiérarchique aux trajectoires des indicateurs projetés, tant sur l'axe de la deuxième composante principale compromise, que dans le plan des deux premières composantes principales compromises. Ces analyses conduisent, en effet, aux arbres de classification suivants (figure 11 et 12), faisant ressortir, pour les 8 indicateurs précédents, des trajectoires présentant les indices de proximité les plus faibles.

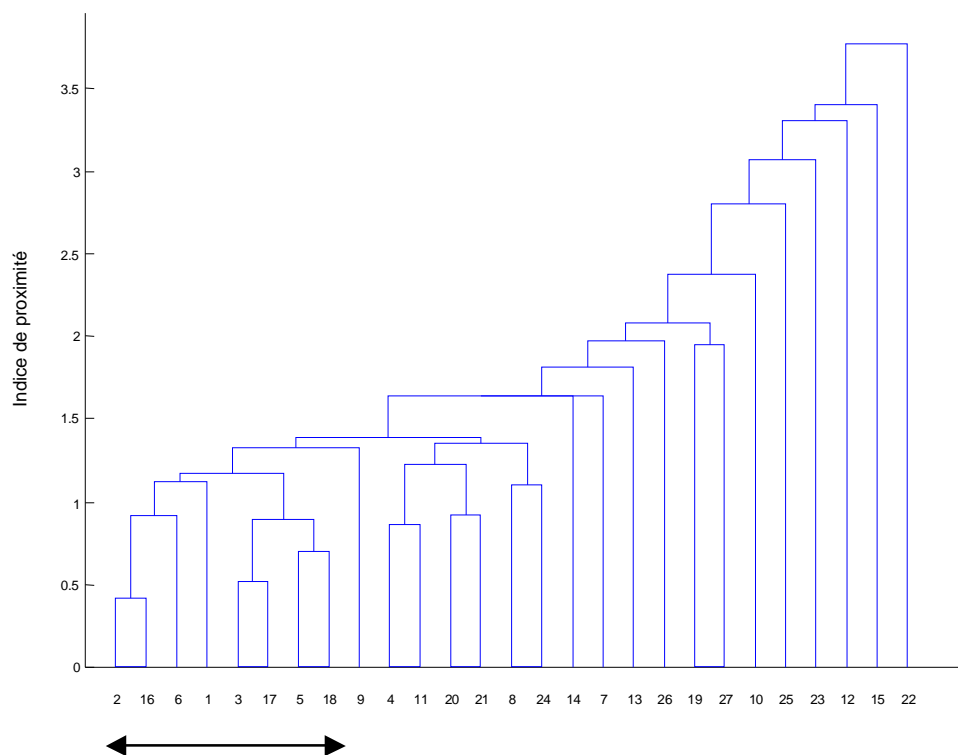


Figure 11 : Arbre de classification des trajectoires des indicateurs de l'AIE projetés sur l'axe de la deuxième composante principale compromise

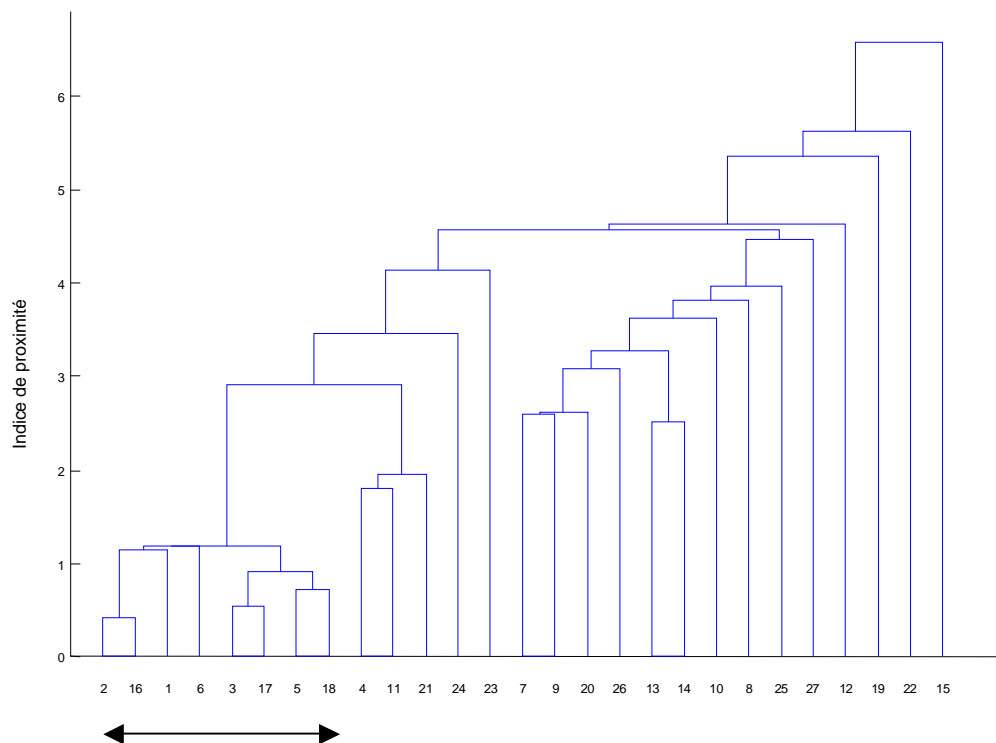


Figure 12 : Arbre de classification des trajectoires des indicateurs de l'AIE projetés dans le plan des deux premières composantes principales compromises

Notons, pour conclure, que l'arbre de classification des trajectoires projetées sur l'axe de la première composante principale compromise (figure 10), fait ressortir une partition des indicateurs en deux groupes dont la distance inter-groupes est deux fois plus grande que les distances intra-groupe. Le premier groupe (indicateurs 2 à 19 dans l'ordre d'apparition sur l'axe horizontal de la figure 10) assemble des indicateurs d'activité et de consommation énergétique alors que le second (indicateurs 7 à 27 dans l'ordre d'apparition sur l'axe horizontal de la figure 10) regroupe tous les indicateurs de prix et de coût avec certains indicateurs physiques. L'interprétation de ces résultats mériterait d'être approfondie.

3.3 Analyse de l'efficacité environnementale d'un ensemble de pays par la méthode DEA

Pour illustrer l'utilisation de la DEA pour établir un benchmarking incluant aussi bien des activités économiques et que leurs impacts environnementaux nous avons retenu le modèle proposé par TYTECA (1999).

Ce modèle retient la distinction entre outputs désirables et outputs indésirables, en postulant une disponibilité forte pour les outputs désirables, c'est-à-dire la possibilité de produire moins avec la même quantité d'inputs. Par contre les outputs indésirables sont supposés faiblement disponibles, c'est-à-dire qu'une diminution des outputs indésirables implique nécessairement une augmentation des inputs ou une réduction des outputs désirables.

Si l'on s'intéresse spécifiquement à l'efficacité environnementale, ces hypothèses justifient que l'on envisage les outputs désirables comme des inputs utilisés dans la production des outputs indésirables. Pour mesurer l'efficacité environnementale, il convient alors d'envisager la réduction proportionnelle des quantités d'outputs indésirables réalisable par une unité efficace utilisant les mêmes quantités d'inputs et produisant les mêmes quantités d'outputs désirables que l'unité analysée. Dans cette optique, on admet implicitement que l'efficacité productive ou technique, c'est-à-dire l'utilisation optimale des inputs pour atteindre un certain niveau des outputs désirables, est réalisée.

