



HAL
open science

Méthodologie de représentation des impacts environnementaux locaux et planétaires, directs et indirects - Application aux technologies de l'information.

Valentine Moreau

► To cite this version:

Valentine Moreau. Méthodologie de représentation des impacts environnementaux locaux et planétaires, directs et indirects - Application aux technologies de l'information.. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2012. Français. NNT : 2012EMSE0659 . tel-00843151

HAL Id: tel-00843151

<https://theses.hal.science/tel-00843151>

Submitted on 10 Jul 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée par

Valentine MOREAU

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

METHODOLOGIE DE REPRESENTATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LOCAUX ET PLANETAIRES, DIRECTS ET INDIRECTS – APPLICATION AUX TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

soutenue à Saint-Etienne, le 21 septembre 2012

Membres du jury

Rapporteurs :	Bernard TOURANCHEAU	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble
	Agnès JULLIEN	Directeur de recherche, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, Nantes
Examineurs :	Daniel BRISSAUD	Professeur, laboratoire CNRS G-SCOP de l'Institut National Polytechnique de Grenoble
	Patrick BURLAT	Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne
	Stéphane LE POCHAT	Docteur, Société Evéa Evaluation et Accompagnement, Nantes
Directeur de thèse :	Valérie LAFOREST	HDR, Maître de recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne
Co-encadrant	Natacha GONDRAN	Maître Assistante, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne
Membre invité :	Frédéric FERRAND	Responsable de service, Direction Exploitation des Sièges, Groupe Casino, Saint-Etienne

Spécialités doctorales :
 SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :
 K. Wolski Directeur de recherche
 S. Drapier, professeur
 F. Gruy, Maître de recherche
 B. Guy, Directeur de recherche
 D. Graillot, Directeur de recherche
 O. Roustant, Maître-assistant
 O. Boissier, Professeur
 JC. Pinoli, Professeur
 A. Dolgui, Professeur
 Ph. Collot, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
BENABEN	Patrick	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 1	Informatique	Fayol
BORBELY	Andras	MR	Sciences et Génie des Matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	Fayol
BRODHAG	Christian	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	Fayol
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image, Vision, Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	Fayol
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FEILLET	Dominique	PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR	Sciences de la terre	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	Fayol
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HAN	Woo-Suck	CR		SMS
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	PR 2	Microélectronique	CMP
KLÖCKER	Helmut	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
LERICHE	Rodolphe	CR CNRS	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
MALLIARAS	George Grégory	PR 1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 0	Image, Vision, Signal	CIS
ROUSTANT	Olivier	MA		Fayol
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
TRIA	Assia		Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
KERMOUCHE	Guillaume	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
GUSSAROV Andrey	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE

Glossaire :

PR 0	Professeur classe exceptionnelle	Ing.	Ingénieur
PR 1	Professeur 1 ^{ère} classe	MCF	Maître de conférences
PR 2	Professeur 2 ^{ème} classe	MR(DR2)	Maître de recherche
PU	Professeur des Universités	CR	Chargé de recherche
MA(MDC)	Maître assistant	EC	Enseignant-chercheur
DR	Directeur de recherche	IGM	Ingénieur général des mines

Centres :

SMS	Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN	Sciences des Processus Industriels et Naturels
FAYOL	Institut Henri Fayol
CMP	Centre de Microélectronique de Provence
CIS	Centre Ingénierie et Santé

THÈSE

présentée par

Valentine MOREAU

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

METHODOLOGIE DE REPRESENTATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LOCAUX ET PLANETAIRES, DIRECTS ET INDIRECTS – APPLICATION AUX TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

soutenue à Saint-Etienne, le 21 septembre 2012

Membres du jury

Rapporteurs :	Bernard TOURANCHEAU	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble
	Agnès JULLIEN	Directeur de recherche, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, Nantes
Examineurs :	Daniel BRISSAUD	Professeur, laboratoire CNRS G-SCOP de l'Institut National Polytechnique de Grenoble
	Patrick BURLAT	Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne
	Stéphane LE POCHAT	Docteur, Société Evéa Evaluation et Accompagnement, Nantes
Directeur de thèse :	Valérie LAFOREST	HDR, Maître de recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne
Co-encadrant	Natacha GONDRAN	Maître Assistante, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne
Membre invité :	Frédéric FERRAND	Responsable de service, Direction Exploitation des Sièges, Groupe Casino, Saint-Etienne

Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

K. Wolski Directeur de recherche
 S. Drapier, professeur
 F. Gruy, Maître de recherche
 B. Guy, Directeur de recherche
 D. Graillot, Directeur de recherche
 O. Roustant, Maître-assistant
 O. Boissier, Professeur
 JC. Pinoli, Professeur
 A. Dolgui, Professeur
 Ph. Collot, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
BENABEN	Patrick	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 1	Informatique	Fayol
BORBELY	Andras	MR	Sciences et Génie des Matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	Fayol
BRODHAG	Christian	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	Fayol
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image, Vision, Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	Fayol
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FEILLET	Dominique	PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR	Sciences de la terre	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	Fayol
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HAN	Woo-Suck	CR		SMS
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	PR 2	Microélectronique	CMP
KLÖCKER	Helmut	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
LERICHE	Rodolphe	CR CNRS	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
MALLIARAS	George Grégory	PR 1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 0	Image, Vision, Signal	CIS
ROUSTANT	Olivier	MA		Fayol
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	Fayol
TRIA	Assia		Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
KERMOUCHE	Guillaume	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
GUSSAROV Andrey	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE

Glossaire :

PR 0	Professeur classe exceptionnelle	Ing.	Ingénieur
PR 1	Professeur 1 ^{ère} classe	MCF	Maître de conférences
PR 2	Professeur 2 ^{ème} classe	MR(DR2)	Maître de recherche
PU	Professeur des Universités	CR	Chargé de recherche
MA(MDC)	Maître assistant	EC	Enseignant-chercheur
DR	Directeur de recherche	IGM	Ingénieur général des mines

Centres :

SMS	Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN	Sciences des Processus Industriels et Naturels
FAYOL	Institut Henri Fayol
CMP	Centre de Microélectronique de Provence
CIS	Centre Ingénierie et Santé

« Vous savez ce que c'est que la recherche : on part sur une question et on trouve en cours de route des faits qui vous en posent une autre »

Philippe Meyer
Les progrès du progrès

« Être ce que nous sommes et devenir ce que nous sommes capables de devenir, tel est le seul but de la vie. »

Robert Louis Stevenson
Extrait du livre Etudes Familiales sur les hommes et les livres

REMERCIEMENTS

Ces remerciements qui commencent mon manuscrit sont synonymes de touche finale de ce travail et c'est au moment de les écrire que je prends conscience du nombre de personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse. Collègues, amis et famille, j'espère n'oublier personne dans les quelques lignes qui vont suivre.

Dans un premier temps, j'adresse mes remerciements à Didier GRAILLOT pour m'avoir accueillie au sein du centre de recherche SITE (Sciences, Information et Technologie pour l'Environnement) dont il était le directeur avant la fusion de ce dernier pour créer l'institut Henri Fayol de l'Ecole Nationale des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE).

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail de recherche. Ainsi, j'adresse ma sincère reconnaissance à Madame Agnès JULLIEN et Monsieur Bernard TOURANCHEAU d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Leur regard sur ce manuscrit a suscité en moi le désir de débattre plus amplement avec eux lors de ma soutenance.

Je remercie également les examinateurs de ce travail à savoir Monsieur Patrick BURLAT et Monsieur Stéphane LE POCHAT dont les questions et réflexions ont contribué aux débats le jour de la soutenance.

J'adresse ma profonde gratitude à Monsieur Daniel BRISSAUD pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse mais aussi pour son expertise sur le sujet.

Enfin, je présente mes plus sincères remerciements à Monsieur Frédéric FERRAND qui m'a fait l'honneur de sa présence au sein du jury en qualité de représentant du Groupe Casino. Je lui adresse ma profonde gratitude pour son soutien et son aide dans la bonne réalisation du projet Green IT qui a lié CIT et l'ENSM-SE. Mes questionnements et demandes d'informations incessantes ont toujours trouvé un retour de sa part : Merci !

Plus particulièrement, j'adresse toute ma reconnaissance à mes directrices de thèse, Valérie LAFOREST et Natacha GONDRAN. Je les remercie tout d'abord de m'avoir fait confiance et de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse. Mais aussi et surtout pour avoir toujours cru en mes possibilités et en ma capacité de finaliser ce travail. Le chemin fut long et parfois difficile, mais leurs encouragements et leurs conseils, associés à de longues conversations ont éclairé ces années de thèse. Merci également pour votre patience, votre bonne humeur, votre écoute, ...

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de l'ancien centre SITE, aujourd'hui fusionné au sein de l'Institut Henri Fayol pour les moments partagés tout au long de ces années de thèse. Merci pour les échanges animés et la bonne humeur du coin café (Alicja, Christiane, Eric, Florence, Frédéric, Hervé, ...), pour l'aide technique/logistique, l'humour en toute circonstance et les discussions chaleureuses (Alain et Gabrielle).

J'ai évidemment une pensée particulière pour mes collègues doctorants de la première heure Jonathan et Jordan, devenus depuis des « amis docteurs » ! Mais aussi à tout ceux que j'ai appris à connaître dans les années suivantes : Carine, Eric, Gaël, Georges, Sandrine, Sarra, Sophie, ... sans oublier les doctorants « hors murs » : Azedine et Samuel. Merci à eux pour les fou-rires, la bonne humeur, les discussions et de manière plus générale ces instants précieux passés ensemble au bureau ou au milieu du Pilat !

Je terminerai le tour du centre avec une tendre pensée pour Zahia. Merci pour ton aide précieuse et tes conseils judicieux.

Pour leurs conseils avisés dans le domaine de l'informatique, j'adresse mes sincères remerciements aux membres du groupe de travail (GDS) du CNRS Ecoinfo (Amélie, Cédric, Eric, Francis, Françoise, Jean-Daniel, ...) ainsi qu'aux membres de l'association IT²D (Christophe, Gilles, Laurence-Marie, Laurent, Pascal, ...).

