

Boubker BENSEDDIQ
Promotion 2009

INSA de Toulouse



135, Avenue de Rangueil - 31077 Toulouse Cedex 4 – France

Département Génie des Procédés et Environnement (GPE)
Stage de quatrième année
Année universitaire 2007-2008

Rapport de Stage

Analyse de Cycle de Vie du matériel informatique

Maître de stage: Mme Françoise BERTHOUD

Responsable INSA: Mme Dominique BASTOUL3la men

Date de soutenance : Octobre 2008

**Stage effectué dans le Groupe de Travail EcoInfo du
CNRS**

www.ecoinfo.org



*LPMMC, Maison des Magistères CNRS 25 avenue des Martyrs. BP166 38042 Grenoble
Cedex*

Boubker BENSEDDIQ
Promotion 2009

Sommaire

Sommaire	1
Résumé	3
Introduction	4
I - Les Technologies de l'Information et des Communication (TIC)	6
I.1 Contexte économique global des TIC	6
I.2 De la nécessité d'éclaircir les connaissances sur le cycle de vie du matériel informatique	7
I.3 Organisation de l'industrie électronique.....	8
II- Mesurer les impacts du matériel informatique	10
II.1 L'Analyse de Cycle de Vie (ACV).....	10
II.1.a Définition des objectifs et du champ de l'étude	10
II.1.b Analyse de l'inventaire du cycle de vie.....	11
II.1.c Évaluation de l'impact.....	11
II.1.d La prise de décision	12
II.2 Le cycle de vie d'un ordinateur.....	12
II.2.a Description du sujet de l'étude	12
II.2.b Inventaire de cycle de vie	13
III Résultats de l'analyse de cycle de vie de la directive EuP	14
III.1 La phase de production	14
II.1.a. Recensement des matériaux constitutifs	14
III.1.b Ressources et déchets produits pendant la production	15
III.1.c Rejets dans l'environnement	17
III.2 la phase de distribution.....	18
III.3 La phase d'utilisation.....	19
III.4 Ressources et déchets produits en fin de vie	21
III.5 Comparaison de différents scénarii de cycle de vie	22
III.5.a Impact de la durée de vie d'un produit.....	22
III.5.b Différentes habitudes de consommation	24
III.6 Un autre type d'écoprofile	26
Conclusion.....	27
Références bibliographiques	28
Sommaire des annexes	29

Résumé

Le marché des TIC est l'un des marchés qui engage le plus de capitaux au monde avec près de 3400 milliards de dollars américains de chiffre d'affaire en 2008. Ce marché connaît une forte croissance (plus de 10% jusqu'à l'an dernier) depuis sa création il y a près de 30 ans. Le nombre d'ordinateurs a dépassé le milliard aujourd'hui, et aura dépassé les deux milliards dans les dix prochaines années.

De plus en plus de pays émergents s'invitent dans ce marché, faisant augmenter d'année en année la demande en produits informatiques. Il est urgent pour le consommateur de connaître précisément les conséquences environnementales liées à l'achat d'un ordinateur.

Bien que les ordinateurs ne réalisent pas le chiffre d'affaire le plus important dans le marché des TIC, ces produits sont le fer de lance de l'industrie des TIC.

Leur production implique une chaîne d'approvisionnement très complexe, et par conséquent il est difficile de remonter la filière et de recenser clairement les différents impacts environnementaux de chaque étape du cycle de vie. Cependant, la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) permet, à l'aide de base de données industrielles, d'évaluer approximativement ces impacts.

La directive européenne sur les équipement consommateurs d'énergie (EuP) a été créée en s'appuyant sur une étude se rapprochant de l'ACV (Analyse de Cycle de Vie). En se basant sur les résultats numériques et les hypothèses de l'étude EuP, trois types d'ordinateurs ont été choisis en fonction du service rendu au consommateur: un ordinateur de bureau équipé d'un écran à tube à rayons cathodiques (CRT), un ordinateur de bureau équipé d'un écran à cristaux liquides (LCD), et un ordinateur portable.

Le critère de comparaison de l'empreinte environnementale retenu est la consommation totale d'énergie, parce qu'elle se corrèle correctement avec les autres impacts étudiés comme les émissions de gaz à effets de serre ou les émissions de gaz acides.

L'étude montre que l'ordinateur portable est le produit qui génère (quantitativement) le moins de nuisances à l'environnement. Ceci est essentiellement dû au fait que moins de matière est nécessaire à sa fabrication comparé aux autres produits étudiés.

L'écoprofile obtenu à l'issue de l'étude EuP montre que la phase de production ne représente que 20% de l'impact sur l'environnement sur l'ensemble du cycle de vie. Cependant, l'indicateur utilisé ne donne pas une image complète de l'empreinte environnementale. D'autres études de l'EPA montrent que la phase de production concerne beaucoup plus de catégories d'impact que la phase d'utilisation. Toute la difficulté réside dans la détermination de l'impact le plus critique pour le décideur .

Introduction

Nous entrons dans un siècle où se joue la recherche acharnée d'un équilibre savant entre croissance économique, développement humain et protection de l'environnement. L'objectif du développement durable, tel qu'il est admis dans les cercles où se concentrent les pouvoirs de décision, est de trouver les moyens d'accomplir les ambitions (de prospérité économique et sociale) de la génération actuelle tout en préservant la capacité des générations suivantes à assouvir leurs propres ambitions.

Selon le modèle de société en vigueur de nos jours : capitaliste et industriel, il est nécessaire de mettre à disposition une image réaliste et concrète, en accord avec la conception de progrès humain, de l'état actuel de nos capacités industrielles et de leurs impacts sur notre environnement. Ceci dans le but de permettre la prise de décision stratégique sur le long terme.

Le développement durable est intégré dans la grande majorité des grandes institutions publiques et privées, et est vu comme un investissement financier - même si immatériel- à part entière.

Les relations entre les créateurs de valeurs ajoutées et les consommateurs se complexifient de plus en plus. Dès l'instant qu'il prend conscience des enjeux éthiques et environnementaux, le public exige davantage de transparence et de moralité de la part des entreprises.

La traçabilité des produits est un des aspects concrets de ce besoin de transparence: être en mesure de définir exactement l'origine de chaque produit, de connaître son parcours exact tout au long de la chaîne d'approvisionnement, et par dessus tout, pouvoir déterminer l'impact sur l'environnement (social et naturel) de chacune de ces étapes.

L'ordinateur personnel est le produit phare de l'industrie électronique, qui est l'une des industries les plus complexes et les plus ramifiées de l'industrie moderne: connaître l'origine d'une pièce en cuivre contenue dans un ordinateur est impossible au vu de l'organisation des marchés et de la filière. Qu'en est-il de l'impact de l'extraction, ou du raffinage, ou du conditionnement de ce bout de cuivre sur l'environnement?

L'industrie électronique est à considérer comme une industrie vitale si l'humanité désire entretenir le mode de vie qu'elle a choisi, mais l'état des connaissances sur son impact sur l'environnement reste assez peu connu par le public.

Malgré le fait que les connaissances sur le sujet soient encore insuffisantes, ce présent rapport apporte quelques éléments de réponse à cette problématique. En se basant sur les études gouvernementales les plus récentes dans le domaine (directive EuP 2005), ce document s'articulera dans un premier temps, sur une présentation économique et technique de l'industrie des technologies de l'information et des communications (TIC), pour montrer dans un deuxième temps l'intérêt à effectuer des recherches sur l'impact de cette industrie sur

l'environnement, en effectuant une étude basée sur la méthode d'analyse de cycle de vie décrite par la norme internationale ISO-14040¹.

I - Les Technologies de l'Information et des Communication (TIC)

Cette appellation est utilisée pour regrouper toutes les technologies ayant pour but la manipulation et la transmission d'informations. De par cette définition, ce terme inclut donc les supports matériels ou « Hardware » et immatériels « Software » de traitement d'information. Il faut aussi ajouter les services liés à cette technologie, et toute l'infrastructure qui permet d'effectuer ces services. La limite n'est pas fondamentalement précise : doit-on prendre en considération le câblage des réseaux téléphoniques, ou l'acronyme TIC n'englobe-t-il que les outils qui interagissent directement avec les utilisateurs comme les téléphones?

La définition précise de ce secteur de l'économie est nécessaire car elle permet d'en délimiter les frontières, et ainsi, de comptabiliser ses performances financières, sa production, ses emplois et ses impacts sur l'environnement.

Il est communément admis que les TIC englobent :

- tous les moyens d'enregistrement de données (magnétiques, optiques, mémoire flash etc. excepté le papier, mais ce dernier argument est sujet à discussion).
- les technologies de diffusion de l'information (Radio, TV)
- les technologies de communication par l'image ou le son (microphones, caméras, téléphones, baladeurs, baffles etc.).
- les appareils de calcul (PC, Serveurs, Datacentres)
- tous les programmes informatiques commercialisés ou Softwares.
- toute l'infrastructure d'internet

1.1 Contexte économique global des TIC

Selon une analyse de Gartner Inc², cabinet d'analyse financière du marché des nouvelles technologies, les dépenses globales pour les TIC ont dépassé les 3400 milliards de \$US en 2008, soit plus de 7% du PIB mondial de 2006 ; c'est dire le poids considérable que représente de nos jours cette industrie qui connaît un taux de croissance à deux chiffres depuis son émergence. Selon le ministère de la défense américaine, l'industrie des TIC fait partie des industries classées comme stratégiques à même titre que l'énergie, la sidérurgie ou l'armement, et nombre des matières premières nécessaires au fonctionnement des ordinateurs sont considérées comme vitales pour les grandes économies dominantes et émergentes. Entre l'année fiscale 2007 et 2008, les dépenses totales ayant un lien direct avec les TIC ont augmenté de près de 8% selon le même rapport des analystes de Gartner Inc.