En pratique, la mesure de cette efficacité environnementale est réalisée par la résolution du problème de programmation linéaire suivant :

$$\begin{aligned} & \text{minimiser } \varepsilon \\ & \text{sous les contraintes : } \mathbf{x}_0 \geq \mathbf{X}\lambda, \mathbf{y}_0 \leq \mathbf{Y}\lambda, \varepsilon \mathbf{z}_0 \geq \mathbf{Z}\lambda, \lambda \geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

où:

$\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$ désignent, dans l'ordre, les vecteurs des quantités d'inputs, d'outputs désirables et d'outputs indésirables de l'unité analysée,

$\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ les matrices des vecteurs des quantités d'inputs, d'outputs désirables et d'outputs indésirables des unités de l'échantillon ,

λ le vecteur des niveaux d'activité figurant dans la combinaison linéaire d'unités de l'échantillon définissant l'unité efficace à laquelle l'unité analysée est comparée ,

ε le degré d'efficacité environnementale de l'unité analysée, mesuré d'après une échelle sans dimension croissante et comprise entre 0 et 1, soit $\varepsilon = 1$ pour une unité efficace et $\varepsilon < 1$ pour une unité inefficace.

Cette mesure d'efficacité repose sur une frontière de production qui admet des rendements d'échelle constants. Des mesures basées sur des frontières de production caractérisées par des rendements d'échelle décroissants ou variables s'obtiennent en ajoutant au programme linéaire précédent une contrainte linéaire supplémentaire sur les niveaux d'activité λ , à

savoir : $\mathbf{1}'\lambda \leq 1$, pour des rendements d'échelle décroissants, respectivement $\mathbf{1}'\lambda = 1$, pour des rendements d'échelle variables, où $\mathbf{1}'$ désigne le vecteur colonne unitaire transposé en ligne.

Pour illustrer cette méthode, nous avons eu recours à la base de données fournie par le rapport mondial sur le développement humain publié par le Programme de Nations Unies pour le développement (PNUD) dans laquelle nous avons sélectionné un ensemble d'indicateurs et de pays pour deux années de référence. Ce choix a été principalement dicté par la disponibilité des indicateurs pour les pays et les années considérés.

Les indicateurs retenus se réfèrent aux deux premières catégories définies par l'étude de WALTER ET AL. (2001), à savoir les "effets sur l'environnement, l'économie et la société" et "l'activité des groupes de consommateurs". Les données ne fournissent malheureusement pas d'éléments se rapportant aux deux autres catégories "rendement énergétique" et "mesures politiques". En l'absence de données suffisantes concernant spécifiquement le secteur énergétique nous avons également inclus deux variables portant sur les déchets et la consommation d'eau. Par ailleurs, certaines des variables doivent être considérées comme des approximations des indicateurs définis par WALTER ET AL.; ainsi, par exemple, la variable "consommation d'énergie commerciale" remplace l'indicateur "consommation d'énergie primaire".

Les indicateurs retenus sont donnés dans le tableau 4 suivant, les critères étant ceux de l'étude de WALTER ET AL. et les variables, celles du modèle de calcul de l'efficacité environnementale.

Tableau 4 : Indicateurs retenus

Indicateurs	Critères	Variables
effets sur l'environnement, l'économie et la société		
consommation d'énergie commerciale (en tonne équivalent pétrole par habitant)	Ressources	input
consommation d'eau (en m3 par habitant)	Ressources	input
combustible nucléaire irradié (en kg par 1000 habitants)	Radioactivité	output indésirable
émissions de CO2 (en tonne par habitant)	Climat	output indésirable
déchets ménagers (en kg par habitant)		output indésirable
taux de chômage (en %)	Stabilité	output indésirable
activité des groupes de consommateurs		
PIB (en \$ par habitant).	Facteur exogène	output désirable

Les pays sélectionnés sont:

Canada, Norvège, États-Unis, Japon, Belgique, Suède, Australie, Pays-Bas, Islande, Royaume-Uni, France, Suisse, Finlande, Danemark, Autriche, Nouvelle-Zélande, Irlande, Espagne, Grèce, Portugal et Hongrie. Les années de références sont 1991 et 1997⁷.

La matrice des données est présentée en annexe.

Les classements obtenus sont les suivants :

Tableau 5 : Classement des pays par degré d'efficacité environnementale selon la méthode DEA

1991	rang	degré d'efficacité	1997	rang	degré d'efficacité
Autriche	1	1.00	Autriche	1	1.00
Belgique	1	1.00	Danemark	1	1.00
Danemark	1	1.00	Irlande	1	1.00
France	1	1.00	Islande	1	1.00
Islande	1	1.00	Norvège	1	1.00
Portugal	1	1.00	Nouvelle-Zélande	1	1.00
Suède	1	1.00	Portugal	1	1.00
Suisse	1	1.00	Suède	1	1.00
Espagne	2	0.84	Suisse	1	1.00
Japon	3	0.84	Japon	1	1.00
Nouvelle-Zélande	4	0.79	Finlande	2	0.99
Royaume-Uni	5	0.68	Royaume-Uni	3	0.98
Finlande	6	0.65	Belgique	4	0.94
Norvège	7	0.63	Espagne	5	0.91
Pays-Bas	8	0.61	France	6	0.88
Canada	9	0.55	Pays-Bas	7	0.85
Irlande	10	0.55	États-Unis	8	0.84
États-Unis	11	0.51	Grèce	9	0.77
Australie	12	0.46	Australie	10	0.65
Grèce	13	0.45	Canada	11	0.62
Hongrie	14	0.41	Hongrie	12	0.33

Plus que le rang, dont le caractère informatif est limité, c'est le degré d'efficacité qui doit retenir l'attention. Pour l'année 1991 on distingue trois groupes de pays: les pays efficaces (degré d'efficacité égal à un), les pays présentant un potentiel d'amélioration moyen (degré d'efficacité compris entre 0.6 et 1) et les pays à fort potentiel d'amélioration (degré d'efficacité inférieur à 0.6). Ainsi, par exemple, le degré d'efficacité de 0.51 des États-Unis indique qu'ils pourraient réduire de moitié leurs impacts sur l'environnement tout en atteignant le même niveau de PIB par habitant (output) et en utilisant les mêmes quantités de ressources.

⁷ Pour certains indicateurs le rapport du PNUD ne fournit pas l'observation de l'année de référence, mais celle de l'année précédente voire une évaluation moyenne pour une période de quelques années. C'est pourquoi, nous avons retenu ces deux années de référence pour une analyse de l'évolution dans le temps de l'efficacité environnementale des pays.

Les degrés d'efficacité obtenus pour l'année 1997 situent ces pays par rapport à la frontière de meilleure pratique de cette même année et ne doivent pas être mis en relation avec les degrés d'efficacité de l'année 1991 qui mesurent, quant à eux, la distance par rapport à la frontière de 1991. La France, par exemple, fait partie des pays efficaces en 1991 alors que son degré d'efficacité est de 0.88 en 1997. Cela ne signifie pas nécessairement une augmentation des impacts environnementaux en France sur cette période, mais indique qu'en 1997 – eu égard aux potentiels techniques observés dans l'ensemble de ces pays – la France pourrait faire mieux.