Enfin, ce document n'aurait pu voir le jour sans le soutien de mes proches. Ces remerciements sont donc adressés à l'ensemble des personnes qui m'ont soutenu, aidé et remonté le moral pendant les moments difficiles que j'ai pu traverser lors de cette dernière année. J'exprime ainsi toute ma gratitude à mes parents, des personnes extraordinaires qui m'ont toujours écoutées, encouragées et soutenues dans ce que j'entreprenais. Un immense merci également à ma petite sœur (mon double, ma moitié, mon « petit moi »...) et à mon petit frère (mon « grand petit frère » ou « petit grand frère » selon les jours)... nos fous-rires et notre complicité sont précieux dans mon équilibre quotidien.

Mon dernier mot sera pour Gaëtan. Toi qui a toujours cru et qui crois toujours plus en moi que moi-même. Toi qui a su être à la fois : la voix pour m'encourager, l'oreille pour m'écouter, l'épaule pour me soutenir, les bras pour me rassurer, ... qu'aurais-je fait sans toi durant ces derniers mois. Les mots sont tellement peu de choses quand je pense à tout ce que tu as fait pour moi que je ne peux que simplement te remercier pour ta présence inestimable dans ma vie.

Merci à tous...

RESUME

Les services basés sur les technologies de l'information dans les secteurs publics et privés sont en pleine croissance. Par conséquent, la demande énergétique est de plus en plus importante pour alimenter les équipements informatiques au sein des établissements utilisateurs et dans les data-centres. A cette phase de consommation, facilement identifiable par les utilisateurs, s'ajoute la phase de production des équipements dont les conséquences sur l'environnement sont difficilement perceptibles par les utilisateurs. Ainsi, les impacts environnementaux des TIC paraissent principalement « délocalisés » et « invisibles » par rapport à l'utilisateur final.

Progressivement, l'enjeu environnemental prend sa place dans la logique du secteur des technologies de l'information, aboutissant au concept de « Green IT ». Concepteurs et utilisateurs cherchent désormais à évaluer les impacts environnementaux des technologies de l'information. Dans un contexte d'évaluation environnementale pour l'aide à la décision, l'objectif de cette thèse est d'évaluer les impacts environnementaux des équipements informatiques d'une organisation. Pour cela, nous envisageons une démarche qui vise à enrichir l'approche produit de type ACV par l'ajout de données spécifiques à l'organisation étudiée.

Les recherches bibliographiques ont permis de dégager les spécificités et les besoins méthodologiques en termes d'évaluation des impacts. Ainsi, une méthodologie permettant l'expression des impacts environnementaux locaux et planétaires liés à la fabrication et à l'utilisation des technologies de l'information au sein d'une organisation est proposée. Appliquée lors d'un partenariat avec une entreprise multinationale de la grande distribution et validée par son application dans un centre de recherche, cette méthodologie centralise à la fois des données génériques disponibles dans des bases de données et des données spécifiques recueillies auprès des utilisateurs de l'organisation étudiée. Cette étape de terrain, point central de la méthodologie, permet dans un premier temps d'obtenir l'inventaire des équipements présents et dans un second temps de connaître et de comprendre le comportement réel des utilisateurs via une enquête et des mesures de puissances et de consommations électriques des équipements représentatifs du panel inventorié (utilisation de boîtiers d'acquisition de valeurs dits « économètres »).

L'approche d'évaluation environnementale des systèmes informatiques développée au cours de ce travail a pour objectif de mettre en exergue les répercussions sur l'environnement que peuvent avoir les technologies de l'information au sein d'une organisation. Un des résultats principaux montre que la majorité des impacts environnementaux sont plus liés à la phase de production qu'à la phase d'utilisation. De plus, cette méthode aide à l'identification des pistes d'améliorations : choix et gestion des équipements, comportement individuel, charte d'utilisation, choix d'une politique éco-responsable... Ainsi, par un calcul d'éco-efficience mettant en jeu les gains environnementaux et économiques, les solutions répondant à la stratégie de développement de l'organisation étudiée peuvent être sélectionnées.

Mots clés : Evaluation environnementale, Impacts environnementaux, Technologies de l'information, Tableau de Bord Environnemental

ABSTRACT

Services based on information technology in public and private sectors are growing. Therefore, the energy demand is more and more important to supply computer equipments within organizations and data-centers. So, environmental impacts of ICT are mostly "delocalised" and "invisible" from the end user.

Gradually, the environmental issue takes place in the sector of information technology resulting in the new concept of the "Green IT". Nowadays, designers and users are seeking to assess the environmental impacts of information technology. In a context of environmental assessment for decision-making, the objective of this thesis is to assess the environmental impacts of devices of an organization. For this, we consider an approach to combine a product LCA approach with an inventory of data specific to a site.

Literature searches have highlighted the specific and methodological needs in terms of impact assessment. Thus, a methodology for the expression of local and global environmental impacts associated with the production and use stages of information technology present within an organization is proposed. Applied in a partnership with a multinational society and validated by its application in a research laboratory, this methodology centralizes both generic data available in databases and specific data collected from users of the organization studied. This phase, key point of the methodology, provides firstly an inventory of present equipments and secondly the knowledge and comprehension of the actual behavior of users by the way of both a survey plus power and electric consumption measurements of representative equipments of the panel inventoried (use of acquisition boxes of values known as "energy meter").

The environmental assessment approach developed in this work aims to highlight the environmental impact of the information technology's equipments within an organization. One of the main results shows that the most environmental impacts are due to the production phase than the use phase. Moreover, the method helps to identify areas for improvement: selection and equipment management, individual behavior, usage policy, choice of an eco-friendly policy... So, by a calculation of eco-efficiency involving environmental and economic gains, solutions responding to the development strategy of the organization studied can be selected.

Keywords: Environmental Assessment, Environmental Impacts, Information Technologies, Environmental Dashboard

Sommaire

Introduction générale _____ **1**

Chapitre 1 L'impact sur l'environnement des technologies de l'information et les outils d'évaluation 7

Partie 1 Les Technologies de l'Information et de la Communication face à l'environnement 8

1.1	D'un enjeu mondial...	8
1.1.1	Quelques définitions	8
1.1.2	Cadre réglementaire	14
1.1.3	Des enjeux environnementaux différents selon les étapes du cycle de vie des EEE	19
1.2	...à la naissance du « Green IT »	27
1.2.1	Origine, définitions et objectifs	27
1.2.2	Différents Green IT possibles	28
1.3	Synthèse sur les enjeux environnementaux des technologies de l'information	30

Partie 2 Les enjeux de l'évaluation 31

2.1	Pourquoi faire une évaluation environnementale ?	31
2.1.1	Le modèle Pressions – Etat – Réponses (PER)	31
2.1.2	Evaluation environnementale pour l'aide à la décision	32
2.2	Sur quoi repose l'évaluation environnementale	33
2.2.1	Aspects environnementaux (directs et indirects)	34
2.2.2	Impacts environnementaux (locaux & planétaires)	35
2.2.3	Définitions et objectifs des indicateurs	38
2.2.4	Elaboration et utilisation des indicateurs	41
2.3	Outils méthodologiques d'évaluation environnementale existants	43
2.3.1	Objectifs principaux de différents outils d'évaluation environnementale	44
2.3.2	Les indicateurs d'impact environnemental	51
2.3.3	L'évaluation des impacts environnementaux : Impacts intermédiaires (midpoint) et catégories de dommages (endpoint)	65
2.3.4	L'éco-efficience	67
2.3.5	Champs d'application des méthodes d'évaluation environnementale	68
2.3.6	Avantages des outils d'évaluation	70
2.3.7	Limites des outils d'évaluation environnementale	72
2.3.8	Incitations à la mise en œuvre des outils d'évaluation environnementale	74

Partie 3 Pertinence de l'évaluation des systèmes informatiques 76

3.1	Changement climatique, consommation énergétique et raréfaction des ressources	76
3.1.1	La problématique du changement climatique	76
3.1.2	Une raréfaction des ressources énergétiques	77
3.1.3	Les ressources en matières premières ne sont pas inépuisables !	78
3.2	De la responsabilité élargie du producteur à la responsabilité sociétale des entreprises	79
3.3	Une demande de reconnaissance de plus en plus forte	83
3.3.1	Eco-conception	83
3.3.2	Les labels	85
3.4	Nécessité de mise au point d'une méthodologie d'évaluation environnementale spécifique à l'informatique	86

Partie 4 Conclusion de chapitre 88

4.1	Conclusions sur les enjeux relatifs aux différentes étapes du cycle de vie :	88
-----	--	----

4.2	Synthèse sur les enjeux de l'évaluation environnementale	89
4.3	Bilan du chapitre	90
Chapitre 2 Elaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux des services proposés par les technologies de l'information		93
Partie 1	Objectifs de la méthodologie	94
Partie 2	Démarche de développement de la méthodologie	95
2.1	Etape 1 : Identification du système et des enjeux	95
2.1.1	Le système étudié	95
2.1.2	Les enjeux	95
2.2	Etape 2 : Collecte des données	97
2.2.1	L'échantillonnage	97
2.2.2	Collecte des données	100
2.2.3	Equipements (Modèles, nombres, ...)	104
2.2.4	Rythme d'utilisation	104
2.2.5	Puissances et Consommations (selon les différents modes : arrêt, veille, activité)	105
2.2.6	Durée de vie	106
2.3	Etape 3 : Traitement des données	106
2.3.1	Elaboration d'indicateurs opérationnels	106
2.3.2	Principe du traitement des données	108
2.4	Etape 4 : Tableau de Bord Environnemental (TBE)	108
2.4.1	Objectifs d'un TBE	108
2.4.2	Principes du TBE	109
2.4.3	Indicateurs utilisés	110
2.4.4	Développement informatique du Tableau de Bord Environnemental	115
2.5	Etape 5 : Evaluation des gains : Eco-efficience	117
2.5.1	Objectifs	117
2.5.2	Possibilité d'amélioration	118
2.5.3	Méthodes de calculs et hypothèses	118
2.5.4	Echelle d'éco-efficience	121
2.5.5	Principes de l'évaluation des gains	123
Partie 3	Synthèse et conclusion	124
Chapitre 3 Etudes de cas et évolution de la méthodologie		127
Partie 1	Application 1 : Casino IT	128
1.1	Etape 1 : Identification du système et des enjeux	128
1.1.1	Le système	128
1.1.2	Les enjeux	130
1.2	Etape 2 : Collecte des données	131
1.2.1	La phase d'échantillonnage	131
1.2.2	La phase d'inventaires	132
1.2.3	La phase d'enquêtes	134
1.2.4	Mesures	135
1.3	Tableau de bord environnemental	139
1.3.1	Indicateurs de suivi	139
1.3.2	Impacts environnementaux	148
1.4	Etape 5 : Evaluation des gains	153
1.4.1	Améliorations possibles	154