Le tableau suivant donne une idée chiffrée des dépenses des utilisateurs finaux de biens et services entrant dans la catégorie des TIC en milliards de \$US.

Tableau 1 Dépenses des consommateurs finaux en milliards de \$US

	2007	2008	2009
Hardware	382	408	423
Croissance annuelle (%)	10	7	4
Software	178	196	211
Croissance annuelle (%)	13	10	8
IT Services	748	819	872
Croissance annuelle (%)	10	10	7
Telecoms	1843	1983	2093
Croissance annuelle (%)	10	8	6
Total	3151	3406	3600
Croissance annuelle (%)	11	8	6

Source Gartner 2008

Malgré le recul récent de la monnaie américaine qui fait courir le risque d'un ralentissement de l'activité, et plus généralement, malgré la morosité que connaissent actuellement les marchés mondiaux, l'industrie des TIC résiste et démontre bien son caractère indispensable au maintien du mode de vie qu'a choisi l'humanité en ce début de siècle. La bonne santé du secteur s'explique par les faits suivants: la volonté des pays émergents pour une mise à niveau de leur développement technologique, le remplacement des systèmes obsolètes, l'innovation très active des TIC. Avant que les pays émergents aient rattrapé leur retard face aux leaders mondiaux, il faut s'attendre à une hausse continue des ventes de matériel informatique.

1.2 De la nécessité d'éclaircir les connaissances sur le cycle de vie du matériel informatique

Il apparaît clairement d'après le tableau 1 que la majorité du résultat du secteur des TIC est assurée par les télécoms et les services. L'ensemble des TIC emploie près de 5,54% de la population active dans les pays de l'OCDE³, à ceux-ci s'ajoute toute la population employée par toute la filière dans le reste du monde.

Le Hardware, dont le produit dominant est l'ordinateur personnel ou PC (60% du CA du Hardware est imputable au PC), arrive en troisième position avec un chiffre d'affaire de 408 milliards de \$US en 2008.

Il faut cependant tenir compte du fait que le Hardware est le support principal sur lequel se font les opérations liées aux services et au Software. Le matériel informatique apparaît comme la clé de voûte du secteur dont on ne peut négliger l'impact socio-économique et environnemental.

L'industrie du PC fête ses 34 ans en 2008. Considéré comme un objet de curiosité destiné à quelques passionnés à ses débuts en 1975, la place du PC dans la société a évolué au cours des années pour devenir un outil incontournable et quasi irremplaçable de notre civilisation.

Moins de 50 000 unités ont été vendues en 1975, pour une valeur avoisinant les 60 millions de \$US. En 2002, le chiffre d'affaire de l'industrie du PC a dépassé les 225 milliards de \$US, et les ventes se sont élevées à 128 millions d'unités selon un rapport de eTForecast⁴.

L'ère de l'information dont on parle tant sous-entend qu'il faut inclure les TIC dans la définition de l'Homme moderne. Malheureusement, l'empreinte environnementale des TIC

n'est pas négligeable. À l'heure où notre mode de vie implique l'utilisation de plus en plus massive de ces technologies, il est légitime de chercher à avoir une vision objective et rationnelle de l'impact environnemental d'un achat de matériel informatique, à commencer par l'industrie à proprement parler.

1.3 Organisation de l'industrie électronique

Le hardware se base majoritairement sur une industrie productrice de biens de consommation, dont la sphère d'influence dépasse largement les limites des TIC. L'industrie du Hardware est considérée comme faisant partie de l'industrie électronique.

L'industrie électronique est consommatrice de matière première et d'énergie. Elle a une des chaînes d'approvisionnement les plus complexes de l'industrie moderne, mais elle reste aussi l'une des plus mal connues du consommateur.

L'industrie électronique produit entre autres des ordinateurs et des produits rattachés à ces derniers comme les imprimantes, des équipements de communication et des produits audiovisuels. D'autres produits électroniques sont incorporés dans d'autres industries comme l'automobile, l'électroménager, ou sont destinés à d'autres marchés comme celui de l'armement, ou de l'aérospatiale.

Les produits électroniques contiennent une multitude de composants intermédiaires fabriqués par d'autres constructeurs. Les entreprises qui produisent les produits finis et les produits intermédiaires ont tendance à se regrouper géographiquement comme à la Silicon Valley en Californie, ou la région grenobloise en France. Cette proximité permet aux entreprises de collaborer plus facilement en R&D, de réceptionner plus rapidement de nouveaux produits, et de diminuer leurs coûts de gestion de stocks.

L'industrie électronique est totalement mondialisée. Tous les produits sont conçus dans des laboratoires situés dans quelques pays, les pièces détachées sont produites par des usines installées dans d'autres pays, puis sont assemblées dans des centres d'assemblages proches des marchés régionaux pour finalement être vendus dans les pays qui constituent ces marchés.

S'il existe des géants de l'industrie électronique comme notamment IBM, STMicroelectronics, Dell HP ou Intel, la grande majorité des entreprises sont de petite taille. Certaines se concentrent dans la recherche et développement, d'autres se consacrent uniquement à la production.

L'industrie électronique a beaucoup de segments différents. Les entreprises sont souvent classées en fonction de ce qu'elles vendent. En pratique ces segments sont les suivants:

- Production d'ordinateurs et de périphériques
- Production de systèmes de communication
- Production de produits audio-visuels
- Production de semi-conducteurs et de composants
- Production d'instruments de navigation, de mesure et de contrôle
- Production de matériel de stockage d'informations optique ou magnétique

Cette étude s'intéresse à la production d'ordinateurs destinés aux professionnels et au grand public ainsi qu'aux écrans. Il existe quelques grands constructeurs qui produisent la grande majorité des ordinateurs vendus sur le marché, le reste est vendu par de plus petites compagnies qui vendent leurs produits sur internet ou dans des marchés très localisés.

En général, le nombre de fournisseurs en produits intermédiaires est de l'ordre de la centaine pour les grandes compagnies (cf annexe sous traitant HP). Ces sous-produits sont typiquement

la carte mère, le CPU (*central processing unit*), la carte graphique, le disque dur, le boîtier d'alimentation etc. Au niveau de la production industrielle en masse, les principaux constructeurs (par exemple HP, Dell, Acer) à quelques exceptions près se contentent d'assembler les pièces qu'ils ont conçues et dont ils ont sous-traité la fabrication. (Intel, STMicroelectronics, Samsung...)

Ces sous-produits sont eux-mêmes constitués d'une multitude d'éléments plus petits : les composants électroniques comme les condensateurs, les puces au silicium, les circuits imprimés, les fils électriques etc.. Grossièrement, le nombre de parties unitaires dans un ordinateur s'élève à plus d'une dizaine de milliers.

Quand un particulier décide d'acheter un ordinateur, il implique par cette action toute une filière industrielle qui utilise une quantité importante de ressources naturelles et d'énergie, et qui génère plusieurs types de pollutions. La suite de cette étude abordera l'analyse d'impact de la production d'ordinateurs sur l'environnement en présentant les méthodes et les outils utilisés actuellement par les professionnels de l'environnement.

II- Mesurer les impacts du matériel informatique

II.1 L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

L'ACV est un outil multidisciplinaire de mesure globale des performances environnementales d'un produit ou d'un service. Elle est basée sur une approche systémique, c'est à dire que son sujet d'étude est vu comme un système dont la complexité dépasse le cadre dans lequel cet objet ou service rempli sa fonction. L'ACV couvre toutes les phases de la vie du produit, de sa genèse à son élimination, et couvre tous les impacts significatifs sur l'environnement de chaque étape de fabrication.

Comme tout autre outil de mesure, la pertinence d'une ACV dépend fortement de la manière dont elle est effectuée. Cette analyse se décompose en quatre phases distinctes liées les unes aux autres:

- Définition des objectifs et du champ de l'étude
- Analyse de l'inventaire du cycle de vie
- Évaluation de l'impact
- Prise de décision

Toutes ces phases ont leurs difficultés et leurs méthodes d'exécution propres. Mais l'étape dont découlera toute les autres est la définition de l'objectif de l'étude.

II.1.a Définition des objectifs et du champ de l'étude

A qui s'adresse l'étude ? Que cherche-t-on à montrer ? Telles sont les questions que doit se poser un analyste avant d'effectuer une ACV.

Cette analyse peut avoir pour but de comparer deux produits, il s'agit alors de *Benchmarking*, ou elle peut servir de document de travail pour la prise de décision politique (par exemple, les carburants d'origine végétale ont font l'objet de plusieurs ACV pour déterminer leur avantage écologique sur les carburants fossiles) ou à l'élaboration de directive et de réglementation comme la directive européenne EuP, ou plus simplement, elle peut permettre d'aider des décideurs à chercher à améliorer les performances environnementales de leurs produits.