Pour les deux périodes d'observation on ne constate pas de modification radicale du classement des différents pays. Le coefficient de corrélation de Spearman⁸ qui mesure la corrélation entre des classements est de $r_s = 0.65$.

Les pays dont le classement est le plus fortement modifié sont:

- la Norvège et l'Irlande qui, partant d'un classement relativement mauvais, accèdent au statut de pays efficaces;
- la France et la Belgique, efficaces en 1991, se retrouvent dans la deuxième moitié du classement en 1997.

On notera que le nombre important de pays de rang 1 (c'est-à-dire ayant un degré d'efficacité égal à 1) est inhérent à la méthode. L'ajustement d'une frontière convexe à un nuage de points dans un espace de dimension n , où n est le nombre total de variables, passe nécessairement par un nombre de points au moins égal à n .

3.4 Analyse de l'efficacité environnementale d'un ensemble de pays par la méthode ELECTRE

Dans cette section nous illustrons l'utilisation de la méthodologie d'aide à la décision multicritère présentée sous 2.4 par une application basée sur les mêmes indicateurs et pays analysés par la méthode DEA dans la section précédente. Il s'agit d'établir, à partir des indicateurs disponibles, identifiés à des critères de décision, un classement des pays, sans faire appel à des coefficients de pondération des critères. La méthode spécifiquement adaptée à ce type de problématique que nous avons retenue est la méthode Electre IV. Dans notre application, la comparaison de scénarios est assimilée à une comparaison entre pays et ne fait pas référence à des actions potentielles.

La comparaison de deux scénarios fait apparaître diverses situations de préférence qui peuvent être modélisées par des relations binaires. La théorie classique de la décision ne distingue que deux situations différentes : la préférence et l'indifférence. Pour remédier au

⁸ Voir annexe.

manque de réalisme de cette simple dichotomie, la méthode Electre propose quatre situations fondamentales de préférence dans la comparaison de deux scénarios.

Pour tout couple de scénarios (a,b) une et une seule des situations d'indifférence, de préférence stricte, de préférence faible ou d'incomparabilité est vérifiée. Celles-ci sont représentées par les relations binaires suivantes :

- a I b : a est indifférent à b;
- a P b : a est préféré strictement à b (b P a : b est préféré strictement à a);
- a Q b : a est préféré faiblement à b (b Q a : b est préféré faiblement à a);
- a R b : a est incomparable à b si aucune des trois situations précédentes n'est vérifiée.

Ces quatre relations binaires, ainsi que les trois suivantes, constituées de regroupement des précédentes, soit :

- S (sur-classement) : $S = P \cup I$
- > (préférence au sens large) : $> = P \cup Q$
- ~ (non préférence) : $\sim = I \cup R$,

permettent de modéliser toutes les situations de préférence rencontrées dans notre application.

Les différentes variantes d'Electre se distinguent dans la manière de modéliser ces préférences. Electre III et IV introduisent des seuils d'indifférence et de préférence stricte sur les critères servant à la comparaison des scénarios alternatifs. Le seuil d'indifférence q_j est tel que si la différence entre les valeurs observées du critère correspondant est inférieure à q_j alors les deux scénarios sont considérés comme équivalents. Le seuil de préférence p_j est tel que si la différence entre les valeurs observées est supérieure à p_j alors un scénario est strictement préféré à l'autre. Si la différence entre les valeurs observées est comprise entre ces deux seuils, il y aura une préférence faible. Le seuil d'indifférence peut être interprété comme la marge d'incertitude minimale liée aux calculs, respectivement comme la marge maximale pour le seuil de préférence. L'ensemble constitué par un critère et son seuil d'indifférence et de préférence est appelé pseudo-critère⁹.

Pour chaque critère on définit un seuil de veto $v_j \geq p_j$ tel que si la différence entre les valeurs observées du critère correspondant est supérieure à v_j , alors le scénario correspondant ne peut en aucun cas être mieux classé, et ce quelles que soient les observations pour les autres critères.

La méthode Electre IV s'applique lorsqu'il n'est pas possible d'attribuer des poids aux critères. Ceux-ci doivent alors respecter l'hypothèse de disparité limitée: Aucun critère n'a, à lui seul, une importance supérieure ou égale à celle d'une coalition rassemblant au moins la moitié des critères.

⁹ Pour une discussion de l'utilisation des pseudocritères dans Electre III et IV pour des problèmes environnementaux, voir Hokkanen et Salminen (1997).

A partir de l'ensemble des pseudo-critères du problème, la méthode Electre IV utilise les outils de la théorie des graphes pour construire deux pré-ordres complets de scénarios, l'un allant du meilleur au pire et l'autre procédant dans l'ordre inverse. Le pré-ordre partiel final résultant de l'intersection de ces deux pré-ordres fournit le classement recherché. Ce classement final met en évidence les non-comparabilités entre scénarios, lorsqu'elles existent.

Pour illustrer les différents seuils d'un pseudo-critère considérons les observations pour 1991 de l'indicateur « taux de chômage » :

Tableau 6 : Taux de chômage, 1991

Canada	10.20
Norvège	5.50
États-Unis	6.60
Japon	2.10
Belgique	7.70
Suède	2.70
Australie	9.50
Pays-Bas	7.00
Islande	1.50
Royaume-Uni	8.90
France	9.40
Suisse	1.30
Finlande	7.50
Danemark	10.60
Autriche	3.50
Nouvelle-Zélande	10.30
Irlande	15.80
Espagne	16.00
Grèce	7.30
Portugal	4.10
Hongrie	8.50

Les seuils choisis sont les suivants :

seuil d'indifférence $q_j = 0.5$

seuil de préférence stricte $p_j = 2.5$

seuil de veto $v_j = 8$

Le taux de chômage du Canada est de 10.20, celui du Danemark est de 10.60. Si l'on compare la situation de ces deux pays pour ce critère, on considère qu'ils sont équivalents, car l'écart entre les taux de chômage est inférieur à $q_j = 0.5$. Si la différence de taux de chômage entre deux pays est plus grande que 2.5, alors nous considérons qu'il y a une préférence stricte, et que, par exemple, la situation de l'Islande est strictement préférable à celle de la Norvège pour ce critère. Si la valeur est entre ces deux seuils, la préférence est dite faible, ainsi la situation de la Suisse sera faiblement préférée à celle du Japon.

Le seuil de veto signifie que si la différence entre les taux de chômage de deux pays est supérieure à 8 %, telle que par exemple entre les taux de l'Irlande et de l'Islande, alors

l'Irlande ne peut pas être mieux classée que l'Islande, quel que soit le résultat pour les autres indicateurs.