1.4.2	Chiffrage des améliorations : Méthodes de calculs et hypothèses	155
1.4.3	Comparaison des possibilités d'amélioration : Eco-efficience	160
Partie 2	Retour d'expérience et évolution de la méthodologie	168
2.1	Collecte des données	168
2.1.1	Des enquêtes approfondies	168
2.1.2	Quantité de mesures réalisées	169
2.2	Indicateurs environnementaux supplémentaires	169
2.3	Conclusions sur les apports	171
Partie 3	Application 2 : Centre SITE de l'École des Mines	172
3.1	Etape 1 : Identification du système et des enjeux	172
3.1.1	Le système	172
3.1.2	Les enjeux	173
3.2	Etape 2 : Collecte des données	174
3.2.1	L'échantillonnage	174
3.2.2	Inventaires	174
3.2.3	Enquêtes	175
3.2.4	Mesures	177
3.3	Etape 3 : Tableau de bord environnemental	178
3.3.1	Indicateurs de suivi	178
3.3.2	Indicateurs d'impacts environnementaux	187
3.4	Etape 5 : Evaluation des gains	196
3.4.1	Améliorations possibles	196
3.4.2	Chiffrage des améliorations : Méthodes de calculs et hypothèses	197
3.4.3	Comparaison des possibilités d'amélioration : Eco-efficience	201
Chapitre 4	Conclusions et Perspectives du travail de recherche	211
Partie 1	Conclusions sur l'apport de la méthodologie proposée	212
1.1	Notion d'impacts « délocalisés » et « invisibles »	212
1.2	Enrichissement de l'approche organisation par l'approche produit : croisement des données réelles avec les données génériques	213
Partie 2	Perspectives techniques	218
2.1	Sensibilité et incertitudes	218
2.1.1	Précision et incertitudes des appareils de mesures	218
2.1.2	Sensibilité des hypothèses effectuées	220
2.2	Des facteurs à prendre en compte	223
2.2.1	Tenir compte des utilisateurs : perception de jugement	223
2.2.2	Contraintes métiers	224
2.3	Développement technique de l'outil	226
2.3.1	Faire évoluer l'outil en réel outil de suivi	226
2.3.2	Avoir un retour sur les applications (Gains calculés / Gains réels)	229
2.3.3	Développer la partie évaluation sur la phase de fin de vie : complétude du cycle de vie	229
Partie 3	Perspectives scientifiques	231
3.1	La sensibilité du milieu : paramètre incontournable de l'approche site	231
3.2	Les difficultés inhérentes à la détermination des facteurs de caractérisation	233
3.2.1	Les facteurs de caractérisation	233
3.2.2	Des incertitudes et des hypothèses	239
3.2.3	Autres éléments importants concernant les facteurs de caractérisation	250

3.3	Périmètre d'évaluation et notion de « système produit-service »	254
3.3.1	Un périmètre d'évaluation à l'interface de l'approche site et produit	254
3.3.2	La notion de « système produit service »	255
3.4	Evaluation environnementale des organisations : d'un objectif de thèse initial à une volonté de terrain actuelle	258
3.4.1	Utilisation d'une approche de type ACV à une organisation spécifique	259
3.4.2	LCA corporate : Contexte de développement actuel et perspectives	268
Partie 4	Conclusion de chapitre	270
	Conclusion générale	273
	Bibliographie	277
	Annexes	299

Liste des Figures

Figure 1 : Démarche de recherche de la thèse	5
Figure 2: Pourcentages des abonnés haut débit dans les pays de l'OCDE en décembre 2003 (graphique a) et en décembre 2010 (graphique b) [OCDE, 2011]	10
Figure 3: Part des foyers équipés d'ordinateurs [Médiamétrie et GfK, 2011]	11
Figure 4 : Illustration du marché des TIC entre 1997 et 2007 [OCDE, 2009]	12
Figure 5: Economies exportatrices de biens des TIC, 1997-2007 [OCDE, 2011]	13
Figure 6: Illustration de l'enjeu planétaire de l'extraction des matières premières, l'assemblage et la distribution d'un ordinateur (d'après [Ruediger et Williams, 2003])	21
Figure 7: Evolution des tonnages d'équipements entre 2006 et 2009 [ADEME, 2009b]	24
Figure 8: Répartition des tonnages d'équipements mis sur le marché par catégorie et par an [ADEME, 2009b]	24
Figure 9: Modèle Pressions – Etat – Réponses (PER) [OCDE, 1993]	31
Figure 10: Modèle DPSIR [Berge et al., 1997]	32
Figure 11: Schéma explicatif des liens existants entre les impacts et les aspects environnementaux [Moreau et al., 2009]	37
Figure 12: Les différentes catégories d'indicateurs environnementaux [ISO 14031, 2000]	40
Figure 13: Etapes du développement d'indicateurs environnementaux (inspiré de [Olsthoorn et al., 2001])	42
Figure 14: Les différentes phases et applications directes de l'ACV [ISO 14040, 2006]	48
Figure 15 : Structure générale du cadre d'évaluation d'impact du cycle de vie [Jolliet et al., 2010]	66
Figure 16: Concentration de la production des matières premières minérales critiques [Nodé-Langlois, 2011]	79
Figure 17: Les 7 questions centrales en approche globale telles que schématisées dans la norme ISO 26000 et leurs domaines d'action [Reflex'eco, 2011]	82
Figure 18: Les phases du cycle de vie d'un produit	84
Figure 19 : Positionnement de 9 outils d'évaluation environnementale selon les approches et impacts considérés dans chacun d'entre eux.	90
Figure 20: Synthèse des 3 hypothèses de recherche issues du chapitre 1	92
Figure 21: Schéma de présentation des 5 étapes de la méthodologie	93
Figure 22: Représentation du système étudié	95
Figure 23: Schéma de principe de l'échantillonnage	99
Figure 24: Photo d'un économètre	102
Figure 25: Détail de l'étape de collecte des données	103
Figure 26: Illustration des onglets constituant le fichier Excel du TBE	116
Figure 27: Illustration de l'Eco-efficience (inspiré de [Cha et al., 2008] et [ENSM-SE, 2010])	122
Figure 28: Schéma de la méthodologie élaborée [d'après [Moreau et al., 2011a], modifié]	126
Figure 29: Représentation du système étudié lors de l'application 1	129
Figure 30: Adaptateur pour prise P17 [Adaptateur P17/2P+T 16 A, Marque L'Ebenoïd, www.ebenoid.fr]	132
Figure 31 : Répartition (en %) des catégories d'équipements en fonction des établissements et synthèse pour l'informatique distribuée (ID)	133
Figure 32: Répartition des équipements (en % par rapport au total) en informatique centralisée et distribuée	134
Figure 33: Mesures de puissances instantanées pendant une semaine sur un ordinateur fixe	138
Figure 34: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour les établissements témoins	140
Figure 35 : Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour l'ensemble des établissements de chaque catégorie (hypermarchés, supermarchés et proximités)	140
Figure 36: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour les entrepôts	141
Figure 37: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour le siège	142
Figure 38: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour l'informatique centralisée et consommation électrique connexe	143

Figure 39: Répartition (en %) des consommations électriques de l'informatique distribuée et centralisée. ____	144
Figure 40: Répartition des temps passés sous les différents statuts pour les équipements présents en informatique distribuée _____	145
Figure 41 : Répartition massique de la quantité de déchets produits par catégorie d'établissements et par catégorie d'équipements _____	147
Figure 42 : Répartition massique de la quantité de déchets produits par catégorie d'équipements pour l'informatique centralisée _____	148
Figure 43: Emissions annuelles de gaz à effet de serre en t CO ₂ éq. par catégorie d'équipements et par établissements (hypermarchés, supermarchés et magasins de proximité) _____	151
Figure 44 : Expressions annuelles des émissions de gaz à effet de serre par catégorie d'équipements pour les entrepôts et le siège _____	152
Figure 45: Expression des émissions annuelles en gaz à effet de serre pour l'ensemble des établissements ____	153
Figure 46: Détail de l'étape « Evaluation des gains » _____	154
Figure 47 : Fiche concernant l'action "Client léger renouvellement" _____	159
Figure 48 : Economie d'électricité (en kWh) pour chaque action d'amélioration _____	160
Figure 49: Gains environnementaux (exprimés en t éq. CO ₂) pour chaque action _____	161
Figure 50: Durée de retour sur investissement (exprimée en années) pour chaque action d'amélioration ____	162
Figure 51: Efficacité carbone (en t éq. CO ₂ économisées par K€ d'investissement) calculée pour chaque action d'amélioration _____	162
Figure 52: Gain maximum (en t éq. CO ₂) de chaque action appliquée au périmètre d'étude _____	163
Figure 53: Synthèse des actions (inspiré de [ENSM-SE, 2010]) _____	164
Figure 54 : Synthèse des actions en fonction de l'efficacité carbone et de la durée de retour sur investissement [ENSM-SE, 2010] _____	165
Figure 55: Représentation du système étudié lors de l'application 2 _____	172
Figure 56: Nombre d'équipements de chaque catégorie présents au centre SITE _____	175
Figure 57: Schéma de principe du passage des mesures au profil utilisateur _____	178
Figure 58 : Consommations électriques totales (en kWh/an) par catégorie d'équipements et pour l'ensemble des équipements _____	179
Figure 59: Expression des consommations électriques annuelles des postes complets ayant fait l'objet de mesures _____	180
Figure 60: Répartition des temps (a) et des puissances (b, c, d) selon le mode de fonctionnement et les catégories d'équipements _____	182
Figure 61: Poids moyen unitaire (en kg) des équipements représentés _____	185
Figure 62 : Répartition de la quantité de déchets recensés par catégorie d'équipements (en kg par an) ____	185
Figure 63 : Expression de l'impact « contribution au changement climatique » exprimé en kg CO ₂ équivalent lors de la phase de fabrication (amortissement) et d'utilisation des équipements. _____	189
Figure 64: Impacts environnementaux potentiels liés à l'ensemble du parc informatique du centre SITE. ____	192
Figure 65 : Expression des impacts environnementaux liés à l'amortissement et à l'utilisation des équipements _____	195
Figure 66: Comparaison des puissances pour les différents modes de veille (puissances moyennes mesurées, exprimées en W) _____	198
Figure 67: Comparaison des actions d'amélioration en fonction des gains engendrés sur les différents impacts environnementaux considérés _____	203
Figure 68: Comparaison des gains des actions en fonction des gains financiers réalisés sur les cinq années à venir. _____	205
Figure 69: Efficacité environnementale _____	207
Figure 70: Représentation de la phase de collecte de données _____	215
Figure 71 : Schémas de principe des montages réalisés avec (a) et sans (b) économètre de contrôle _____	218
Figure 72 : Résultats des mesures de puissances instantanées sur une lampe de bureau avec économètre (graphique a) ou sans économètre (graphique b) _____	219