Selon le but final et le commanditaire de l'étude, le travail sera plus ou moins global, plus ou moins précis.

Une fois l'objectif de l'étude défini, une série de décisions sont prises dans le but de définir les règles et les formalismes qui détermineront le déroulement de l'étude.

Ces décisions concernent dans l'ordre:

1. Les frontières du système: définir les « process » inclus et exclus
2. La catégorie des impacts: quels aspects environnementaux sont à prendre en compte, lesquels ne sont pas pertinents

3. Les unités fonctionnelles, les variables et les fonctions du système : les apports socio-économiques que le produit ou le service apporte.
4. Le Formalisme technique en vigueur, conventions, outils d'analyse d'impacts
5. Le public auquel est destinée l'ACV, et par conséquent, le niveau de précision de l'étude.

II.1.b Analyse de l'inventaire du cycle de vie

L'étape de l'analyse de l'inventaire de cycle de vie est exécutée par l'évaluation des intrants et des extrants des procédés unitaires qui composent le système global. A titre d'exemple, pour la grande majorité des ACV, la production d'énergie est un instant clé, et une source majeure d'impact sur l'environnement.

Considérons un procédé de fabrication de cristaux de silicium utilisés pour produire des semi-conducteurs, l'inventaire inclura tout le carburant et l'électricité consommés par toutes les opérations unitaires: fusion de la silice, cristallisation, transport du personnel, chauffage, éclairage des locaux, etc..

L'inventaire idéal inclurait les informations liées à l'extraction et au raffinage des carburants fossiles utilisés pour la production de l'électricité achetée par la mine. Il inclurait aussi tous les déchets et l'ensemble des émissions atmosphériques causées par le raffinage et la combustion dans une centrale du carburant pour produire cette énergie. Il en est de même pour le transport du carburant de la raffinerie jusqu'à la centrale. En réalité, il s'agit de toutes les étapes du cycle de vie.

Pour la plupart des ACV, tous ces procédés unitaires sont regroupés en un seul procédé unitaire appelé par exemple « Production d'énergie » qui englobe tous les impacts en amont. Ceci permet de réduire une quantité très importante de données et d'informations et de rendre l'analyse de l'inventaire plus facile.

II.1.c Évaluation de l'impact

L'analyse d'impact prend les données de l'inventaire et les convertit en indicateurs pour chaque catégorie d'impact.

Typiquement, les impacts étudiés sont les suivants:

- Changement climatique : des gaz tels que le dioxyde de carbone et le méthane absorbent et gardent la chaleur des rayonnements solaires dans l'atmosphère. L'augmentation de ces gaz par l'activité anthropique implique un réchauffement constant et inhabituel de l'atmosphère, entraînant des bouleversements sur les cycles climatiques.
- Dégradation de l'ozone stratosphérique : La couche d'ozone stratosphérique bloque les rayons ultra-violet nocifs au développement de la vie sur terre. Des produits chimiques tels les ChloroFluoroCarbone (CFC) réagissent avec cet ozone, amenuisant l'épaisseur de cette couche et causant par conséquent une augmentation des radiations d'UV sur la surface de la terre.
- Smog photochimique : mélange de polluants atmosphériques nocifs (NO_x et COV) interagissant sous l'effet du soleil. Issu essentiellement de la combustion de combustibles fossiles, le smog photochimique est surtout observé en zone urbaine dense.
- Acidification : le rejet de substances à caractère acide dans l'atmosphère entraîne des pluies acides nuisibles pour les surfaces, les sols et les ressources aquatiques

- Eutrophisation : Dans les eaux de surface, l'activité biologique est contrôlée par la concentration en nutriments azotés et phosphatés. Lorsque ces deux nutriments sont en trop grande quantité dans une eau, certains organismes comme les algues se développent plus vite que la normale et consomment l'oxygène présent dans l'eau, condamnant ainsi les autres organismes, comme les poissons à l'asphyxie et à la mort.
- Toxicité humaine et environnementale : effets des substances sur les organismes et les éco-systèmes pouvant présenter un risque immédiat ou différé sur la santé.
- Épuisement des ressources naturelles.

Une analyse d'impact considère chaque catégorie d'impact et la modélise en utilisant un indicateur approprié. Un indicateur est un résultat numérique qui est fonction de l'impact potentiel généré par l'activité étudiée. En réalité, il est difficile de noter un impact et de déterminer la contribution d'une émission atmosphérique au réchauffement climatique global. Le changement climatique est mesuré grâce au potentiel d'effet de serre des gaz considérés, exprimé en tonne équivalent CO₂ (teqCO₂). Ainsi, la combinaison d'informations sur les rejets atmosphériques de CO₂, de méthane, de protoxyde d'azote (N₂O) ou de PerFluoré Carboné (PFC) permet d'avoir un seul résultat qui rend compte des émissions totales causées par la fabrication d'un produit, et donc l'empreinte d'un produit ou service sur le changement climatique. Cet indicateur ainsi mesuré modélise une contribution à un phénomène environnemental. Il ne modélise pas l'impact sur la santé ou sur les écosystèmes, causés par la sécheresse, les inondations, ou la hausse du niveau des océans, ou tous les changements imputables à une hausse de la température.

Les autres catégories d'impact sont évaluées de la même manière, en utilisant une unité de référence relative à chaque impact. Par exemple, pour la toxicité humaine, on peut mesurer le potentiel en métaux lourds en utilisant l'équivalent Nickel, pour l'eutrophisation, on utilise le kg équivalent phosphate, etc. Il suffit de fixer l'indicateur le plus représentatif et de s'y tenir tout au long de l'ACV.

II.1.d La prise de décision

La liste des indicateurs est appelée « écoprofile ». Cette étape de l'étude marque la fin de l'étude scientifique. Les étapes suivantes sont basées sur des jugements de valeurs, et dépendent des objectifs de l'étude.

II.2 Le cycle de vie d'un ordinateur

II.2.a Description du sujet de l'étude

Conformément à la méthode ACV, il convient tout d'abord de définir le sujet de l'étude.

Les analyses de cycle de vie publiques d'ordinateurs sont rares, on en recense une seule qui suit scrupuleusement la norme ISO 14040, datant de 1998 sur internet⁵.

Ce genre de document constitue un document de travail assez opaque et volumineux pour un lecteur non averti désirant se renseigner sur le sujet. La majorité des documents sont soit des ACV sur des parties constitutives d'ordinateurs⁶, des ACV de produits électroniques autres

que les ordinateurs⁷ ou des études inspirées de la méthode^{8,9}.

L'étude disponible la plus récente est celle qui a servi de document de travail pour l'élaboration de la directive européenne EuP sur l'éco-conception des produits utilisant de l'énergie. Les résultats qui seront présentés par la suite sont ceux de l'étude préparatoire de la directive EuP de la commission européenne⁸.

Ce présent travail ayant pour but de donner une idée d'ensemble sur l'impact de la production d'ordinateurs, les produits étudiés seront par conséquent des modèles de base représentant une moyenne des produits mis en ventes sur le marché.

La méthodologie de sélection des produits est la suivante:

Les principaux constructeurs ont fourni les données. Chaque donnée est une moyenne de données de plusieurs constructeurs, pour des raisons de confidentialité, et aussi pour obtenir des données représentatives du parc européen moyen. Les moyennes couvrent une large partie du marché du fait qu'elle proviennent des meilleures ventes effectuées par les constructeurs principaux. Initialement, six catégories de produits ont été identifiées. Cependant, du fait du manque d'informations, seuls quatre types de produits sont étudiés et sont les suivants:

Desktop ou ordinateur de bureau:

- Processeur de 3 GHz (ou équivalent)
- Carte graphique intégrée
- 512 MB RAM et 80 GB HDD

Laptop ou ordinateur portable:

- Processeur de 1,7 GHz (ou équivalent)
- Bonnes performances graphiques 3D
- Ecran 15 pouces
- 512 MB RAM et 60 GB HDD

Écran à cristaux liquides ou LCD de 17 pouces, résolution 1280x1024

Écran à tube à rayons cathodiques ou CRT de 17 pouces.

II.2.b Inventaire de cycle de vie

La composition des produits étudiés a été déterminée grâce à un questionnaire soumis aux constructeurs qui demande d'indiquer la masse de certains matériaux contenus dans les produits finis. Du fait du caractère public de l'étude EuP, il a été convenu de faire en sorte que les données publiées ne permettent pas de remonter jusqu'aux différents constructeurs pour sauvegarder le secret industriel. Ceci est une des faiblesses de cette étude car les constructeurs étaient libres de fournir les informations qu'ils jugeaient bonnes à publier, par conséquent, la robustesse des résultats reste discutable. Cet aspect de l'étude a été confirmé par le représentant de HP auprès du syndicat européen de l'industrie électronique EICTA.

Cependant, on peut considérer que ces informations donnent une image suffisamment précise pour un utilisateur qui souhaiterait se renseigner sur l'impact de la production d'ordinateurs sur l'environnement.