Pour l'ensemble des indicateurs, les seuils choisis sont donnés dans le tableau 7 suivant :

Tableau 7 : seuils des différents indicateurs (critères)

<i>Indicateur</i>	<i>Seuil d'indifférence q_j</i>	<i>Seuil de préférence p_j</i>	<i>Seuil de veto v_j</i>
Taux de chômage en % de la population active	0.5	2.5	10
Émissions de CO2 en tonne par habitant	0.5	2.5	5
Déchets ménagers en kg par habitant	10	40	250
Consommation d'eau en m3 par habitant	100	500	1000
Cons. d'énergie commerciale en t d'équivalent pétrole par hab.	0.5	2.5	8
Combustibles nucléaires irradiés en kg par 1000 habitants	10	50	100
PIB par habitant en \$ de 1990	1000	5000	8000

L'application d'Electre IV à ces sept indicateurs permet d'obtenir les classements des pays suivants:

1991		1997	
<i>Rang</i>	<i>Pays</i>	<i>Rang</i>	<i>Pays</i>
1	Autriche	1	Autriche
2	Islande Portugal	2	Japon Suisse Portugal
3	Suède Suisse	3	Danemark Nouvelle-Zélande
4	Danemark	4	Islande Irlande
5	Belgique Finlande	5	Norvège Belgique Suède
6	Japon France Irlande Grèce Hongrie	6	Pays-Bas Royaume-Uni Grèce
7	Norvège États-Unis Pays-Bas Espagne	7	France Finlande Espagne
8	Canada Nouvelle-Zélande	8	États-Unis Hongrie
9	Royaume-Uni	9	Australie
10	Australie	10	Canada

Figure 13 : Classements des pays par rang de durabilité selon la méthode ELECTRE

Nous constatons que l'Autriche est classée en tête pour les deux années, la Suisse gagne une place (du rang 3 au rang 2). Le Japon et la Nouvelle-Zélande améliorent considérablement leur classement.

Pour s'assurer de la robustesse des classements obtenus, MAYSTRE, PICTET ET SIMOS (1994), proposent de faire varier les différents seuils (indifférence, préférence et veto). Notre objectif n'étant pas d'obtenir le meilleur classement de ces pays, mais d'illustrer une méthode de classement, nous n'avons testé la robustesse qu'en faisant varier un seul seuil.

Comme exemple, nous avons relevé le seuil d'indifférence pour le PIB à 3000 pour l'année 1997. Le résultat est le suivant :

<i>Rang</i>	<i>Pays</i>
1	Autriche
2	Portugal
3	Japon Suisse
4	Nouvelle-Zélande
5	Royaume-Uni Danemark Irlande
6	Suède Islande
7	Pays-Bas Belgique Norvège
8	États-Unis Grèce Hongrie
9	France
10	Finlande
11	Espagne
12	Australie
13	Canada

Figure 14 : Classement des pays selon la méthode ELECTRE 97 après variation du seuil d'indifférence du PIB

On constate que la Suisse et le Japon descendent d'un rang. Ces pays ont un PIB par habitant élevé, 25240 et 24070 respectivement, par rapport au Portugal 14270. Le fait d'accroître la marge d'incertitude minimale implique que le Portugal sort mieux classé que les deux autres pays, compte tenu de son faible PIB.

Afin de vérifier si la différence entre les deux classements de l'année 97 avec des seuils d'indifférence différents est significative, nous avons appliqué le test de Spearman. Le coefficient de corrélation de rang de Spearman entre ces deux classements est $r_s = 0.94$. Les classements sont donc très proches et nous pouvons conclure à un classement robuste par rapport à une variation de ce seuil d'indifférence.

Finalement nous avons comparé les classements obtenus par ELECTRE et par DEA.

Tableau 8 : Comparaison des classements DEA et ELECTRE

1991		1997	
DEA	ELECTRE	DEA	ELECTRE
Autriche	1	Autriche	1
Belgique	1	Danemark	2
Danemark	1	Irlande	2
France	1	Islande	2
Islande	1	Norvège	3
Portugal	1	Nouvelle-Zélande	3
Suède	1	Portugal	4
Suisse	1	Suède	4
Espagne	2	Suisse	5
Japon	3	Japon	5
Nouvelle-Zélande	4	Finlande	5
Royaume-Uni	5	Royaume-Uni	6
Finlande	6	Belgique	6
Norvège	7	Espagne	6
Pays-Bas	8	France	7
Canada	9	Pays-Bas	7
Irlande	10	États-Unis	7
États-Unis	11	Grèce	8
Australie	12	Australie	8
Grèce	13	Canada	9
Hongrie	14	Hongrie	10

Pour 1991 le coefficient de corrélation de Spearman des deux classements est $r_s = 0.66$.

Les deux classements sont proches, avec toutefois des différences marquantes pour la Grèce, la Hongrie et la France. Cette différence s'explique notamment par le rôle de la variable PIB par habitant. En effet, le PIB par habitant de la France est plus du double de ceux de la Hongrie et de la Grèce alors que l'écart des autres variables est nettement inférieur. Étant donné que le PIB par habitant est le seul output désirable retenu pour la méthode DEA, il n'est pas surprenant qu'il joue un rôle dominant dans le classement obtenu avec cette méthode alors que l'hypothèse de disparité limitée de la méthode Electre empêche précisément qu'une variable ait à elle seule un rôle prépondérant.

Pour l'année 1997 les classements sont très proches, le coefficient de corrélation de Spearman est $r_s = 0.88$.

Il ressort de ces applications que le monitoring de type DEA et la méthode d'aide à la décision multicritère ELECTRE permettent d'obtenir des classements très proches. Les deux méthodes présentent un ensemble de propriétés communes:

- Elles permettent de classer un ensemble de situations observées, par exemple différents pays, et de suivre et de comparer l'évolution de ces classements.
- Les variables observées peuvent être de nature très diverse aussi bien quant à leur contenu (pollution, PIB, taux de chômage) que quant à leur dimension. Il n'est pas

nécessaire de faire des hypothèses sur d'éventuelles relations sous-jacentes entre ces variables.

- Il n'est pas nécessaire de recourir à des coûts externes ou à des analyses contingentes pour attribuer une valeur monétaire aux variables environnementales.
- Ces méthodes peuvent s'appliquer sans connaissance a priori de pondérations pour les différentes variables retenues.
- Le classement se fait par rapport à une "meilleure pratique". Il dépend de la technologie utilisée au moment des observations. De ce fait il ne tient pas compte du potentiel d'amélioration.
- Les deux méthodes sont faciles à implémenter, à l'aide de logiciel disponible sur le marché (Electre) ou de routines de programmation linéaire existantes (DEA).

L'application de la DEA permet non seulement de fournir un classement mais donne au travers du degré d'efficacité une mesure du potentiel d'amélioration par rapport à la meilleure pratique. L'application de cette méthode présente toutefois un certain nombre de problèmes. Ainsi le nombre d'unités efficaces croît avec le nombre de variables. Pour un nombre relativement élevé de variables il sera alors nécessaire de formuler des hypothèses supplémentaires plus restrictives, notamment sur les rendements d'échelle et la disponibilité des facteurs.

La méthode ELECTRE présente l'avantage de pouvoir tenir compte d'informations complémentaires à celles fournies directement par les données, notamment quant à la précision de ces données. Dans la mesure où elles peuvent être chiffrées, de telles informations peuvent être prises en compte par le biais des différents seuils d'indifférence.