Figure 73: Comparaison des facteurs disponibles dans la base de données Ecoinvent et le facteur d'émission du Bilan Carbone® pour l'expression des émissions de CO ₂ équivalent lors de la phase de fabrication d'un ordinateur fixe [Moreau et al., 2011b]	235
Figure 74: Classement des équipements informatiques en fonction de leur impact sur le changement climatique par l'utilisation des facteurs disponibles dans la méthode Bilan Carbone® et la méthode CML 2001.	237
Figure 75 : Modélisation de l'incertitude [Hischier et al., 2010]	241
Figure 76 : Exemples d'incertitudes symétriques et asymétriques associées à un facteur d'émission [Frey et al., 2006]	242
Figure 77 : Expression des impacts sur le changement climatique (a) et sur les radiations ionisantes (b) des équipements informatiques présents au sein du 3 ^{ème} étage de l'Ecole des Mines.	249
Figure 78: Forçage radiatif au cours du temps d'une tonne de gaz émise à l'instant 0 [Source : Hauglustaine, 2009 dans [Durin, 2010]] (axe horizontal : en années échelle logarithmique ; axe vertical : forçage radiatif en W/m ² – échelle logarithmique)	251
Figure 79: Courbes représentant les facteurs de caractérisation de l'écotoxicité (a) et de la toxicité humaine (b) dans le modèle USETOX [Huijbregts et al., 2010]	253
Figure 80: Typologie des systèmes produits-services [Maussang-Detaille, 2008]	256
Figure 81: Les produits fonctionnels [Maussang-Detaille, 2008]	256
Figure 82: Illustration du principe de transfert d'impacts [inspiré de [ADEME, 2011a]]	262
Figure 83 : Expression des impacts sur le changement climatique (a) et sur les radiations ionisantes (b) des équipements informatiques présents au sein du 3 ^{ème} étage de l'Ecole des Mines.	263
Figure 84 : Consommation électrique par équipement et par poste utilisateur pour Casino (a) et pour l'EMSE (b).	265

Liste des tableaux

Tableau 1 : Equipements considérés comme TIC, répertoriés par fonction, inspiré de [Cremer et al., 2003]	9
Tableau 2 : Décisions précisant les critères d'attribution du label écologique européen.....	16
Tableau 3: Listes des principaux textes européens et français relatifs aux équipements informatiques en fonction de l'étape du cycle de vie	18
Tableau 4: Liste des 14 matières premières critiques pour l'UE (par ordre alphabétique) [Drezet, 2010].....	22
Tableau 5: Liste des produits chimiques présents dans les équipements [Source: [Greenpeace, 2005] cité dans [Flipo et al., 2007]]	23
Tableau 6: Filières de traitement des DEEE [ADEME, 2009b].....	26
Tableau 7: Objectifs et exemples d'indicateurs de pression, d'état et de réponse de l'environnement (d'après [Boutaud, 2004])	39
Tableau 8: Illustration de la perte d'information liée à l'agrégation des informations sous une note globale.....	43
Tableau 9: Objectifs principaux des outils d'évaluation environnementale étudiés	51
Tableau 10: Les six gaz à effet de serre du Protocole de Kyoto (d'après [MEDDTL, 2011])	53
Tableau 11: Facteurs de caractérisation (ODP _∞) des différents gaz contribuant à l'impact « épuisement de l'ozone stratosphérique » [Guinée et al., 2002]	55
Tableau 12: Facteurs de caractérisation (POCP) des différentes substances contribuant à l'impact « pollution photochimique » [Guinée et al., 2002].....	57
Tableau 13: Facteurs de caractérisation (ADP) des différents gaz contribuant à l'impact « épuisement des ressources fossiles » [Guinée et al., 2002].....	58
Tableau 14: Facteurs de caractérisation (AP) des différentes substances contribuant à l'impact acidification [Guinée et al., 2002].....	59
Tableau 15: Facteurs de caractérisation (EP) des différentes substances contribuant à l'impact eutrophisation [Guinée et al., 2002].....	60
Tableau 16: Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact écotoxicité (extrait du tableau) [Guinée et al., 2002].....	61
Tableau 17 : Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact toxicité humaine (extrait du tableau) [Guinée et al., 2002]	62
Tableau 18 : Facteur de caractérisation des substances contribuant à l'impact radiation ionisante [Guinée et al., 2002]	64
Tableau 19: Liste des principaux labels concernant les équipements informatiques de la fabrication à l'utilisation	86
Tableau 20: Exemple de fiche de suivi pour la prise de mesures.....	103
Tableau 21: Liste des indicateurs de fonctionnement retenus	112
Tableau 22 : Catégories de déchets présentes dans notre étude.....	113
Tableau 23 : Explication des pas de temps retenus par équipement pour la phase de mesures	136
Tableau 24: Nombre d'équipements de chaque catégorie ayant fait l'objet de mesures par établissement.	137
Tableau 25: Mesures réalisées sur une semaine et bilan annuel (1 an = 52,14 semaines)	138
Tableau 26 : Hypothèses de calculs et coefficients d'émissions utilisés dans l'étude	150
Tableau 27 : Hypothèses de calcul communes aux différentes actions	158
Tableau 28 : Profils utilisateurs obtenus sur la base des enquêtes	176
Tableau 29: Nombre d'équipements et pas-de-temps retenu pour chaque catégorie ayant fait l'objet de mesures au centre SITE.....	177
Tableau 30 : Hypothèses ayant permis l'expression des impacts environnementaux des différentes catégories d'équipements présents	188
Tableau 31 : Facteurs d'émissions et de caractérisation utilisés pour l'expression de l'impact sur le changement climatique.....	188
Tableau 32 : Facteurs de caractérisation utilisés dans l'étude.....	191

Tableau 33: Impacts environnementaux liés à la consommation de papier	196
Tableau 34: Impacts environnementaux évités en réalisant une économie de 10% d'impression.....	201
Tableau 35 : Hypothèses de calcul communes aux différentes actions	204
Tableau 36: Gains environnementaux et financiers réalisables sur 5 ans si toutes les actions étaient réalisées en même temps dans l'organisation.....	208
Tableau 37 : Impacts environnementaux « délocalisés » et « invisibles » aux yeux de l'utilisateur	213
Tableau 38: Approche et impacts environnementaux considérés dans les outils d'évaluation environnementale étudiés.....	214
Tableau 39 : Estimation de l'incertitude relative aux boîtiers de mesures sur l'étude de cas EMSE, pour l'ensemble des équipements d'une catégorie.	220
Tableau 40: Part de l'échantillon constitué chez Casino par rapport à l'ensemble des équipements au sein du groupe Casino.	221
Tableau 41 : Part de l'échantillon constitué au sein de l'EMSE par rapport à l'ensemble des équipements.....	221
Tableau 42: Résultats des mesures effectuées sur un mois et variation sur l'estimation de la consommation annuelle.....	222
Tableau 43: Grille de sensibilité pour les rejets liquides chroniques ou accidentels [INERIS, 2011].....	232
Tableau 44 : Méthodes d'évaluation des impacts présentes dans la base de données Ecoinvent [Hischier et al., 2010]	234
Tableau 45: Calculs de la sensibilité des résultats du TBE en fonction des facteurs utilisés	240
Tableau 46 : Hypothèses de calculs et coefficients d'émissions utilisés dans l'étude	246
Tableau 47: Facteurs de caractérisation CML 2001 [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010] et Bilan Carbone® [ADEME, 2010], pour la consommation de 1 kWh.....	248
Tableau 48: Comparaison des profils utilisateur et correspondance entre les deux applications.....	266