III Résultats de l'analyse de cycle de vie de la directive EuP

III.1 La phase de production

III.1.a. Recensement des matériaux constitutifs

Les matériaux ont été regroupés en sept catégories :

- Les plastiques bruts ou « Bulk Plastics », qui incluent l'ABS, le PVC le Poly Propylène (PP) ou le Poly Styrène (PS).
- Les plastiques techniques incluent les Poly Carbonés (PC), les Poly Métacrylates de Méthyle (PMMA) ou l'époxy.
- Les métaux ferreux ou ferrailles, ayant des propriétés magnétiques identiques à celles du fer, typiquement on retrouve le Fer et tout les alliages à forte concentration en fer comme l'acier, la fonte etc.
- Les métaux non ferreux englobent tous les métaux à l'exception du Fer et de ses alliages de concentration supérieure à 10%). Les principaux sont l'aluminium, le cuivre, le plomb, le chrome, le nickel, le cobalt etc.
- L'électronique, ou tous les circuits imprimés ou PWB (*printed wiring board*) incluant les barrettes de RAM, les cartes PCI et les ports externes. La fraction des matériaux constitutifs est la suivante: Pour 1000g, 335g d'alliage de Cuivre + 5g de Cu/Ni plaqués, 635g de polymères + 0,15g d'or. L'unité fonctionnelle usuelle est le m² de PWB. À cela s'ajoutent tous les composants électroniques à base de matériaux semi-conducteurs comme le silicium par exemple.
- Le revêtement ou « Coating » représente toutes les dépositions de matière sur un support : soit la peinture, les implants de poudre et d'additifs métalliques divers.
- La catégorie « divers » englobe principalement le verre, le carton et la céramique.

Un tableau plus précis est présenté en annexe I

Il est plus intéressant de comparer le Desktop au Laptop en prenant en compte le service identique qu'ils rendent: calcul plus affichage. Par conséquent on combinera les Desktops aux deux écrans, réduisant le nombre d'objets analysés à trois.

Catégorie des matériaux	Desktop + LCD		Desktop + CRT		Laptop	
	g	%	g	%	g	%
Plastiques Bruts	1792	9	2591	9	265	7
Plastiques techniques	1587	8	949	3	587	16
Métaux ferreux	9930	51	7037	24	489	13
Métaux non ferreux	1216	6	1223	4	235	6
Électronique	1440	7	1445	5	914	24
Revêtement	272	1	343	1	5	0
Divers	3325	17	15563	53	1284	34
Total	19562	100	29151	100	3779	100

Tableau 2 : inventaire de cycle de vie simplifié des trois types de produits

Il faut noter aussi que lors de cette étude, les taux de recyclage ont été pris en compte en se basant sur les pratiques les plus courantes de l'industrie. Les plastiques sont considérés comme recyclés à 0%, les métaux ferreux le sont environ à 80% et les non ferreux le sont à 70%.

Ces résultats nous permettent de dire, dans une première analyse sur la masse des matériaux utilisés pour la production que les ordinateurs portables sont, à même service rendu, plus économes en matières premières. Ce résultat reste relatif du fait que le Desktop muni d'un écran LCD a plus de 50% de son poids qui est recyclé à 80%. Soit sur près de 20 kg de matériel, 8 kg sont recyclés (soit 40%), alors que pour 3,8 kg de Laptop, seuls 0,5 kg le sont (soit 13%). Cependant le poids total de matière utilisée reste largement supérieur pour les ordinateurs de bureau: 5 fois plus pour le Desktop + LCD et 7,5 fois plus pour le Desktop + CRT

III.1.b Ressources et déchets produits pendant la production

Pour produire un ordinateur, il est nécessaire d'utiliser de l'énergie et de l'eau, qui vont permettre de façonner et de transformer les matières premières brutes en produit fini. Cette production génère aussi, au niveau des usines, des déchets ou des rebuts, qui se doivent d'être identifiés et comptabilisés.

La production est divisée en deux étapes: L'acquisition des matières brutes, (colonne Mat) et la transformation de ces matières brutes en produit finis (colonne Prod). Ces résultats sont les sommes des inventaires exhaustifs de cycle de vie. La consommation d'eau, d'énergie et la production de déchets pour chaque matériau est recensée dans des bases de données présentes en annexe II. Une autre source de l'agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA)¹⁰ décrit précisément les déchets de certains process de production de circuits imprimés et d'écrans CRT

- L'énergie totale utilisée comprend l'énergie primaire et secondaire utilisée, soit toute source d'énergie calorifique et toute source d'énergie électrique utilisée par chaque étape.
- L'eau process correspond à l'eau qui a due être utilisée directement dans le procédé de transformation de la matière (solvant ou réactif par exemple)
- L'eau de refroidissement correspond à l'eau utilisée par les échangeurs de chaleurs et tout autre système de refroidissement nécessaire au procédé de transformation de la matière.
- Les déchets banals sont les déchets classés comme des déchets industriels banals ou DIB, qui peuvent être mis en centre de stockage de classe III ou II. Ces déchets ne sont pas significativement dangereux pour l'environnement s'ils sont traités correctement.
- Les déchets dangereux sont spéciaux ont un caractère toxique ou évolutif dans le temps, ce qui nécessite un traitement adapté plus complexes. Les déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE) font partie de ces déchets dangereux.

Les déchets sont les rebuts de production et tout ce qui est produit et n'est pas valorisé par l'unité de production qui cherche alors à s'en débarrasser.

Tableau 3 : inventaire des ressources et déchets

Ressources et déchets	Unité	Desktop + LCD			Desktop + CRT			Laptop		
		Mat	Prod	total	Mat	Prod	total	Mat	Prod	total
Énergie totale	MJ	2753	490	3243	1942	280	2222	1118	148	1266
dont électricité en % d'énergie totale	%	53	37	50	52	33	49	56	20	52
Eau (Process)	L	900	20	920	746	14	760	522	10	532
Eau (Refroidissement)	L	743	131	874	694	78	772	249	41	290
Déchets Banales/mis en décharge	g	35493	1399	36892	10074	594	10668	4231	247	4478
Déchets dangereux/Incinérés	g	704	7	711	487	4	491	229	3	232

Dans un premier temps, on observe que pour les trois cas, la moitié de l'énergie utilisée est sous forme électrique. Ce qui s'explique par le fait que l'industrie est très automatisée. La part d'énergie fossile sert essentiellement à la préparation des matières premières brutes : polymérisation des plastiques, thermoformage, moulages etc. on remarque de plus que sur la part d'énergie électrique utilisée dans la préparation des matières premières, une grande partie est utilisée par les fours à arcs nécessaires à la préparation de divers composés métalliques ou semi-conducteurs. Les fours à arc sont des fours électriques utilisés en sidérurgie. Ils permettent un meilleur contrôle de la température et ont une capacité de chauffage de près de 2500°C.

Il est possible d'aborder le volet de l'énergie en fonction de la quantité de carburant fossile nécessaire à sa production.

Un baril de pétrole brut équivaut à 159 litres. En supposant que la masse volumique moyenne du pétrole brut est de 0,8kg/l, et qu'une tonne équivalent pétrole est égale à 41,87 Giga joules, on peut calculer le nombre de barils nécessaire à la production de l'énergie utilisée pour la production de chaque produit, à cela il faut ajouter le pétrole qui a servi à la production des polymères qui composent l'ordinateur.

Nous obtenons donc pour le Desktop + LCD 0,52 barils, pour le Desktop + CRT 0,41 barils et 0,24 pour le Laptop. Il faut mettre ces chiffres en relation avec la production annuelle moyenne de pétrole qui avoisine les 30 milliards de barils. En considérant qu'un ordinateur utilise en moyenne 0,4 barils, et sachant que le nombre d'ordinateurs installés en 2008 dépasse le milliard d'unités, nous en arrivons à considérer le fait que l'ensemble du parc d'ordinateurs correspondra à 400 millions de barils, soit un peu moins de la moitié de la consommation annuelle en équivalent baril de pétrole de l'Allemagne¹¹.

En ce qui concerne l'utilisation de l'eau, on remarque aussi que la partie préparation de matière première utilise la plus grande partie de l'eau. En effet, l'eau de process est utilisée pour créer les matériaux, et son usage est beaucoup plus faible pour leur assemblage. L'eau est utilisée comme solvant, ou comme réactif pour certaines réactions chimiques nécessaires à la production de certaines substances entrant dans la composition du matériel informatique. L'eau de refroidissement est une eau qu'on utilise pour refroidir d'autres éléments (trempe des métaux par exemple), ou pour contrôler les températures des procédés chimiques. Par exemple, on utilise l'eau de refroidissement pour réguler la température de réacteurs de

polymérisation du fait du dégagement important de chaleur. Il faut noter que cette eau n'est pas perdue pour autant, elle ne se mélange pas aux réactifs, par contre comme elle absorbe la chaleur de l'objet à refroidir, il arrive qu'elle soit trop chaude pour être rejetée dans le milieu naturel. Par conséquent, cette eau est utilisée en circuit fermé au sein du process.

Les mêmes tendances se retrouvent pour la production de déchets. D'une manière générale, la phase de production des matières premières utilise plus de ressources et génère plus de déchets. Ceci s'explique par le fait que les opérations effectuées dans cette phase sont du ressort de l'industrie lourde comme l'extraction minière, la sidérurgie, la plasturgie, la métallurgie etc. alors que la phase de production concerne essentiellement l'assemblage et le conditionnement.