Bibliographie

- Allen, K. (1999) *DEA in the ecological context – An overview*, in: *Measuring the Efficiency in the Private and Public Service Sector*, G. Westermann (Ed.) Gabler, Wiesbaden, pp. 203-235.
- Antille, G. (2001), *Analyse de la composante chronologique dans les tableaux croisés: une approche descriptive*, *Revue suisse d'économie et de statistique*, vol. 137, n 3, Basel, pp. 241-253.
- Ben Mena, S. (2000) *Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision*, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 4 (2), pp 83-93.
- Charnes, A., W.W. Cooper and E. Rhodes (1978) *Measuring the efficiency of decision making units*, *European Journal of Operational Research*, vol. 2, n 1, pp. 429-444.
- Dyckhoff, H. and K. Allen (2001) *Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA)*, *European Journal of Operational Research*, 132, pp. 312-325.
- Ferrari, S., S. Genoud and J.B. Lesourd (2001) *Thermodynamics and economics : Towards exergy-based indicators of sustainable development*, *Swiss Journal of Economics and Statistics* , vol. 137, n 3, pp. 319-336.
- Grosclaude, P. (1995) *Comptabilité nationale et environnement*, Institut de recherches économiques et régionales, Université de Neuchâtel, Neuchâtel.
- Grubbström, R.W. (1984) *Toward a Theoretical Basis for Energy Economics*, Pergamon Press, New-York.
- Hokkanen, J. and Salminen, P. (1997) *Electre III and IV Decision Aids in an Environmental Problem*, *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, vol. 6, pp. 215-226.
- IEA (1997) *Indicators of Energy Use and Efficiency*, International Energy Agency (IEA), Paris.
- IFEN (1999) *Les indicateurs de développement durable – Méthodes et perspectives*, Institut français de l'environnement, Collection Etudes et Travaux, n 24 , Orléans.
- Korhonen, P. and M. Luptacik (2000) *Eco-efficiency Analysis of Power Plants: An Extension of Data Envelopment Analysis*, Working Paper W-241, Helsinki School of Economics and Business Administration.
- Le Goff, P. (1990) *Optimisation énergétique et économie comparée de systèmes industriels*, *Entropie*, n 153/154, pp. 136-146.
- Maystre, L.Y., J. Pictet et J. Simos (1994) *Méthodes Multicritères ELECTRE*, Presses polytechniques romandes, Lausanne.

- Mahlberg, B. and M. Obersteiner (2001) *Remeasuring the HDI by Data Envelopment Analysis*, Interim Report IR-01-069, IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- OCDE (1993) *Corps central d'indicateurs de l'OCDE pour les examens des performances environnementales*, Monographies sur l'environnement, OCDE, n 83, Paris.
- OFEFP (1998) *Protection de la nature: beaucoup d'efforts et d'effets? Suivi et monitoring: les instruments de base pour contrôler l'efficacité. Une vue d'ensemble* Bulletin: <http://www.buwal.ch/bulletin/1998/f4a02s01.htm>, n 4, pp. 1-4.
- OFS & OFEFP (1999) *Le développement durable en Suisse : Eléments pour un système d'indicateurs*, Statistique de la Suisse, Office fédéral de la statistique.
- PNUD (1993) *Rapport mondial sur le développement humain 1993*, Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), New-York.
- PNUD (1999) *Rapport mondial sur le développement humain 1999*, Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), New-York.
- Rousseaux, P. et T. Apostol (2000) *Valeur environnementale de l'énergie*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Roy, B. (1985) *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Economica, Paris.
- Tyteca, D. (1996) *On the Measurement of the Environmental Performance of Firms - A Literature Review and a Productive Efficiency Perspective*, Journal of Environmental Management, n 46, pp 281-308.
- Thiry, B. et H. Tulkens (1989) *Productivité, efficacité et progrès technique. Notions et mesures dans l'analyse économique*, dans: Efficacité et Management, H. Tulkens (ed.) CIFOP, Charleroi.
- Walter, F. und F. Gubler (ECOPLAN), U. Brodmann (Faktor Consulting + Management) (2001) *Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich*, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern EDMZ.

Annexes

A1 Test de Spearmann

Le test de Spearmann¹⁰ est une mesure de corrélation non paramétrique qui permet d'étudier la corrélation entre deux classements pour un même ensemble d'individus. Il permet également de tester si la différence entre deux classements est significative ou non.

On suppose N individus classés selon deux critères qui fournissent les rangs X_1, X_2, \dots, X_N et Y_1, Y_2, \dots, Y_N . La corrélation serait parfaite si et seulement si $X_i = Y_i$ pour tout i . On mesure le degré d'association entre les deux classements à l'aide du carré de la différence des rangs:

$$d_i^2 = (Y_i - X_i)^2.$$

Siegel montre que, lorsque les X et Y sont des rangs, le coefficient de corrélation

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}}$$

où $x = X - \bar{X}$ et $y = Y - \bar{Y}$ peut s'écrire:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N^3 - N}$$

Ce coefficient est le *coefficient de corrélation de rang de Spearman*.

Lorsque les classements admettent plusieurs individus de même rang, l'on attribue à chaque individu le rang moyen correspondant. Le coefficient de Spearman prend alors la forme suivante:

$$r_s = \frac{\sum x^2 + \sum y^2 - \sum d^2}{2\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}}$$

où

$$\sum x^2 = \frac{N^3 - N}{12} - \sum \frac{t_x^3 - t_x}{12} \quad \text{et} \quad \sum y^2 = \frac{N^3 - N}{12} - \sum \frac{t_y^3 - t_y}{12}.$$

et t_x, t_y le nombre d'individus de même rang dans chacun des deux classements.

¹⁰ Une présentation détaillée du test est donnée dans Sydney Siegel "Nonparametric statistics for the behavioral sciences" International Student Edition, McGraw Hill, 1956.

A2 Données de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA,1997)

Indicateurs

- 1 Car ownership (cars/1000 inhabitants)
- 2 Car distance driven per capita (1000 vehicle km/capita)
- 3 Car fuel intensity (l gasoline/100km)
- 4 Modal energy intensity of car travel (MJ/passenger-km)
- 5 Aggregate energy intensity for travel (MJ/pkm)
- 6 Domestic travel intensity of GDP (Pass-km/\$ 1985)
- 7 Car fuel cost per kilometre (fuel cost/km, 1985 US\$)
- 8 Energy intensities of trucking (MJ per tonne-km)
- 9 Aggregate modal intensity of freight (MJ/tonne-km)
- 10 Truck fuel price
- 11 Freight energy to GDP (MJ/US \$ (1985))
- 12 Household light fuel oil prices (US\$/GJ at 1985)
- 13 Household natural gas prices (US\$/GJ at 1985)
- 14 Household electricity prices (US\$/GJ at 1985)
- 15 CO2 emissions from households (kg of C/GJ of primary energy)
- 16 Electricity intensity: consumption per unit of service sector GDP (MJ/US\$ 1980)
- 17 Services primary energy use per unit of total GDP (MJ/US\$1980)
- 18 Per capita CO2 emissions from service sector energy use (kgC/capita)
- 19 Manufacturing output (GDP) per capita (US\$ '000/capita)
- 20 Energy intensities of steel production (GJ(final) /tonne)
- 21 Aggregate intensity of delivered energy in manufacturing (MJ/1980 US\$)
- 22 Impact of structural change on delivered energy use (1973 delivered energy = 100)
- 23 Impact of intensity change on delivered energy use (1973 delivered energy = 100)
- 24 Final manufacturing energy per total GDP (MJ/1980 US\$)
- 25 Industrial heavy fuel oil prices (1980 US\$/GJ)
- 26 Industrial electricity prices (1980 US\$/GJ)
- 27 CO2 emissions per unit of primary energy use ('000 of C/PJ)