Liste des abréviations

ACV :	Analyse du Cycle de Vie
ADEME :	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFNOR :	Agence Française de NORmalisation
ARPANET :	Advanced Research Projects Agency Network
BC® :	Bilan Carbone®
CFC :	Chlorofluocarbure
CH₄ :	Formule chimique du Méthane
CIT :	Casino Information Technology
CNRS :	Centre National pour la Recherche Scientifique
CO₂ :	Formule chimique du Dioxyde de Carbone
CoC :	Code of Conduct
COV :	Composé Organique Volatil
CRT :	Cathod Ray Tube
DALYs:	Disability Adjusted Life Year
DCB :	DiChloroBenzène
DEEE :	Déchet d'Equipement Electrique et Electronique
DPSIR :	Driving forces Pressure State Impacts Responses
DSI :	Direction des Services Informatiques
EE :	Empreinte Ecologique
EEA :	European Environmental Agency
EEE :	Equipement Electrique et Electronique
EI :	Etude d'Impacts
EPA :	Environmental Protection Agency
EPE :	Evaluation des Performances Environnementales
EuP :	Energy using Product
GES :	Gaz à Effet de Serre
GHG :	GreenHouse Gases
GIEC:	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GWP :	Global Warming Potential
H₂O:	Formule chimique de l'eau
H₂SO₄ :	Formule chimique de l'acide sulfurique
HCFC:	HydroChloroFluoroCarbures
HCl :	formule chimique de l'acide chlorhydrique
HFC :	HydroFluoroCarbures
HNO₃:	Formule chimique de l'Acide Nitrique
IC :	Informatique Centralisée
ICE :	Indicateur de Condition de l'Environnement
ICPE :	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
ID :	Informatique Distribuée
INSEE :	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IPCC :	International Panel on Climate Change
IPE :	Indicateur de Performance Environnementale
IPM :	Indicateur de Performance de Management
IPO :	Indicateur de Performance Organisationnelle
ISO :	International Organisation for Standardisation
ITIL :	Information Technology Infrastructure Library
JOUE :	Journal Officiel de l'Union Européenne
LCD :	Liquid Crystal Display
MEDDTL:	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
MFA :	Material Flow Analysis

MFP :	Multi Function Printer
MIPS :	Material Input Per Service
N₂O :	Formule chimique du Protoxyde d'azote
NO_x :	Composés azotés
NRE :	Nouvelles Régulations Economiques
NTIC :	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
O₃ :	Formule chimique de l'Ozone
OCDE :	Organisation de Coopération et de Développement Economique
ONG :	Organisation Non Gouvernementale
ORSE :	Observatoire sur la Responsabilité Sociétale des Entreprises
PBB :	diPhényle PolyBromé
PBDE :	Ether diPhényle PolyBromé
PCET :	Plan Climat-Energie Territorial
PDA :	Personal Digital Assistant
PER :	Pression Etat Réponse
PFC :	PerFluoroCarbures
PME :	Petite et Moyenne Entreprise
PRG :	Pouvoir de Réchauffement Global
PMI :	Petite et Moyenne Industrie
PO₄ :	Formule chimique du Phosphate
REMODECE :	REsidential MOnitoring to DEcrease Energy
REP:	Responsabilité Elargie du Producteur
RoHS :	Restriction of Hazardous Substances
ROI :	Return On Investment
RSE :	Responsabilité Sociétale des Entreprises
Sb :	Antimoine (Symbole Chimique)
SF₆ :	Hexafluorure de Soufre
SFA :	Substances Flow Analysis
SIG :	Système d'Information Géographique
SNDD:	Stratégie Nationale Développement Durable
SO₂ :	Formule chimique du Dioxyde de Soufre
TBE :	Tableau de Bord Environnemental
TIC :	Technologies de l'Information et de la Communication
TMF :	Total Material Flow
TPE :	Terminal de Paiement Electronique
UE :	Union Européenne
UPS :	Uninterruptible Power Supply
WBSCD :	World Business Council for Sustainable Development
WRI :	World Resources Institute
WWF :	World Wide Foundation

Introduction générale

Lors de la conférence de Rio sur l'environnement de 1992, les dirigeants de plus d'une centaine de nations ont témoigné de leur prise de conscience d'une dégradation avancée de l'écosystème terrestre (changement climatique, érosion de la biodiversité, désertification). Face à ces menaces, les signataires de la Déclaration de Rio [Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1992] ont mis en avant la nécessité de tendre vers un développement durable, s'engageant ensuite, mais de façon non contraignante juridiquement, à traduire ce concept dans leurs politiques intérieures. Le concept de développement durable a été formalisé en 1987, dans un rapport de la Commission Mondiale à l'Environnement et au Développement, souvent nommé « Rapport Brundtland » du nom de Madame Gro Harlem Brundtland, en charge de cette commission. Il y a été défini comme « un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. »

Deux concepts sont inhérents à cette notion :

- Le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité,
- L'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur « la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir » [Brundtland et al., 1988].

Cette définition relative à la protection de l'environnement implique que les comportements de tous doivent être repensés et modifiés afin de ne pas épuiser dangereusement les ressources naturelles et ainsi permettre aux générations futures de vivre sur une planète viable. Le développement durable est souvent défini comme un processus évolutif basé sur trois éléments principaux : la durabilité écologique, le développement économique et l'équité sociale entre les populations et entre les générations.

La préservation de l'environnement est aujourd'hui devenue un enjeu majeur pour l'Homme. Cette prise de conscience face à l'importance de réduire son impact sur l'environnement s'est intensifiée par le constat des bouleversements des équilibres naturels auxquels nous assistons : changements climatiques, diminution des ressources naturelles disponibles, érosion de la biodiversité, ...

Depuis l'entrée en vigueur en 2005 du Protocole de Kyoto signé en 1997, les Etats membres de l'Union Européenne se sont imposés de réduire d'ici 2012 les émissions de gaz à effet de serre de l'Union européenne de 8% par rapport aux émissions des années 1990. Afin d'atteindre les objectifs fixés, ce traité international a en particulier donné lieu, au sein des différents Etats l'ayant ratifié, à la mise en place de marchés de quotas d'émissions de CO₂.

Dans un contexte environnemental plus général, la réglementation s'intensifie (par exemple, le nombre de textes réglementaires relatifs à l'environnement qui se multiplie ces dernières années) et évolue progressivement d'une approche curative (traitement des pollutions) à une approche préventive (anticiper les pollutions). Il ne s'agit donc plus de traiter uniquement les pollutions lorsqu'elles sont présentes mais de les anticiper avec une approche intégrée de prévention à la source. Ce principe est applicable à l'échelle de sites industriels tout comme à l'échelle d'un produit fini.

Le contexte réglementaire environnemental s'applique désormais à toutes les échelles : les industries, les collectivités, les produits finis, la conception des produits, les déchets... Les études se

multiplient pour connaître et comprendre les conséquences environnementales de chaque activité, produit ou service d'une organisation, bien que cela soit en partie en contradiction avec le développement de la société actuelle gouverné par un développement rapide et une vision souvent à court terme.

La principale contradiction réside dans l'opposition entre la prise en compte de l'environnement (épuiement des ressources, émissions de gaz à effet de serre, consommations d'énergie, ...) et le changement rapide imposé par le rythme de la société actuelle, en constant renouvellement. Les produits se multiplient, se diversifient et par conséquent leurs impacts sur l'environnement ne peuvent qu'augmenter et se complexifier. Un produit actuel peut parfois avoir moins d'impacts sur l'environnement qu'un produit fabriqué il y a 10 ans, mais leur consommation ne cesse d'augmenter : les impacts environnementaux sont toujours présents et s'accroissent. C'est le cas du secteur des technologies de l'information et de la communication, devenu progressivement incontournable.

Les tailles et capacités des ordinateurs fabriqués aujourd'hui sont sans commune mesure avec les ordinateurs de calculs occupant une pièce entière dans les années 1950. Mais les équipements informatiques se sont démocratisés et généralisés et leur nombre ne cesse de croître. Dans les pays développés, il n'est pas rare de trouver plusieurs ordinateurs au sein d'un même foyer. De manière plus générale, les équipements électroniques devenus mobiles sont présents partout dans la société actuelle (loisirs, santé, travail) ce qui accentue le phénomène d'accroissement du nombre de produits et donc des impacts environnementaux qui leur sont liés.

Afin de caractériser et quantifier ces impacts environnementaux, différentes méthodes d'évaluation environnementale peuvent être utilisées. Ces méthodes peuvent être des outils de diagnostic permettant la détermination d'un état des lieux ou la recherche de l'origine d'un impact identifié. Il peut également s'agir d'audits environnementaux qui cherchent à réaliser une comparaison avec une référence. Mais la majorité de ces méthodes servent à évaluer les impacts environnementaux : les identifier, les caractériser et les quantifier. Parmi les méthodes les plus connues en France se trouvent les études d'impacts réglementaires, les analyses environnementales à la base des systèmes de management environnemental (ISO 14 001, par exemple), les Analyses de Cycle de Vie (ACV), le Bilan Carbone® ou encore l'Empreinte Ecologique.

Ces méthodes se distinguent par plusieurs points :

- l'**objectif**, qui peut être de caractériser les divers impacts ou de créer un outil de suivi de ces impacts ;
- le **périmètre de l'étude** pouvant être un produit ou un site ;
- l'**approche** envisagée : spécifique à l'objet d'étude ou utilisant des données génériques.

Ainsi, selon les résultats souhaités, le décideur devra choisir la méthode la plus appropriée en termes d'objectifs ainsi que dans la démarche appliquée.

Les impacts environnementaux qui peuvent être exprimés par l'intermédiaire de ces méthodes d'évaluation sont multiples. Il peut s'agir :

- **d'impacts environnementaux locaux** : Une grande partie des impacts sur l'environnement liés aux activités humaines possède des effets perceptibles localement. Il est possible de classer ces impacts par rapport au milieu avec lequel l'interaction est la plus importante tels que :
 - o *les impacts sur le sol* : par exemple la dégradation de la qualité du sol engendrée par le stockage des déchets

- *les impacts sur l'air* : par exemple les émissions de polluants via la mauvaise filtration de l'air d'une usine
- *les impacts dans les eaux* : par exemple la modification de la faune et de la flore via la contamination d'un cours d'eau par les effluents (flux liquides résultant d'une activité).

Il apparaît alors clairement que via l'expression «impact local», une dimension géographique de proximité soit sous-jacente.

- **d'impacts environnementaux planétaires** : L'équilibre de la planète repose sur une série de grands mécanismes comme les cycles des principaux éléments chimiques ou molécules [Adoue , 2007]. Les conditions nécessaires à la vie sont assurées par ces éléments. L'homme, via ses activités, dérègle ces fragiles équilibres : c'est par exemple la problématique actuelle du changement climatique via la perturbation du phénomène naturel de régulation de la température globale dit «effet de serre».