A partir des résultats de l'étude EuP, il serait aussi intéressant de comparer le potentiel en consommation de ressource et de génération de déchets lié à la production de chaque produit. Ce potentiel correspond à la quantité de ressources ou de déchets par unité de masse de produit. Ainsi nous pouvons comparer deux procédés un à un.

Tableau 4 : inventaire des ressources et déchets par kg de produit

		Desktop + LCD	Desktop + CRT	Laptop
Ressources et déchets/kg de produit	Unité	total	total	total
Énergie totale	MJ/kg	0,17	0,08	0,34
Eau (Process)	L/kg	0,05	0,03	0,04
Eau (Refroidissement)	L/kg	0,04	0,03	0,13
Déchets Banales/mis en décharge	g/kg	1,89	0,37	2,29
Déchets dangereux/Incinérés	g/kg	0,04	0,02	0,03

Ce que nous pouvons remarquer en premier lieu, c'est que le Laptop nécessite plus d'énergie à la production que les deux autres produits (rapporté à l'unité de poids), suivi du Desktop équipé d'un LCD. Le point commun entre ces deux produits est justement l'affichage à cristaux liquides, qui utilise des procédés plus énergivores et qui génère aussi plus de déchets banals. Mais le poids largement inférieur du Laptop nuance cet aspect, compte tenu du poids du Desktop équipé d'un CRT (*cf. tableau 2*).

III.1.c Rejets dans l'environnement

Il s'agit des flux de polluants émis par les activités industrielles impliquées pour la production des produits étudiés. Ne sont pas pris en compte ici les impacts en cours d'usage du matériel, ni les impacts de leur fin de vie.

Chaque Flux est calculé avec une unité de base relative à chaque catégories d'impact retenue dont les équivalences sont précisées dans le rapport de méthodologie de la directive EuP¹² pour chaque substance.

Les catégories d'impacts retenues sont:

- Le réchauffement climatique comptabilisé par les émissions de GES converties en équivalent CO₂.
- La destruction de la couche d'ozone comptabilisée. Les émissions sont converties en équivalents R-11, ou TrichloroFluoroMéthane (CCl₃F) qui est une molécule ChloroFluoroCarbonée (CFC).

- L'acidification comptabilisée en équivalent SO₂.
- Les Composés organiques volatiles (COV) comptabilisés en gramme. Leur impact sur l'environnement est général et touche plusieurs autres impacts.
- La toxicité humaine et environnementale est comptabilisée par les Polluants Organiques Persistant (POP) tels les Dioxines, les Furanes ou les PCB, comptabilisés en ng i-Teq, les métaux lourds comptabilisés en équivalent Nickel et les HAP qui sont des molécules toxiques ayant un effet mutagène sur les êtres vivants.
- L'eutrophisation est comptabilisée en équivalent Phosphate (PO₄).

Tableau 5 : inventaire des émissions dans le milieu naturel

Rejets atmosphériques	Unité	Desktop + LCD			Desktop + CRT			Laptop		
		Mat	Prod	total	Mat	Prod	total	Mat	Prod	total
GER	MJ	2753	490	3243	2741	473	3214	1118	148	1266
GES en GWP100	kg CO2 eq	163	30	193	159	29	188	71	9	80
Destruction couche O3	mg R-11 eq	négligeable								
Acidification	g SO4 eq	1307	146	1453	1414	143	1557	445	50	495
COV	g	10	5	15	82	5	87	6	2	8
Polluant Organiques Persistant (POP)	ng I Teq	240	23	263	190	18	208	23	2	25
Métaux Lourds	mg Ni eq	259	55	314	340	44	384	65	4	69
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	mg Ni eq	172	3	175	164	4	168	119	2	121
Aérosols (poussières..)	g	118	34	152	351	34	385	37	14	51
Rejets aquatiques										
Métaux Lourds	mg Hg/20	519	1	520	528	1	529	369	0	369
Eutrophisation	g PO4	11	1	12	12	1	13	4	1	5

Nous pouvons retrouver les mêmes tendances remarquées dans le tableau des ressources et déchets: la part de la phase de production des matières premières est plus importante du fait du caractère plus polluant des opérations engagées dans cette phase.

Chaque impact est indépendant et n'est pas comparable à un autre. Cependant, pour pouvoir juger à partir d'un profil environnemental, il faut réduire le nombre d'indicateurs. L'étude EuP a mis en évidence le fait que l'utilisation d'énergie est un aspect de plus grande importance que les émissions de COV et l'eutrophisation du fait de son ampleur relative. De plus, l'utilisation d'énergie est fortement corrélée avec l'acidification et les émissions de gaz à effets de serre. Ceci peut se comprendre par le fait qu'un kWh acheté à un distributeur d'électricité a nécessité la combustion d'une certaine quantité de carburant fossile, et donc a émis dans l'atmosphère des GES et du SO₂. Il s'agit d'émissions indirectes, comptabilisées par le Plan National d'attribution des Quotas d'émissions, l'application du protocole de Kyoto en France. Par conséquent, l'énergie totale utilisée ou *Gross Energy Requirement* (GER) est utilisée comme un indicateur important à partir duquel on peut prédire les autres impacts de manière indirecte.

Le produit le plus énergivore dans sa phase de production est le Desktop équipé d'un écran LCD, suivi de près par le Desktop associé à un CRT puis en final le Laptop (2,5 fois moins).

III.2 la phase de distribution

L'impact de cette phase est considéré comme proportionnel au volume du produit fini. L'impact de la distribution dépend aussi du lieu d'assemblage de l'ordinateur. L'écrasante majorité des produits électroniques proviennent d'usines asiatiques.

Les volumes retenus pour les produits utilisés sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 6 : volume des produits conditionnés

Produit	Volume (m3)
Desktop	0,09
Laptop	0,02
LCD	0,04
CRT	0,1

Les distances retenues sont de 12 000 km par mer et 10 000 km par air pour les transports extra communautaires et de 1000 km (90% par camion et 10% par voie ferrée) à l'intérieur de l'Europe et finalement 500 km des entrepôts aux magasins par des camions de taille moyenne. Les dépenses d'énergies annexes telles que le chauffage des locaux, l'éclairage sont pris en compte.

Voici les résultats de l'analyse de la phase de distribution:

Tableau 7 : inventaire des émissions dans le milieu naturel de la phase de distribution

		Desktop + LCD	Desktop + CRT	Laptop	
Ces résultats sont issus de données générale s sur les perform ances environn emental es des moyens de transport	Rejets atmosphériques	Unité			
	GER	MJ	560	772	122
	GES en GWP100	kg CO2 eq	43	59	10
	Destruction couche O3	mg R-11 eq	négligeable		
	Acidification	g SO4 eq	142	197	30
	COV	g	6	8	1
	Polluant Organiques Persistant (POP)	ng I Teq	2	2	0
	Métaux Lourds	mg Ni eq	16	21	4
	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	mg Ni eq	12	15	4
	Aérosols (poussières..)	g	146	213	23
	Rejets aquatiques				
	Métaux Lourds	mg Hg/20	0	0	0
Eutrophisation	g PO4	0	0	0	

s couramment utilisés dans le fret de marchandise. Les détails sont présentés en annexe II

III.3 La phase d'utilisation

La phase d'utilisation a été étudiée en prenant en compte un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

En effectuant une enquête auprès d'un échantillon représentatif d'utilisateurs, l'étude s'est basée sur la consommation d'énergie pendant les différents modes de fonctionnement de l'ordinateur (veille, marche, arrêt), puis sur le nombre d'heures d'utilisation annuelle, faisant la différence entre l'utilisation à des fins professionnelles et l'utilisation à des fins personnelles.

Les durées annuelles d'utilisation sont différentes selon que l'ordinateur est utilisé en milieu

professionnel ou au domicile du consommateur.
Voici les résultats en termes de consommation électrique:

Tableau 8 : répartition des produits en fonction de leurs utilisations

	Professionnel (%)	Personnel (%)
Desktop	30	70
Laptop	60	40
LCD	30	70
CRT	30	70

Les impacts sont calculés à partir de bases de données (annexes) industrielles sur les émissions de polluants liées à la production d'électricité. Par exemple, chaque kWh émet 458,21 kg équivalent CO₂, 3,95 g de COV etc.

Tableau 9 : moyenne de la consommation d'énergie sur l'ensemble de la durée de vie (unité : MJ)

Mode d'utilisation	Desktop +LCD	Desktop + LCRT	Laptop
Professionnelle	19577	26677	5832
Personnelle	13183	16930	3627
moyenne	15101,2	19854,1	4950

Il s'agit de la phase qui consomme le plus d'énergie tout au long du cycle de vie selon la méthode utilisée pour l'étude EuP. En moyenne elle représente à elle seule plus de 80% de la consommation totale d'énergie pendant tout le cycle de vie. Cependant, deux points sont à préciser pour mieux comprendre ce résultat.