	1973				1974				1975				1976			
	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis
1	277	277	133	472	282	282	149	487	292	292	154	497	297	303	164	508
2	3.8	3.9	1.7	8.6	3.7	3.9	1.7	8.3	3.8	4.2	1.7	8.5	3.9	4.4	1.8	8.9
3	8.7	10.2	8.4	18.0	8.6	9.9	8.4	17.8	8.6	9.9	8.2	17.7	9.0	10.0	8.2	17.7
4	1.5	1.9	2.2	3.1	1.5	1.9	2.2	3.1	1.5	1.9	2.2	3.2	1.6	2.0	2.2	3.2
5	1.3	1.7	1.2	3.1	1.3	1.6	1.2	3.1	1.3	1.7	1.3	3.2	1.4	1.7	1.3	3.2
6	0.9	0.8	0.8	1.3	0.8	0.8	0.8	1.3	0.9	0.8	0.8	1.3	0.9	0.8	0.8	1.3
7	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
8	2.7	2.7	4.8	3.2	2.7	2.5	5.0	3.2	3.1	2.5	5.3	3.4	3.1	2.5	5.6	3.4
9	1.7	1.5	2.3	1.3	1.7	1.3	2.4	1.3	2.0	1.4	2.6	1.4	2.0	1.4	2.7	1.4
10	0.5	0.4	0.4	0.2	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3
11	0.7	0.5	1.1	1.3	0.7	0.5	1.1	1.3	0.7	0.5	1.1	1.3	0.7	0.5	1.1	1.4
12	5.4	3.7	4.7	4.3	5.5	7.5	7.6	6.1	7.9	6.1	7.9	6.2	7.5	6.3	8.0	6.3
13	14.6	13.7	13.2	2.7	13.5	11.5	10.8	2.7	16.0	12.0	16.4	2.9	14.6	15.8	16.1	3.3
14	40.2	32.5	37.7	16.0	38.2	32.1	35.1	16.1	33.3	32.7	31.4	18.4	34.1	32.3	32.3	18.5
15	7.1	7.1	1.4	5.7	6.7	8.0	1.4	5.1	6.2	7.0	1.5	4.9	6.4	6.7	1.5	4.6

16	0.4	0.7	0.3	1.1	0.4	0.7	0.3	1.1	0.4	0.7	0.3	1.2	0.4	0.7	0.3	1.2
17	1.8	3.0	1.7	3.9	1.7	2.9	1.8	3.8	1.5	2.9	1.8	3.9	1.6	2.9	1.8	4.0
18	284	531	240	802	261	510	233	769	236	505	229	760	265	543	240	807
19	2.0	2.9	2.0	2.5	2.0	2.8	2.1	2.3	2.0	2.6	1.8	2.1	2.1	2.8	1.9	2.3
20	11.1	17.9	20.2	12.5	11.6	19.1	19.6	12.3	9.4	16.2	18.2	10.4	9.7	16.4	18.0	10.5
21	18.5	15.9	22.9	29.3	18.6	16.4	24.0	30.7	15.5	15.4	24.5	30.1	16.2	14.8	22.9	28.8
22	100	100	100	100	101	103	101	101	95	96	99	96	98	96	99	96
23	100	100	100	100	101	100	100	105	93	101	108	108	89	98	102	103
24	4.3	5.1	7.5	6.5	4.4	5.1	7.3	6.5	3.8	4.6	6.7	6.0	3.8	4.5	6.6	6.0
25	1.9	1.3	1.7	2.0	2.9	2.5	4.4	3.6	3.4	3.3	4.4	3.6	2.8	3.0	5.1	3.7
26	13.3	17.6	14.3	7.8	13.0	17.6	20.6	9.5	14.8	19.2	20.5	10.7	15.1	18.8	21.5	11.0
27	19.9	21.0	21.0	18.3	19.9	21.1	20.6	18.1	19.3	20.4	20.4	18.0	19.7	20.4	20.4	18.0

	1977				1978				1979				1980			
	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis
1	313	328	174	513	328	344	185	528	338	369	200	533	344	379	205	528
2	4.0	4.6	2.0	9.1	4.2	4.9	2.1	9.4	4.3	5.0	2.2	9.1	4.5	5.1	2.2	9.0
3	8.9	10.1	8.2	17.4	9.1	10.2	8.2	17.0	9.0	10.0	8.4	16.7	8.8	10.2	8.4	15.6
4	1.6	2.0	2.2	3.2	1.6	2.1	2.2	3.2	1.6	2.0	2.3	3.2	1.5	2.1	2.3	3.0
5	1.4	1.7	1.4	3.2	1.4	1.8	1.4	3.1	1.4	1.8	1.4	3.1	1.3	1.9	1.4	3.0
6	0.9	0.8	0.8	1.3	0.9	0.8	0.8	1.2	0.9	0.8	0.8	1.2	0.9	0.8	0.7	1.2
7	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
8	3.0	2.6	5.7	3.4	3.0	2.7	5.5	3.5	2.9	2.6	5.2	3.5	2.9	2.7	5.0	3.7
9	2.0	1.5	2.8	1.5	2.0	1.6	2.7	1.4	1.9	1.6	2.6	1.4	1.9	1.5	2.5	1.3
10	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3	0.6	0.5	0.6	0.4
11	0.7	0.5	1.1	1.4	0.7	0.5	1.1	1.5	0.7	0.5	1.1	1.5	0.7	0.5	1.0	1.4
12	4.8	6.6	7.4	6.6	7.3	5.2	6.0	5.5	8.0	8.0	7.4	6.7	10.5	9.4	11.7	9.0
13	14.2	15.4	16.5	3.7	10.6	8.1	16.0	3.7	10.0	7.9	15.7	4.0	11.2	9.0	19.5	4.4
14	33.0	31.4	32.7	18.8	30.9	29.1	31.9	18.8	30.5	28.5	31.0	18.6	32.5	28.1	39.0	19.3
15	7.1	7.3	1.6	4.7	6.3	6.1	1.9	3.9	5.8	6.2	1.8	3.9	5.2	5.4	1.3	3.6
16	0.5	0.7	0.3	1.2	0.5	0.7	0.3	1.2	0.5	0.8	0.3	1.2	0.5	0.8	0.3	1.2
17	1.5	2.9	1.8	4.0	1.6	2.9	1.8	3.8	1.6	2.9	1.7	3.7	1.6	2.7	1.6	3.7
18	250	524	248	826	265	558	251	817	272	577	251	817	248	539	236	807
19	2.2	2.9	2.0	2.5	2.2	2.9	2.2	2.6	2.2	3.1	2.3	2.6	2.2	3.1	2.4	2.5
20	9.1	15.5	16.9	10.0	9.0	15.5	15.6	10.2	9.0	16.3	16.3	10.4	8.4	15.6	15.6	7.9
21	15.6	14.3	21.1	27.0	15.6	14.4	19.7	26.0	15.3	14.3	18.9	25.0	14.4	13.6	16.9	24.0
22	98	94	97	96	97	96	96	95	101	97	97	94	101	95	95	91
23	85	98	96	97	85	95	90	94	82	94	86	94	78	91	78	92
24	3.6	4.4	6.1	5.7	3.6	4.3	5.6	5.6	3.5	4.3	5.5	5.4	3.3	4.1	4.9	4.9
25	3.0	3.1	4.8	3.6	3.1	3.1	3.5	3.0	3.5	3.6	4.5	3.9	4.6	4.6	8.0	4.7
26	14.9	18.5	22.0	11.7	12.4	15.9	21.2	12.0	12.3	15.7	21.1	12.3	13.7	16.1	28.4	13.1
27	19.3	19.9	20.4	18.0	18.9	20.0	20.0	17.7	18.7	19.9	19.7	17.7	17.9	20.0	19.3	17.7