De plus, à l'heure actuelle, le phénomène de délocalisation des entreprises contribue fortement au déplacement de la pollution. L'hypothèse du havre de pollution argumente cette idée en mentionnant le fait que les industries les plus polluantes ont migré depuis les pays développés vers les pays en développement [Akbostanci et Türüt-Asik, 2004]. Ainsi, ces activités ne se font plus sur le territoire national et contribuent à l'augmentation de la pollution sur un autre territoire. Les impacts locaux sont alors déplacés mais leurs répercussions au niveau planétaire reste entières : nous pouvons alors parler d'« **impacts locaux délocalisés** » par rapport au lieu d'utilisation.

Une deuxième approche consisterait à distinguer les impacts environnementaux selon s'ils sont perçus directement ou non par la population. Ainsi, les **impacts environnementaux perceptibles** par tous sont considérés comme « *visibles* ». Par exemple, la pollution aux particules fines, phénomène classique récurrent dans les grandes agglomérations, est facilement identifiée par l'intermédiaire d'un nuage sombre (chargé en particules) visible au-dessus de l'agglomération. A l'opposé, les **impacts environnementaux non perceptibles** par tous sont appelés « *invisibles* ». Pour illustrer ce propos, nous pouvons citer la consommation d'eau nécessaire à la fabrication d'un produit manufacturé. Cette utilisation est invisible pour le consommateur, ce qui rend l'impact environnemental peu identifiable.

Les équipements informatiques sont confrontés à ce double enjeu concernant les impacts environnementaux « locaux délocalisés » et « non perceptibles ». Ainsi, l'évaluation environnementale de l'utilisation des systèmes informatiques au sein d'une organisation (approche site et produit) ne réfère aujourd'hui à aucune méthode identifiée.

Dans ce travail de thèse, nous nous proposons d'aborder cette problématique de l'évaluation environnementale des équipements informatiques et de comprendre plus précisément cette problématique à l'échelle d'une organisation. Quels sont les outils à disposition pour évaluer les impacts sur l'environnement des systèmes informatiques d'une organisation ? Est-il possible d'évaluer ces impacts ? Existe-t-il des solutions pour les réduire et améliorer la gestion de ces impacts au sein de l'organisation étudiée.

Le premier chapitre présente le contexte de la thèse, la problématique abordée, ainsi que les hypothèses et questions de recherche pour aboutir à la définition des objectifs de ce travail de thèse. La description du contexte du développement des équipements informatiques constitue la première partie de ce chapitre. La deuxième partie aborde les outils d'évaluation environnementale. Enfin une troisième et dernière partie traite de l'évaluation environnementale des équipements informatiques et aboutit à la problématique de ce travail de thèse.

Le second chapitre correspond à la description de la méthodologie d'évaluation environnementale proposée dans cette thèse. Le travail de réflexion porte en particulier sur les indicateurs pertinents et leurs méthodes de calculs.

Le troisième chapitre de ce manuscrit a pour objectif de présenter et de valider la méthodologie développée. La première application s'est effectuée dans le cadre d'un partenariat avec la société Casino IT, « business unit » du Groupe Casino. A l'issue de cette première application, des compléments et des ajustements ont pu être apportés. La seconde application tenant compte de ces éléments a été réalisée à l'Ecole des Mines et se conclut sur d'autres perspectives de développement et d'amélioration de la méthodologie.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre apporte une discussion sur les principales limites et les intérêts de cette méthodologie. De plus, il présente les perspectives de développement à d'autres catégories d'équipements informatiques ainsi que la possible transposition à un autre secteur d'activité en vue d'une généralisation de la méthodologie.

L'ensemble de la démarche de recherche suivie au cours de la thèse est présentée dans la Figure 1 ci-dessous.

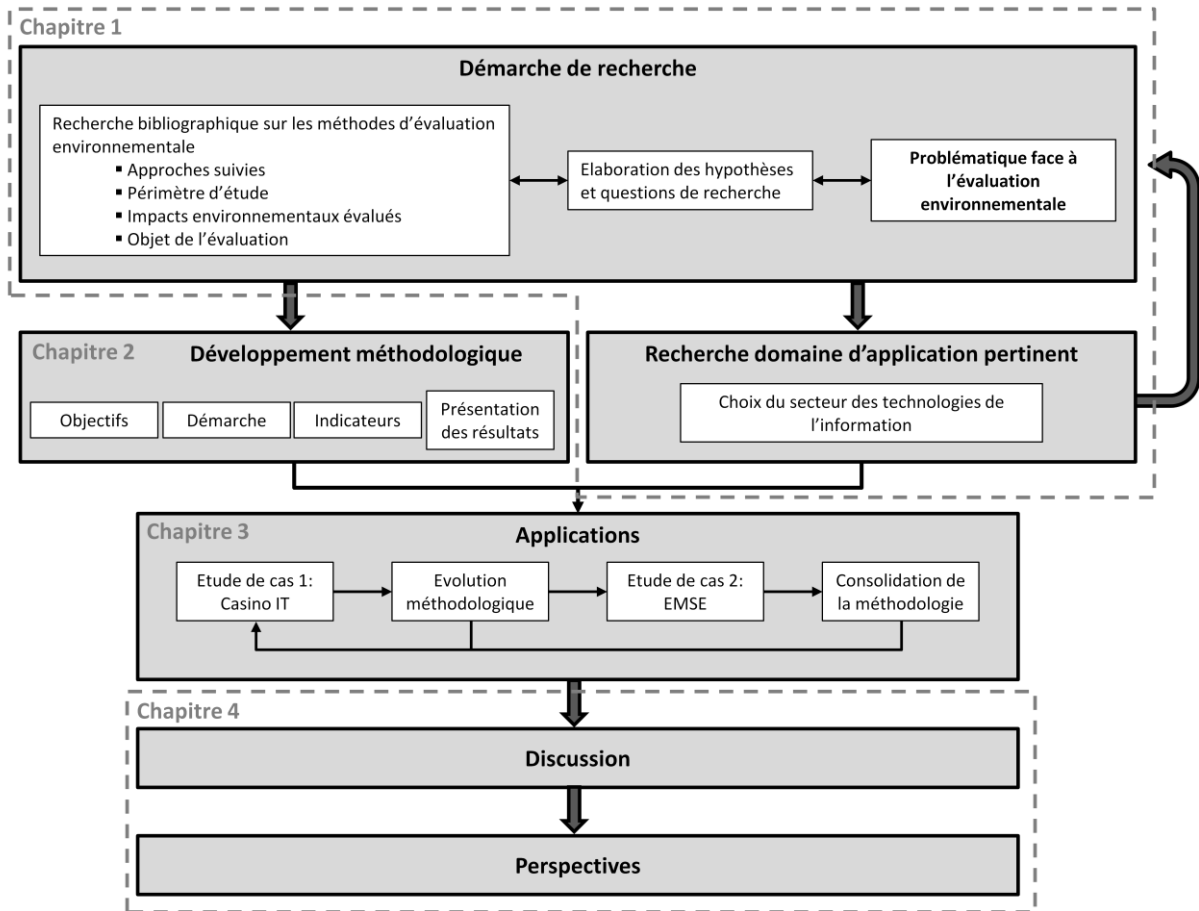


Figure 1 : Démarche de recherche de la thèse

Chapitre 1 L'impact sur l'environnement des technologies de l'information et les outils d'évaluation

Ce chapitre a pour objectif de présenter le contexte lié au développement des technologies de l'information et de la communication ainsi que les impacts sur l'environnement.

Cette analyse permettra de définir les hypothèses de recherche et aboutira à la détermination des questions de recherche auxquelles ce travail se propose de répondre.

Ce chapitre se compose de trois parties. La première exposera les enjeux environnementaux liés aux équipements informatiques. La seconde présentera les enjeux de l'évaluation environnementale dans ce contexte des technologies de l'information et de la communication. Enfin, dans une troisième partie, nous aborderons la pertinence des outils actuels d'évaluation environnementale en vue de l'évaluation des impacts environnementaux liés aux (services rendus par les) équipements informatiques d'une organisation.

Partie 1 Les Technologies de l'Information et de la Communication face à l'environnement

L'information permet à un individu de connaître et d'être en relation avec son environnement plus ou moins éloigné. Sans information, il s'avère difficile de savoir de quoi est constitué l'environnement ainsi que les événements qui s'y déroulent. Ainsi, depuis toujours, l'accès à l'information constitue un enjeu important de développement des sociétés.

Auparavant transmise de manière orale, l'information sur support matériel s'est développée afin de favoriser sa circulation et l'accès à un maximum de personne. Retranscrit à la main dans un premier temps, les livres se développent et voient arriver l'imprimerie au XV^{ème} siècle. Cette dernière constituera une véritable révolution permettant la dissémination de l'information à plus grande échelle.

Aujourd'hui, bien que les livres soient toujours aussi prisés, la majorité de l'information est véhiculée par des technologies modernes : les technologies de l'information et de la communication. Les supports se multiplient avec un accès croissant via internet. Les réseaux sociaux voient également le jour et sont pour beaucoup dans la rapidité de circulation de l'information. Les quotidiens papiers (journaux, magazines) se mettent eux-aussi à l'heure d'internet. Le citoyen se trouve désormais plus souvent confronté à une surabondance d'information plutôt qu'à un manque.

Ainsi, nos modes de vie actuels sont fortement influencés par l'ensemble de ces supports mais ces derniers ne sont pas sans conséquences pour l'environnement. Dans cette première partie, nous aborderons la question des technologies de l'information : de quoi s'agit-il exactement, et quels sont les enjeux environnementaux relatifs à leur développement ?

1.1 D'un enjeu mondial...

1.1.1 Quelques définitions

- ***Technologies de l'information***

Dans l'introduction du livre *Ecologie des infrastructures numériques* paru en 2007, Fabrice Flipo commence par une précision concernant la société actuelle et son rapport à l'information : « *Notre société est entrée dans une ère où l'information et la communication, jusque-là véhiculées par des moyens reposant sur des ressources relativement renouvelables (papier, parole, etc.), utilisent désormais des supports « électroniques ». L'information est codée sous forme numérique et traitée en utilisant les propriétés des semi-conducteurs. Cet unique support, qui se substitue en partie aux autres, peut véhiculer du texte, du son, des images : c'est ce qu'on appelle le « multimédia », et qui désigne en réalité un « monomédia » (le numérique), multiservices (son vidéo, etc.)* » [Flipo et al., 2007].