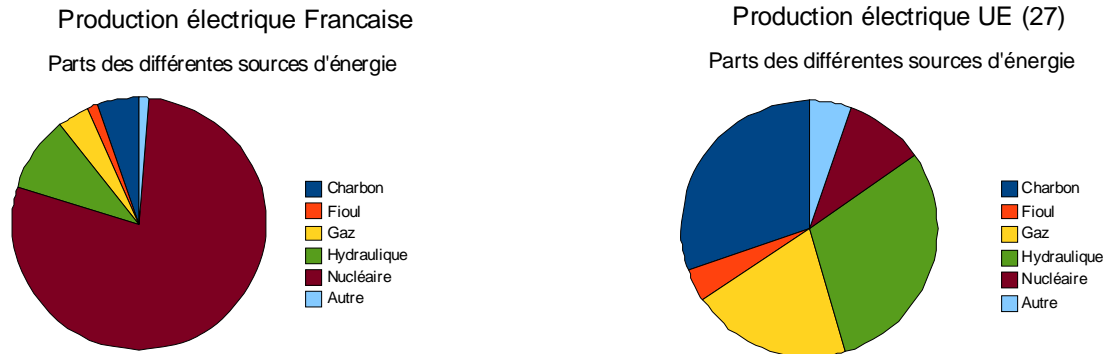
D'après le sondage effectué pour l'étude, la durée de vie moyenne en 2005 d'un Desktop est de 6,6 ans, et pour un Laptop elle est de 5,6 ans. Une variation de deux ans dans la durée de vie d'un ordinateur peut complètement changer l'écoprofile comme nous le verrons plus loin.

Le deuxième point important à prendre en considération est l'origine de la fabrication de l'électricité.

La directive EuP se base sur une moyenne européenne, or il existe une très grande diversité dans le parc de centrales électriques en fonction des pays: la France par exemple produit 80% de son électricité à partir du nucléaire alors que l'Allemagne s'est retiré du nucléaire.

Le graphique suivant¹³ montre les parts des différentes sources d'énergie dans la production européenne et française en 2005.

graphique 1 : répartition des sources d'électricité en France et dans l'UE (27)



En se basant sur la récente analyse de cycle de vie du kilowattheure français¹⁴, et en supposant que les procédés des différentes centrales à travers l'Europe sont identiques en termes de rendement énergétique et en terme de pollution atmosphérique (ce qui est loin d'être le cas en réalité, malgré tout, les résultats restent sous-estimés), nous pouvons déterminer une moyenne d'émissions de CO₂ pour un kWh français et un kWh européen grâce au tableau suivant¹:

Tableau 10 : Potentiel de réchauffement climatique des différentes sources d'électricité (France et UE (27))

	émissions par source	France	UE (27)
Origine	kg CO2 eq / Mwh	Gwh	Gwh
Charbon	1000	30641	1000829
Fioul	900	7227	138503
Gaz	550	22961	663744
Hydraulique	10	56404	997699
Nucléaire	10	451529	340846
Autre		6589	169379
Total		575351	3311000
moyenne d'émission (kgCO2eq/MWh)		96,44	478,71

Par cette simple analyse, il est possible de dire que l'électricité européenne génère autant de gaz à effet de serre que si toute la production était faite à partir de gaz naturel. Or, la production française en émet près de cinq fois moins. En supposant que l'électricité utilisée en France provient exclusivement de centrales françaises (la balance commerciale de l'électricité française est excédentaire à 90%), nous pouvons dire que l'utilisation d'un ordinateur en France génère 4,7 fois moins de GES que dans le reste de l'Union Européenne.

III.4 Ressources et déchets produits en fin de vie

Les nouvelles lois sur les DEEE mises en application prévoient que au moins 75% du poids des ordinateurs en fin de vie entrent dans le circuit de recyclage, avec un maximum de 10% de valorisation énergétique. Les données obtenues auprès des producteurs et des compagnies de recyclage indiquent que 95% du poids des ordinateurs **collectés** dans les DEEE (moins de 10% du tonnage total des ordinateurs en 2007) sont recyclés et les 5 pour cents restants sont

mis en décharge (enfouissement ou incinération).

Cependant, les impacts calculés sont très imprécis. Une étude de l'ADEME¹⁵ démontre que le manque d'informations sur l'ACV de la filière de recyclage des DEEE est très important, notamment en ce qui concerne la pollution persistante des sols et des nappes phréatiques par les matériaux dangereux contenus dans le matériel électronique.

D'une manière générale, il est difficile de déterminer la contribution d'un produit comme l'ordinateur à des phénomènes complexes et difficilement mesurables tels que l'impact sur les sols, la pollution des nappes phréatiques etc. Les cas d'intoxication de riverains de sites de production ou de sites de recyclage montrent bien que l'impact sur le réchauffement climatique n'est pas le seul pertinent. Mais pour déterminer les causes réelles de ce type de contamination, il faudrait effectuer une analyse des sites industriels et non pas seulement des produits issus de ces sites.

III.5 Comparaison de différents scénarii de cycle de vie

III.5.a Impact de la durée de vie d'un produit

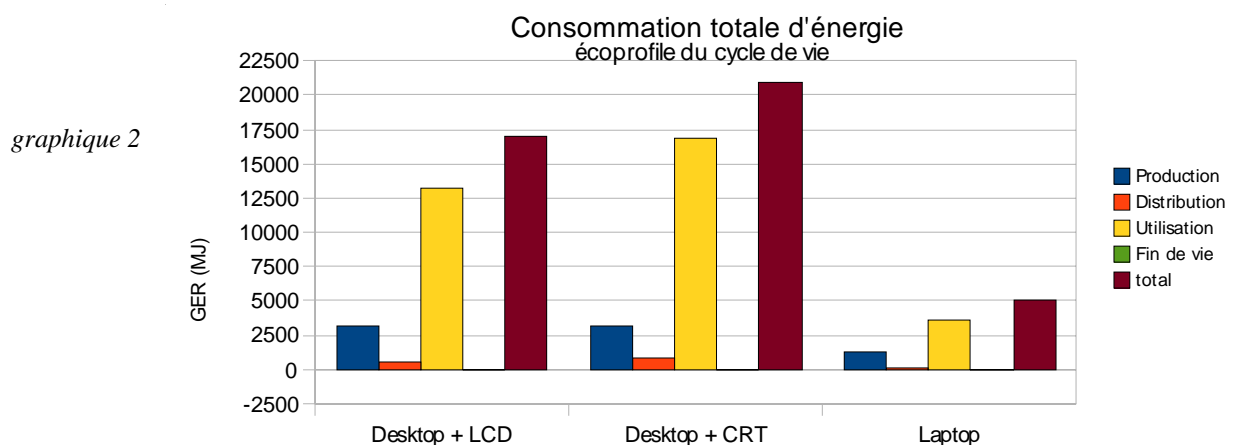
L'objectif initial de l'étude préparatoire EuP est la détermination des objectifs d'amélioration du cycle de vie des équipements consommateurs d'énergie dans le but de définir des critères d'éco-conception à imposer à toute l'industrie. Tout le cycle des produits dont il est question a été analysé de la même manière, en émettant des hypothèses particulières pour chaque phase. Par exemple, le transport a été calculé sur la base du volume de l'objet à transporter, jugeant que l'impact serait proportionnel au volume. Cette hypothèse est très approximative, elle se base sur les moyennes des commandes des pays européens, et sur les lieux d'assemblage des produits. Cette étape a été très largement sous-estimée selon certains représentants de constructeurs.

La consommation électrique pendant la phase d'utilisation a été définie sur la base de la durée de vie moyenne d'un ordinateur. Là encore plusieurs hypothèses simplificatrices ont été faites du fait de la complexité du problème.

La fin de vie est évaluée en fonction des chiffres communiqués par les principaux recycleurs uniquement sur le territoire européen. Ne sont pas pris en compte les ordinateurs de seconde main exportés.

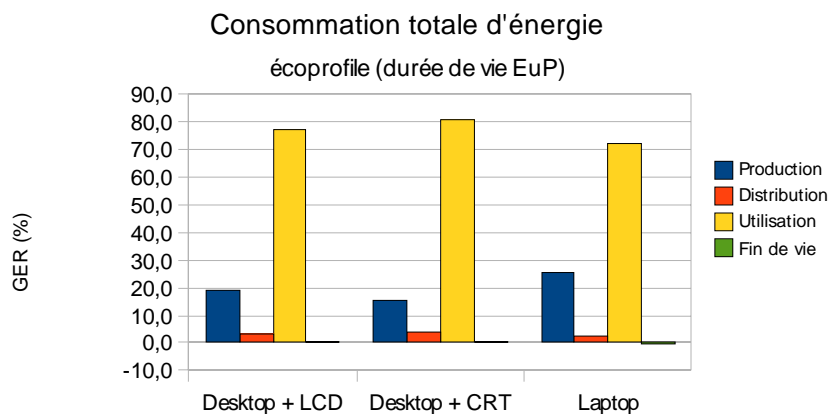
Le graphique suivant montre la consommation totale d'énergie (GER) pour chaque produit, sur chaque étape du cycle de vie:

La confrontation des trois profils énergétiques calculés par EuP représentée sur le graphique 2 montre toutes les phases du cycle de vie, le Laptop est celui qui consomme le moins d'énergie, et donc, qui émet le moins de GES et le moins de gaz acides.