	1981				1982				1983				1984			
	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis
1	354	390	210	533	364	395	215	533	369	400	221	544	374	415	226	554
2	4.6	4.8	2.3	9.1	4.6	5.0	2.3	9.3	4.6	5.3	2.3	9.5	4.8	5.5	2.4	9.7
3	9.4	10.2	8.3	15.5	9.4	10.1	8.3	14.6	9.4	10.1	8.2	14.2	9.2	10.1	8.1	13.8
4	1.6	2.1	2.2	3.0	1.6	2.1	2.2	2.9	1.6	2.1	2.2	2.9	1.6	2.1	2.1	2.8
5	1.4	1.8	1.4	2.9	1.4	1.8	1.4	2.9	1.4	1.9	1.4	2.8	1.4	1.9	1.4	2.8
6	0.9	0.8	0.7	1.2	0.9	0.8	0.7	1.2	0.9	0.8	0.7	1.2	0.9	0.8	0.7	1.2
7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
8	3.2	2.6	5.0	3.8	2.9	2.5	4.8	3.8	2.9	2.4	4.7	3.7	3.0	2.4	4.6	3.8
9	2.1	1.5	2.4	1.3	1.8	1.5	2.5	1.4	2.0	1.5	2.5	1.4	1.9	1.5	2.4	1.4
10	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.5	0.6	0.4	0.6	0.5	0.5	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3
11	0.6	0.5	0.9	1.4	0.6	0.5	0.9	1.4	0.6	0.5	0.9	1.4	0.6	0.5	0.9	1.4
12	11.7	10.1	11.7	10.1	12.7	10.7	13.3	9.4	12.7	9.4	11.5	8.3	12.4	9.8	10.4	8.0
13	12.3	10.1	20.1	4.7	13.4	11.3	19.8	5.2	13.4	10.7	19.2	5.9	13.2	10.6	18.8	5.8
14	31.5	30.0	40.6	20.1	34.2	30.7	40.1	21.1	33.3	30.6	39.9	22.4	33.3	30.6	38.9	21.6
15	5.2	5.6	1.2	3.6	5.3	5.6	1.5	3.5	4.6	5.4	1.4	3.3	4.3	4.8	1.3	3.6
16	0.5	0.8	0.3	1.2	0.5	0.8	0.3	1.3	0.6	0.8	0.3	1.3	0.6	0.8	0.4	1.3
17	1.5	2.6	1.6	3.7	1.6	2.6	1.6	3.8	1.7	2.6	1.7	3.7	1.8	2.6	1.7	3.7
18	200	520	236	802	208	505	236	798	204	509	246	802	191	514	253	832
19	2.2	3.0	2.4	2.5	2.2	2.9	2.4	2.3	2.2	2.9	2.5	2.4	2.2	3.1	2.8	2.6
20	7.0	14.8	13.9	7.8	6.5	13.1	13.8	4.8	5.9	12.8	12.7	4.8	6.2	13.3	13.8	5.0
21	13.8	13.2	15.9	23.2	13.8	12.6	15.0	21.7	14.0	12.3	14.2	21.5	14.5	12.4	13.6	20.0
22	99	94	91	92	94	91	90	91	93	91	88	88	96	92	86	85

23	76	91	78	88	80	88	73	82	82	86	72	91	71	72	69	86
24	3.1	3.9	4.7	4.8	3.1	3.6	4.2	4.3	3.0	3.5	4.0	4.4	3.0	3.4	4.0	4.2
25	5.7	6.1	7.4	5.5	0.6	5.5	7.6	4.7	5.9	5.3	6.8	4.4	6.8	6.2	6.5	4.6
26	13.2	16.7	30.6	14.0	13.7	17.4	30.4	15.4	14.0	17.4	30.0	14.8	13.5	17.2	29.2	14.4
27	16.0	19.8	19.3	17.6	16.0	19.7	18.9	17.5	14.8	19.6	18.7	17.5	13.7	19.1	18.6	17.4

	1985				1986				1987				1988			
	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis
1	374	426	231	564	385	441	236	574	390	456	241	585	395	467	251	590
2	4.8	5.4	2.4	9.9	5.0	5.9	2.4	10.1	5.1	6.3	2.5	10.5	5.3	6.6	2.7	11.1
3	9.1	10.1	8.0	13.6	8.9	10.0	7.9	13.6	8.8	9.9	8.0	13.0	8.7	9.8	7.6	12.6
4	1.6	2.1	2.1	2.8	1.5	2.1	2.1	2.8	1.5	2.2	2.1	2.7	1.5	2.2	2.1	2.7
5	1.4	1.9	1.4	2.7	1.4	1.9	1.4	2.8	1.4	1.9	1.4	2.7	1.4	1.9	1.3	2.6
6	0.9	0.7	0.7	1.1	0.9	0.8	0.7	1.1	0.9	0.8	0.6	1.2	0.9	0.8	0.6	1.2
7	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
8	3.0	2.6	4.5	3.9	3.0	2.3	4.5	3.9	3.0	2.3	4.5	3.9	2.9	2.2	4.4	3.8
9	1.9	1.4	2.5	1.5	2.1	1.4	2.5	1.5	2.1	1.4	2.5	1.5	2.1	1.4	2.5	1.5
10	0.6	0.5	0.5	0.3	0.5	0.4	0.4	0.2	0.5	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2
11	0.6	0.5	0.9	1.4	0.6	0.5	0.9	1.4	0.6	0.5	0.9	1.4	0.6	0.5	0.9	1.4
12	12.8	9.9	9.9	7.5	8.3	5.4	7.8	5.7	7.8	4.7	6.0	5.7	7.2	4.0	4.9	5.5
13	13.4	10.6	18.4	5.6	12.4	9.9	16.9	5.3	10.0	7.0	15.8	4.8	9.5	6.6	15.2	4.6
14	32.9	30.5	38.4	21.7	31.7	31.7	36.5	21.4	30.3	31.9	34.6	20.4	30.0	32.4	33.7	19.6
15	3.7	4.7	1.5	3.4	3.9	5.1	1.5	3.9	3.5	4.5	1.9	3.8	4.2	5.5	1.8	3.4
16	0.6	0.8	0.3	1.3	0.6	0.8	0.3	1.3	0.7	0.8	0.4	1.3	0.7	0.8	0.4	1.3
17	2.0	2.7	1.6	3.6	2.0	2.7	1.6	3.5	2.0	2.6	1.7	3.6	2.0	2.5	1.7	3.6
18	204	514	253	830	195	539	253	824	176	514	253	839	163	497	280	870
19	2.2	3.2	2.9	2.7	2.1	3.3	2.9	2.8	2.1	3.3	2.9	3.0	2.2	3.4	3.2	3.2
20	6.3	13.9	13.2	4.7	5.7	13.1	12.2	4.2	5.4	12.8	12.2	4.1	5.8	13.4	13.3	4.3
21	14.0	11.8	12.9	18.0	12.9	11.0	12.2	17.3	12.3	11.0	12.4	17.2	12.6	10.9	12.0	17.0
22	95	90	85	83	97	87	84	84	97	86	84	84	99	89	84	83
23	84	79	67	78	73	81	66	77	75	81	66	75	69	77	64	75
24	2.8	3.4	3.7	3.7	2.6	3.2	3.6	3.7	2.5	3.1	3.6	3.7	2.5	3.1	3.6	3.8
25	6.2	5.9	6.3	3.9	3.3	2.6	3.8	2.1	3.1	2.8	2.8	2.5	2.1	2.1	2.8	1.9
26	13.1	17.4	28.9	14.5	12.0	17.9	27.0	13.9	11.3	18.5	24.8	12.8	11.3	18.3	23.6	12.0
27	13.1	18.5	18.1	17.4	12.3	18.6	18.0	17.4	12.0	18.2	17.9	17.4	11.8	17.9	18.1	17.2