La notion de « Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) » ou plus anciennement Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) regroupe les technologies relatives à l'informatique, les télécommunications et l'électronique. Une première distinction peut être établie en distinguant d'une part les équipements (le « hardware ») et d'autre part l'ensemble des éléments permettant leur utilisation comme les logiciels, constituant alors le « software ». Les TIC comprennent toutes les ressources indispensables à la manipulation de l'information (stockage,

transmission, gestion, ...). Ordinateurs, programmes ou réseaux de communication sont souvent répertoriés selon la classification suivante [Kennedy, 2006] [CCI, 2009] [Kennedy, 2006] [Graini, 2010] [CCI, 2009] [Office de la Langue Française, 2011] [Office de la Langue Française, 2011] :

- La **microélectronique** et les **composants** : La microélectronique fait référence à l'élaboration de circuits électroniques miniaturisés ainsi qu'à leur utilisation. Cette première catégorie concerne plus précisément les éléments de bases des équipements électroniques comme les circuits électroniques.
- L'**équipement informatique**, serveurs, matériel informatique : dans cette catégorie, l'équipement est considéré dans sa totalité qu'il s'agisse par exemple d'un ordinateur ou d'un serveur.
- Les **services informatiques** et les **logiciels** : ce n'est plus ici l'équipement en lui-même qui est concerné mais les éléments nécessaires à l'utilisation de l'équipement, parmi eux les logiciels qui sont définis comme les programmes permettant la réalisation de tâches spécifiques sur un ordinateur.
- Les **télécommunications** et les **réseaux informatiques** : avec cette catégorie, c'est le transfert d'informations entre différents équipements qui est mis en avant. Les télécommunications regroupent tous les moyens de communications connus à ce jour assurant la transmission de signaux entre équipements parfois séparés par de nombreux kilomètres.
- Le **commerce électronique** et les **médias électroniques** utilisent les divers outils précédents pour transmettre des messages. Ainsi, dans le cas du commerce électronique, il s'agit plus précisément de réaliser les activités commerciales au travers des outils informatiques et notamment internet. Ce dernier constituant alors un atout non négligeable de communication sur les atouts des divers produits ou services commercialisés.
- Le **multimédia** correspond à la notion la plus « englobante » en considérant qu'au sein d'un seul outil il serait possible d'associer de multiples informations (sous forme d'images, de textes et de sons). Le multimédia se situe alors au croisement de l'audiovisuel, de l'informatique et des télécommunications, dont l'avantage majeur est apporté par l'informatique : l'interactivité.

Le **Tableau 1** présente les équipements relatifs aux TIC.

Tableau 1 : Equipements considérés comme TIC, répertoriés par fonction, inspiré de [Cremer et al., 2003]

Catégorie d'équipements par fonction	Détail des équipements
Loisir	Audio : Chaîne stéréo / Amplificateur Hifi / Lecteur cassette / Baladeur MP3 / Lecteur CD minidisque Vidéo : Magnétoscope / Lecteur DVD / Téléviseur / Caméra / Vidéo projecteur Autres : Console de jeu / Appareil photo numérique / GPS
Communication	Minitel / Téléphone fixe ; sans fil / Répondeur / Téléphone mobile / Fax
Informatique	Unité centrale / Portable / Ecran / Station d'accueil / Imprimante / Photocopieur / Fax / Serveur
Domotique	Electroménagers / Stores et volants roulants / Equipements de surveillance ...

Tout comme l'amélioration des techniques de production, l'augmentation de la puissance de calcul ou encore la miniaturisation des composants, le développement d'internet joue un rôle important

dans la modification des comportements relatifs à l'usage des équipements informatiques. Les prémices du concept d'internet sont apparues le 2 septembre 1969 lorsque le professeur Len Kleinrock et ses deux étudiants Stephen Crocker et Vinton Cerf de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA) ont réussi à échanger quelques jeux de données entre deux gros ordinateurs reliés par un câble de 4,5 mètres de longueur. L'ARPANET (Advanced Research Projects Agency NETWORK), réseau à l'origine de l'internet actuel était né [Poulain et Lefebvre, 2010]. Le concept d'internet apparaît en 1973 mais il faudra attendre le 1^{er} janvier 1983 pour sa naissance officielle avec le passage du protocole NCP (Network Control Protocol) au TCP/IP (Transmission Control Protocol et Internet Protocol) [Poulain et Lefebvre, 2010]. L'évolution du nombre d'abonnés ne cesse d'augmenter depuis une dizaine d'année. Les graphiques a et b (Figure 2) montrent cette évolution avec une moyenne pour les pays membres de l'OCDE qui se situait à 7,2 % d'abonnés en 2003 et 24,9% en 2010 [OCDE, 2011].

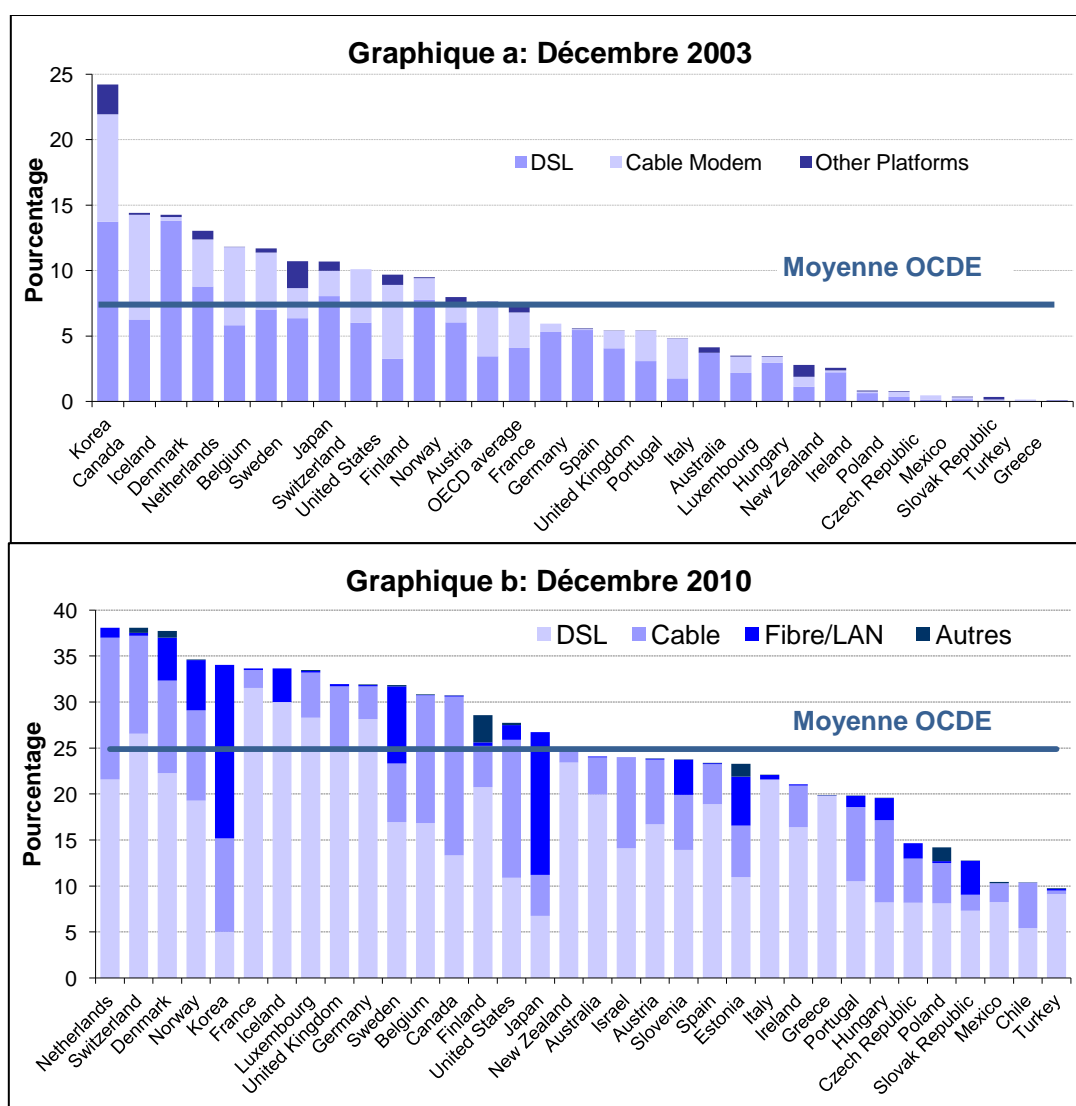


Figure 2: Pourcentages des abonnés haut débit dans les pays de l'OCDE en décembre 2003 (graphique a) et en décembre 2010 (graphique b) [OCDE, 2011]

Les technologies de l'information se développent dans de nombreux domaines de la vie domestique et collective. Des chiffres impressionnants paraissent dans de nombreuses études [Ruediger et Williams, 2003] [Flipo et al., 2007] [OCDE, 2011] concernant l'évolution de la quantité

d'équipements. C'est ainsi qu'entre 1993 et 2000, l'augmentation du nombre d'ordinateurs par habitant a été estimée à 181% au niveau mondial [Flipo et al., 2007]. En France, 73,2% des foyers sont équipés d'ordinateurs, soit 10,3% supplémentaires depuis 2008 (Figure 3) [Médiamétrie et GfK, 2011]. En avril 2002, le nombre d'ordinateurs vendus a dépassé le milliard. De plus, à titre d'exemple un taux de croissance de 40% par an pour l'Indonésie a été observé et 46% de la population mexicaine est équipée d'un ordinateur [Flipo et al., 2007].

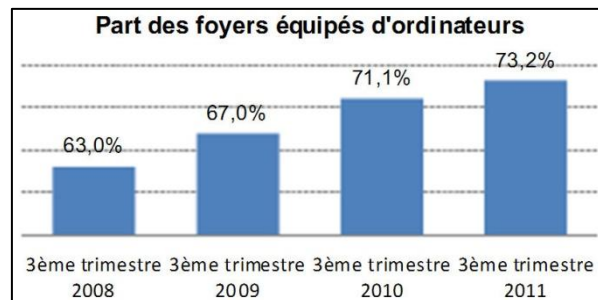


Figure 3: Part des foyers équipés d'ordinateurs [Médiamétrie et GfK, 2011]

Tous les équipements électriques et électroniques ne sont pas classés parmi les technologies de l'information. Cependant, ces dernières reposent sur l'existence de ces équipements électriques et électroniques.