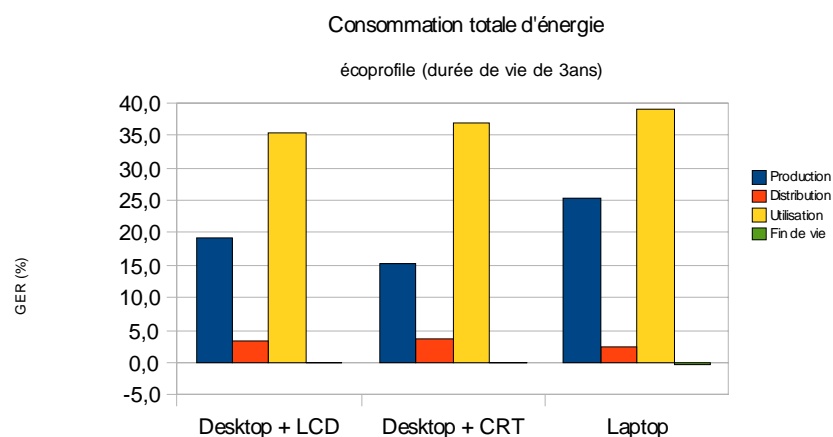
Nous pouvons voir sur le graphique n°2 que la consommation d'énergie de la phase de production ne représente que 20% de la consommation totale. Le reste est presque entièrement dû à l'utilisation du matériel. Les conclusions de l'étude EuP précisent donc que les efforts à faire doivent se concentrer principalement sur l'optimisation énergétique des ordinateurs pendant la phase d'utilisation. Nous rappelons que les hypothèses de calcul sont telles que la durée de vie des ordinateurs est de 5,6 ans pour les Laptops et de 6,6 pour les Desktops et leurs écrans. Le graphique n°3 montre les parts de chaque étape du cycle de vie dans la consommation énergétique selon la durée de vie retenue par EuP

graphique 3



Certaines entreprises ne conservent pas leurs ordinateurs au delà de leur période d'amortissement financier, soit environ trois ans. L'importance de la phase d'utilisation vis à vis de la phase production s'en trouve changée comme le montre le graphique n° 4.

graphique 4



Avec une approche plus ciblée du problème, nous remarquons que les besoins d'amélioration du matériel ne sont plus tout à fait les mêmes, la part de l'utilisation n'est plus aussi dominante que le scénario retenu par EuP.

III.5.b Différentes habitudes de consommation

Du point de vue de l'acheteur soucieux de l'environnement, la possibilité d'acheter un nouvel ordinateur plus efficace dans sa consommation énergétique serait intéressante si l'on considère que la puissance nominale d'un ordinateur ne change pas entre deux améliorations du boîtier d'alimentation. A titre d'exemple, l'efficacité d'un boîtier d'alimentation au début des années 2000 était de 50 à 60%, de nos jours pour un ordinateur EnergyStar V4, l'efficacité est de 85% (soit une augmentation de 3,25% annuelle). Quel serait le meilleur compromis en sachant qu'il faut un peu moins de deux ans d'utilisation pour égaler la consommation énergétique de la phase de production?

L'achat durable passe avant tout par une gestion durable du parc informatique. L'idée d'acheter des ordinateurs plus performants est certes intéressante, mais tout réside dans le choix de la date de fin de vie des ordinateurs.

La production des ordinateurs types correspond respectivement pour le Desktop + LCD, le Desktop + CRT et pour le Laptop à 1,62 1,25 et 1,95 années d'utilisation en termes de consommation d'énergie. Au delà de ces temps, l'utilisateur a le choix de déterminer l'écoprofile de son produit. Le fait d'acheter un ordinateur qui fera économiser de l'énergie sur l'ensemble du cycle de vie correspondrait à acheter un ordinateur dont l'efficacité du boîtier d'alimentation et la puissance de fonctionnement sont telles qu'elles économiseraient in-fine l'énergie correspondante à une utilisation d'une durée égale à celle calculée plus haut. Ce qui paraît assez irréaliste compte tenu de la quantité d'énergie que cela représente. **L'allongement de la durée de vie reste l'un des moyens les plus efficaces pour réduire l'impact des ordinateurs sur l'environnement.**

Il est relativement facile de se donner une idée du comportement de consommation le plus économe en énergie. Trois scénarii correspondant à trois types de consommation ont été retenus pour une simulation faite sur 12 ans d'utilisation. Les chiffres de la consommation d'énergie sont évalués à partir des résultats d'EuP présentés plus haut.

Les scénarii sont les suivants:

Scénario 1: L'utilisateur renouvelle son matériel à l'expiration de la garantie maximale (3 ans pour les professionnels)

Scénario 2 : L'utilisateur attend le plus longtemps possible avant de renouveler son matériel (tous les 6 ans)

Scénario 3 : L'utilisateur renouvelle son matériel dès qu'un modèle plus économe en énergie apparaît sur le marché (tous les 2 ans)

L'écoprofile du matériel évolue à chaque nouveau modèle, soit tous les deux ans pour cette simulation, l'efficacité énergétique des boîtiers d'alimentation est augmentée grossièrement de 7,5% et le GER de la phase de production baisse de 2%. Ce dernier chiffre est estimé en fonction des objectifs d'amélioration continue des principaux constructeurs certifiés ISO-14 001 (- 20% de GES en 10 ans).

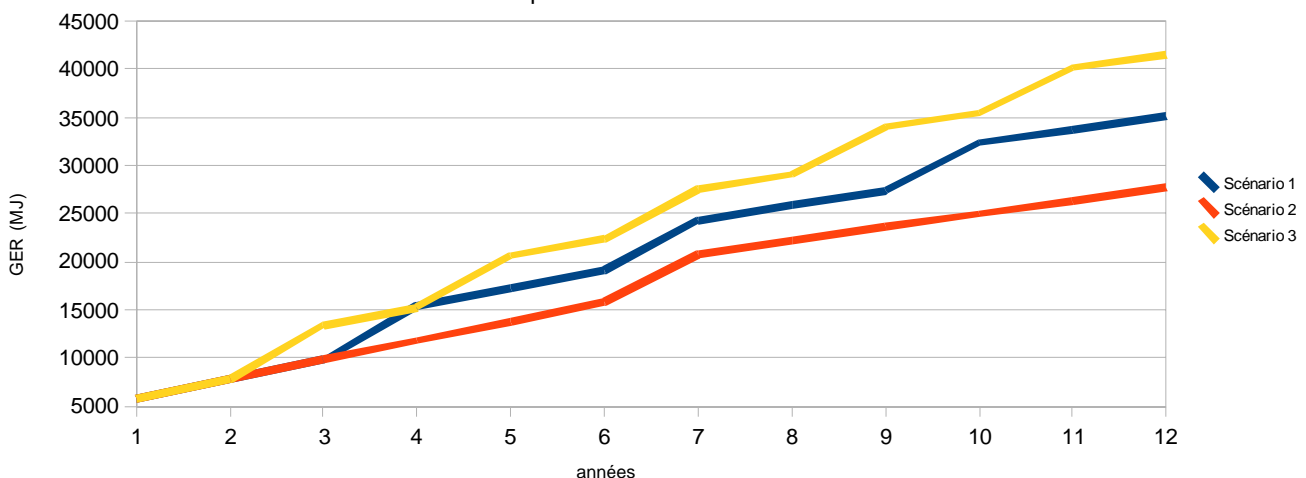
La sollicitation du micro-processeur est supposée inchangée pendant toute la durée de la simulation. Ainsi, la puissance de l'ordinateur n'évolue pas d'année en année, et donc la consommation diminue du fait de l'amélioration de l'efficacité énergétique des boîtiers d'alimentation. Cette hypothèse correspond à une utilisation exclusivement dédiée aux mêmes type de tâches pendant douze ans (traitement de texte par exemple).

Le graphique 5 présente les résultats de cette simulation pour un Desktop muni d'un LCD. Les tendances sont identiques pour les deux autres produits types.

Graphique 5

Consommation électrique d'un Desktop + LCD sur 12 ans

Différents comportements de consommation



Il faut retenir le fait que les résultats de cette simulation sont minorés. La prise en compte de l'évolution réelle de la consommation énergétique ne ferait que augmenter l'écart entre les différents scénarii.

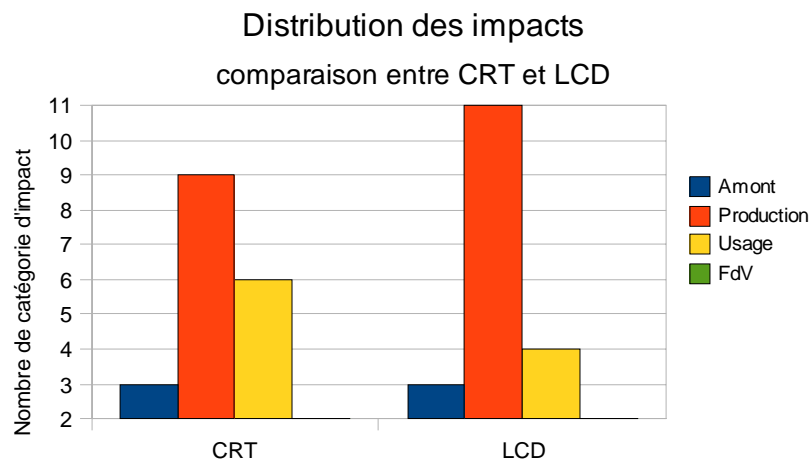
Le scénario 2, correspondant à un achat d'ordinateur tous les 6 ans est celui qui aboutit à la consommation électrique la plus basse avec 27 500 MJ. Le scénario 1, avec un renouvellement tous les 3 ans, cumule à 35 000MJ, puis finalement le scénario 3 avec plus de 40 000 MJ d'énergie consommée tout au long du cycle de vie. Il apparaît très clairement que plus on renouvelle le matériel informatique, plus on consomme d'énergie. **L'augmentation de l'efficacité énergétique ne suffit pas, au meilleur des cas, à compenser la consommation d'énergie causée par la production.**

III.6 Un autre type d'écoprofile

Un exemple d'ACV effectuée par l'agence américaine de la protection de l'environnement (EPA)⁶ compare les cycles de vie des écrans LCD et CRT. Les écoprofiles qui en sont déduits sont différents de celui de EuP.