	1989				1990				1991			
	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis	France	Allemagne	Japon	Etats-Unis
1	405	482	267	590	410	487	282	590	415	487	297	585
2	5.5	6.6	2.8	11.3	5.6	6.8	3.0	11.7	5.7	6.8	3.2	11.6
3	8.7	9.6	7.5	12.2	8.5	9.6	7.5	11.9	8.4	9.4	7.4	11.7
4	1.5	2.1	2.1	2.6	1.5	2.1	2.1	2.6	1.5	2.1	2.1	2.5
5	1.4	1.9	1.4	2.6	1.3	1.9	1.4	2.5	1.3	1.9	1.4	2.5
6	0.9	0.8	0.6	1.2	0.9	0.8	0.6	1.2	0.9	0.7	0.6	1.2
7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
8	3.0	2.1	4.2	3.8	3.0	2.1	4.2	3.6	3.1	2.3	4.3	3.4
9	2.1	1.3	2.4	1.5	2.3	1.3	2.4	1.5	2.4	1.5	2.4	1.4
10	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2
11	0.7	0.5	0.9	1.4	0.7	0.5	0.8	1.4	0.7	0.5	0.8	1.3
12	7.9	5.3	4.7	5.7	8.0	5.6	5.8	6.3	8.2	5.9	6.4	5.7
13	9.2	6.7	16.2	4.5	8.9	7.2	15.8	4.6	8.8	7.7	15.5	4.4
14	29.1	32.0	32.0	18.5	29.5	31.3	31.3	18.1	28.1	30.5	30.5	17.5
15	4.2	4.9	2.3	3.1	4.0	5.3	2.3	4.0	3.3	4.4	2.3	3.5
16	0.7	0.8	0.4	1.3	0.7	0.7	0.4	1.3	0.7	0.7	0.4	1.3
17	2.0	2.4	1.6	3.6	2.0	2.2	1.7	3.6	2.1	2.3	1.7	3.6
18	170	463	285	870	159	457	308	853	200	484	314	841
19	2.3	3.5	3.4	3.3	2.3	3.6	3.5	3.3	2.3	3.7	3.6	3.2
20	5.7	13.3	13.3	4.2	5.4	11.6	13.3	4.5	5.2	10.6	12.7	2.9
21	12.0	10.6	11.6	16.9	12.1	10.0	11.3	16.8	12.2	9.8	11.3	16.7
22	97	88	83	82	97	87	82	84	96	87	82	85
23	68	76	63	74	67	71	63	70	67	70	61	69
24	2.4	3.2	3.5	3.7	2.4	2.9	3.4	3.6	2.4	2.7	3.2	3.5
25	2.4	2.4	2.7	2.0	2.4	2.4	2.9	2.2	2.3	2.0	3.4	1.6
26	11.0	17.9	22.2	11.4	11.2	17.3	21.3	10.9	11.0	16.8	21.1	10.6
27	11.8	17.5	18.1	17.1	11.5	17.7	18.1	16.9	11.7	17.7	17.7	16.7

A3 Données du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD, 1993 et 1999)

Pays	Taux de chômage en % de la population active, 1990-91	Taux de chômage en % de la population active, 1997	Emissions de CO2 en tonne par habitant, 1990	Emissions de CO2 en tonne par habitant, 1996	Déchets ménagers en kg par habitant, 1985-89	Déchets ménagers en kg par habitant, 1991-97	Consommation d'eau en m3 par habitant, 1980-87	Consommation d'eau en m3 par habitant, 1987-95	Consommation d'énergie commerciale en tonne d'équivalent pétrole par habitant, 1991	Consommation d'énergie commerciale en tonne d'équivalent pétrole par habitant, 1996	Combustibles nucléaires irradiés en kg par 1000 habitants, 1988	Combustible nucléaire irradiés en tonnes, 1998	PIB par habitant en \$, 1990	PIB par habitant en \$, 1997
Canada	10.20	9.30	15.17	13.51	632	630	1752	1623	9.89	7.79	12	1690	19616	22480
Norvège	5.50	4.10	11.09	15.23	475	590	489	488	9.07	5.26	0	0	16028	24450
Etats-Unis	6.60	5.00	19.10	19.50	864	720	2162	1677	7.74	7.85	19	2300	21449	29010
Japon	2.10	3.50	8.63	9.27	394	400	923	735	3.55	4.05	149	852	17616	24070
Belgique	7.70	9.00	9.74	10.50	313	480	917	917	2.80	5.58	85	123	16381	22750
Suède	2.70	8.00	5.64	6.08	317	440	479	310	6.28	5.91	46	235	17014	19790
Australie	9.50	8.50	15.38	16.76	681	690	1306	839	4.97	5.50	0	0	16051	20210
Pays-Bas	7.00	5.60	9.26	9.95	467	570	1023	522	5.13	4.86	59	14	15695	21110
Islande	1.50	3.80	6.73	7.32	499	570	349	611	4.90	7.57	0	0	16496	22497
Royaume-Uni	8.90	7.10	9.78	9.52	353	480	507	160	3.63	4.01	1279	781	15804	20730
France	9.40	12.40	6.20	6.18	304	590	728	700	3.82	4.35	231	1264	17405	22030
Suisse	1.30	4.20	6.28	6.06	427	600	502	363	3.82	3.51	176	64	20874	25240
Finlande	7.50	14.50	10.21	11.60	608	410	774	477	5.60	6.17	13	68	16446	20150
Danemark	10.60	5.40	9.94	10.67	469	540	289	170	3.73	4.32	0	0	16781	23690
Autriche	3.50	5.20	7.45	7.32	228	510	417	278	3.51	3.36	0	0	16504	22070
Nouvelle-Zélande	10.30	7.20	6.94	7.83	662	350	379	545	5.00	4.29	0	0	13481	17410
Irlande	15.80	10.50	8.53	9.43	311	430	267	326	2.57	3.23	0	0	10589	20710
Espagne	16.00	20.90	5.43	5.87	322	370	1174	897	2.21	2.56	56	158	11723	15930
Grèce	7.30	9.80	7.08	7.61	314	340	721	688	2.06	2.30	0	0	7366	12769
Portugal	4.10	6.90	4.28	4.84	231	350	1062	739	1.52	1.93	0	0	8770	14270
Hongrie	8.50	8.70	6.11	5.83	438	500	502	612	3.24	2.50	0	55	6116	7200