L'EPA a déterminé 20 catégories d'impacts différents, similaires à celles des autres ACV, et quatre étapes de cycle de vie : L'amont, la production, l'usage et la fin de vie. Si une étape du cycle de vie contribue de manière significative à un impact comparé aux autres, un point lui est affecté. Puis, l'ensemble des points pour chaque étape est reporté sur un diagramme ce qui donne le résultat représenté dans le graphique n°5

graphique 6



Ces résultats ne sont pas quantitatifs, mais permettent de constater le fait que choisir un seul indicateur pour évaluer l'impact environnemental n'est pas forcément pertinent ou du moins ne rend pas compte totalement de l'impact réel. Pour avoir le point de vue le plus objectif possible, il faudrait effectuer autant d'analyses que de catégories d'impact. Les décisions à prendre à l'issue de chaque analyse de cycle de vie dépendent principalement des priorités des décideurs. Si par exemple la question énergétique est considérée comme plus pressante que l'eutrophisation ou la toxicité des milieux marins, alors l'étude donnera ses résultats en fonction des priorités choisies et négligera l'eutrophisation qui est beaucoup plus importante dans la phase de production comme il en a été le cas lors de l'étude EuP.

Conclusion

L'ordinateur est l'outil de travail indispensable au bon fonctionnement de l'économie et de la société moderne. Son avènement a entraîné le développement d'une filière industrielle importante et très rentable depuis plus de trente ans.

Cependant, malgré le succès commercial du matériel informatique, il est légitime de se poser la question de son empreinte écologique à l'heure où le nombre d'unités en utilisation atteint les deux milliards, et où la question de la gestion de la fin de vie devient problématique.

L'analyse du cycle de vie est un outil qui permet d'avoir une vision globale de l'impact environnemental sur tout le cycle de vie des ordinateurs. L'ACV permet de mettre en exergue les points faibles d'un produit, et amène à la prise de décisions pour pallier à ces faiblesses, comme il en a été le cas pour l'élaboration de la directive de la commission européenne EuP.

La grandeur la plus pertinente retenue par l'ACV de EuP pour évaluer l'empreinte écologique des ordinateurs est la consommation d'énergie. En effet, les émissions de gaz à effet de serre et de gaz acidifiants sont liées à la consommation d'énergie. Ceci s'explique par le fait qu'une grande partie de l'énergie est obtenue par la conversion de combustible fossiles.

Le profil environnemental déduit de l'étude ACV montre que la phase d'utilisation est la phase la plus énergivore avec plus de 80% de la consommation d'énergie, si la durée de vie du matériel est supérieure à 6 ans. La phase de production représente un peu moins de 20%. Les autres phases du cycle de vie, la distribution et la fin de vie, n'ont pas été analysées aussi profondément et ont été sous estimées.

Ces résultats représentent une moyenne européenne et peuvent être très différents en fonction du pays dans lequel l'ordinateur est utilisé. En France, l'électricité génère 4,7 fois moins de GES que la moyenne communautaire, donc l'impact sur le réchauffement climatique de la phase d'utilisation est moins important comparé à la phase de production.

Du point de vue de l'utilisateur soucieux de l'environnement, la question de l'impact du renouvellement du matériel est pertinente. L'impact sur lequel se basera le choix de l'utilisateur déterminera son comportement de consommation. Si la consommation d'énergie est le critère de choix, la conclusion est de faire durer le plus longtemps possible le matériel. Les améliorations de l'efficacité énergétique ne justifient pas l'achat de nouveau matériel.

Ces résultats ne sont pas représentatifs de tous les impacts environnementaux pris en compte par l'ACV telle qu'elle est conçue par la norme ISO-14 040. Les effets de certaines substances toxiques pour l'environnement et pour la santé humaine ne sont pas pris en compte avec la même importance. Ceci se justifie, dans le cadre de l'étude EuP, par un choix politique, et une urgence économique: l'économie d'énergie. L'analyse aurait été toute différente si tout les impacts avaient été évalués avec la même gravité comme le montre l'écoprofile de l'EPA.

L'ACV est un outil de mesure efficace pour la prise de décisions, mais comme tout outil de mesure, les conclusions dépendent de ce que son utilisateur désire mesurer.

L'analyse dure longtemps, de 16 à 24 mois, et coûte cher, de quelques dizaines de milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers. Elle nécessite un consensus entre toutes les parties prenantes en ce qui concerne les hypothèses de calcul. De ce fait, il paraît peu probable à l'heure actuelle que la pratique de l'ACV se généralise au point de devenir systématique.

Références bibliographiques

- 1 N.Boeglin, D. Veuillet. *Introduction à l'analyse de Cycle de Vie (ACV)* [en ligne] ADEME, mai 2005: <<http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=CC14518E88C0E1A15DA50E5C0602DF171115650388946.pdf>>
- 2 Gartner Inc. *Gartner Says Worldwide IT Spending On Pace to Surpass \$3.4 Trillion in 2008* [en ligne] Gartner press release 2008 : <<http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=742913>>
- 3 OCDE, *OECD Key ICT Indicators* [en ligne] Directorate for Science, Technology and Industry, sept 2008: <<http://www.oecd.org/sti/ICTIndicators>>
- 4 Etforecast, *worldwide pc market* [en ligne] etForecast 2005: <http://www.etforecasts.com/products/ES_pcww1203.htm>
- 5 *LCA Study EU Ecolabels for Personal Computers* (version 1,2) [en ligne] Atlantic Consulting and IPU, mars 1998 : <http://www.ec.europa.eu/environment/ecolabel/pdf/personal_computers/lcastudy_pc_1998.pdf>
- 6 Maria Leet Socolof, Jonathan G. Overly et al. *Desktop Computer Displays: A Life-Cycle Assessment (EPA/744-R-01-004a and b)*, [en ligne] University of Tennessee and EPA: <www.epa.gov/dfe>.
- 7 National Office of Pollution Prevention. *Environment Canada, a life cycle assessment case study of a business telephone* (EPS M-422) [en ligne] [National Office of Pollution Prevention, Environment Canada](http://www.ec.gc.ca/nopp/chemical/telephone/index_e.html), mars 2000: <http://www.ec.gc.ca/nopp/chemical/telephone/index_e.html>
- 8 R. Kemna M. van Elburg et al. *Methodology Study Eco-design of Energy-using Products* (final) [en ligne] VHK for European Commission, 28/11/2005 : <ec.europa.eu/enterprise/eco_design/finalreport1.pdf>
- 9 Anna Braune, Niels Warburg, *Technical report samples and case studies Demonstration of applicability of the EPIC-ICT method*, (rapport n°6) [en ligne], IKP, 16/06/2006 : disponible sur <<http://www.epic-ict.org/>>
- 10 J.Kim, G.Arthur et al. *profile of the electronics and computer industry*, (EPA/310-R-95-002), [en ligne], EPA Office of Compliance Sector Notebook Project, 1995: disponible sur <<http://www.epa.gov/compliance/resources/publications/assistance/sectors/notebooks/electronics.html>>
- 11 British Petroleum, *BP Statistical Review of World Energy*, [en ligne]. 2008: disponible sur <<http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>>
- 12 R. Kemna M. van Elburg et al. *Methodology Repport* (pages 49 à 62) [en ligne], VHK for European commission, 28/11/2005 : <ec.europa.eu/enterprise/eco_design/finalreport1.pdf>
- 13 International Energy Agency, *iea statistics*, [en ligne], disponible sur : <<http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>>
- 14 Annabelle BERGER, Noëlle DELÉCRIN et al. *Rapport à la commission des comptes et de l'économie de l'environnement: énergie et environnement 2003*, annexe 10 [en ligne], disponible sur <http://www.ifen.fr/fileadmin/publications/les_syntheses/2003/>
- 15 ADEME, *Bilan environnemental sur les filières de recyclage : l'état des connaissances ACV* [en ligne], mai 2002, disponible sur <[www.ademe.fr/entreprises/Management-env/Approche-produit/Bilan_ACV_recyclage/Filières/.../synthese %20biblio%20huiles.pdf](http://www.ademe.fr/entreprises/Management-env/Approche-produit/Bilan_ACV_recyclage/Filières/.../synthese_%20biblio%20huiles.pdf)>

Sommaire des annexes

Annexe I

Inventaire de cycle de vie détaillé

Annexe II

Base de données industrielle pour le calcul d'impacts

Annexe III

Page web rédigée pour EcoInfo

Annexe IV

Compte rendu de réunion avec le responsable environnement de Dell
France

Annexe V

Compte rendu de réunion avec le responsable Environnement de HP
France

Annexe VI

Résultats de la simulation des comportements de consommation