- **Une multiplication des usages**

Les TIC sont des produits ou des systèmes qui communiquent, stockent et / ou traitent l'information. De nombreuses études sociologiques ont montré le développement des besoins en communication de la société actuelle [Beaudoin et Licoppe, 2002] [Smoreda et Licoppe, 2001] [Licoppe et Smoreda, 2005] [Rivière, 2000]. De plus, grâce aux progrès technologiques, des produits auparavant indépendants sont désormais intégrés dans les réseaux. Ainsi, de nouvelles technologies émergent chaque jour et contribuent à l'évolution des technologies de l'information et de la communication. L'étude « Référence des équipements multimédias » conduite par GfK et Médiamétrie chaque année révèle qu'au troisième trimestre 2011 en France, plus de 21 millions de foyers possédaient au moins un ordinateur (71,6 % des foyers contre 67,7 % au troisième trimestre 2010) [Médiamétrie et GfK, 2011]. Cette étude confirme les résultats des ventes d'ordinateurs en indiquant que 44,1% des foyers français sont désormais équipés d'un ordinateur portable ce qui représente 4 millions de foyers supplémentaires par rapport à 2008 (26,7%).

A ce développement de nouvelles technologies, s'ajoute une individualisation des pratiques. Ainsi, il n'est pas rare de trouver au sein d'un même foyer : plusieurs téléphones, plusieurs ordinateurs, des adresses mail individuelles...[Beaudoin et Licoppe, 2002]. En 2010, 28,7% des foyers français (soit 7,8 millions de foyers) seraient équipés de plus d'un ordinateur ce qui représente une augmentation de 27% en une seule année [Médiamétrie et GfK, 2011].

Cette évolution des TIC se voit de manière plus générale pour tous les équipements informatiques. L'étude GfK et Médiamétrie référence 8,7 équipements numériques par foyer français pour le premier trimestre 2011 contre 4,9 cinq ans plus tôt [Médiamétrie et GfK, 2011]. Un rapport de 2009 publié par l'OCDE met en avant cette forte augmentation en représentant l'évolution du marché des TIC avec plus 80% en 10 ans (Figure 4).

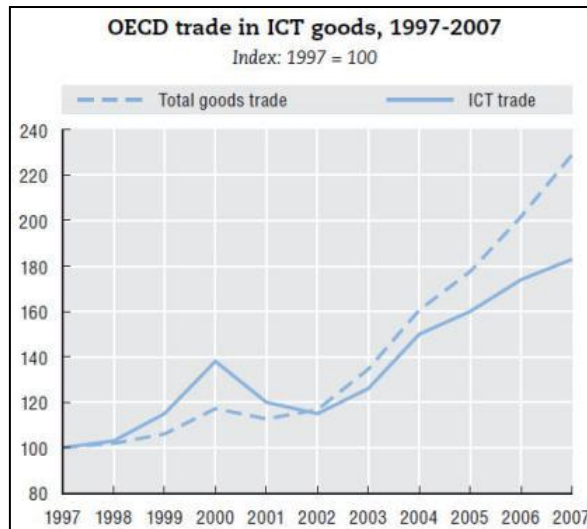


Figure 4 : Illustration du marché des TIC entre 1997 et 2007 [OCDE, 2009]

Mais l'augmentation continue du taux d'équipements est le fruit d'une évolution comportementale des usagers, à laquelle s'ajoutent d'autres événements de nature économique et industrielle :

- la **réduction des coûts** (industrialisation et délocalisation) et les avancées technologiques dans les pays constructeurs (Asie principalement) induisent une augmentation de l'offre d'équipements diversifiés ;
- l'entrée dans une société consumériste avec l'élaboration de **produits jetables** plutôt que durables dans le temps. La **réduction de la durée de vie des équipements électroniques**. La durée de vie moyenne d'un ordinateur est passée de 6 ans en 1997 à 2 ans en 2005 [Bourguignat, 2008]. Cette tendance trouve des explications au niveau marketing (il faut sans cesse renouveler la gamme de produits pour satisfaire la volonté de nouveautés des utilisateurs) ainsi qu'au niveau économique (assurer la croissance du chiffre d'affaires de la société), les coûts de fabrication diminuent proportionnellement à la réduction de la durée de vie des équipements. En effet, en allongeant la durée de vie des équipements, il faut renforcer la sécurité pour éviter les pannes et ainsi renforcer les équipements pour limiter les composants défectueux. Par conséquent, un équipement produit pour une durée de vie de 3 ans aura des composants moins chers qu'un équipement prévu pour une durée de vie de 5 ans.
- une grande proportion d'équipements sont désormais produits essentiellement en Asie (Figure 5) où le coût de la main d'œuvre est bas, mais les réparations continuent de se faire à proximité de l'utilisateur où le coût de la main d'œuvre est plus important. Il devient alors plus rentable pour l'utilisateur d'acheter un nouvel équipement neuf plutôt que de le réparer.
- une **augmentation de la puissance** requise pour un usage similaire [Drezet, 2011b].

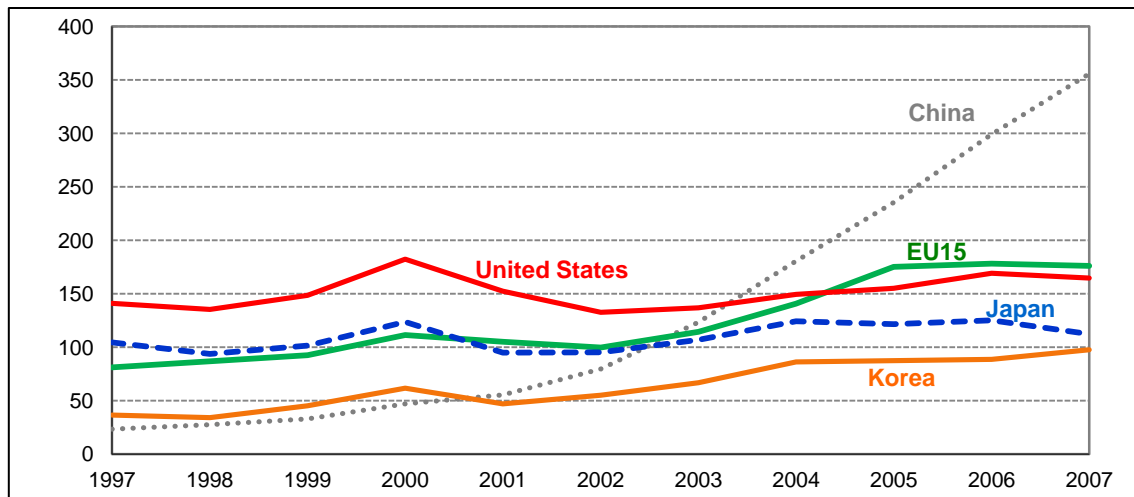


Figure 5: Economies exportatrices de biens des TIC, 1997-2007 [OCDE, 2011]

- **Équipements électriques et électroniques (EEE)**

Un EEE est défini comme « un équipement fonctionnant grâce à un courant électrique ou à un champ électromagnétique, ou un équipement de production, de transfert ou de mesure de ces courants et champs, conçu pour être utilisé à une tension ne dépassant pas 1000 volts en courant alternatif et 1500 volts en courant continu. » [ADEME, 2009b]. Ces équipements se diversifient et font aujourd'hui partie du quotidien aussi bien professionnel que personnel (exemples : les ordinateurs, les consoles de jeux vidéos ou encore les appareils de surveillance en milieu hospitalier, ou les valideurs de titres de transports dans les transports en commun). La diversification est telle qu'il est à présent difficile d'établir des catégories précises. Il existe néanmoins une typologie officielle, en dix catégories, fixée par la directive 2002/96/CE [Parlement et Conseil Européen, 2003b] :

1. Gros appareils ménagers
2. Petits appareils ménagers
3. Équipements informatiques et de télécommunications
4. Matériel grand public
5. Matériel d'éclairage (à l'exception des appareils d'éclairage pour tubes fluorescents domestiques et des ampoules à filament)
6. Outils électriques et électroniques (à l'exception des gros outils industriels fixes)
7. Jouets, équipements de loisir et de sport
8. Dispositifs médicaux (à l'exception de tous les produits implantés ou infectés)
9. Instruments de surveillance et de contrôle
10. Distributeurs automatiques

Les EEE ne comprennent pas les équipements électriques et électroniques liés à la protection des intérêts essentiels de sécurité de l'Etat, les armes, les munitions et le matériel de guerre destinés à des fins spécifiquement militaires [Parlement et Conseil Européen, 2003b].

Les EEE regroupent les équipements destinés aux ménages ainsi que ceux destinés à être utilisés dans des locaux commerciaux, industriels, agricoles, institutionnels ou autres, et qui, en raison de leur nature et de la quantité vendue, sont similaires à ceux destinés aux ménages.

Par conséquent, les EEE considérés comme équipements électriques et électroniques professionnels sont ceux ne répondant pas à la définition des EEE ménagers.

Parmi ces EEE, nos travaux de recherche se sont focalisés sur les TIC et plus particulièrement les Technologies de l'Information qui ne regroupent que les équipements relatifs à l'informatique et à l'électronique à savoir la catégorie « Informatique » du Tableau 1 comprenant notamment les **ordinateurs (fixes, portables, ultraportables), les imprimantes (de bureau ou multifonction), les écrans et les serveurs.**

1.1.2 Cadre réglementaire

Le cadre réglementaire français découlant d'exigences européennes propose (1) l'attribution de labels écologiques relatifs à des critères de fabrication et d'usage des équipements. (2) L'obligation de la gestion des émissions et des rejets liés aux EEE. Ces textes réglementaires donnent des objectifs à atteindre en termes de taux de valorisation par exemple ainsi que sur la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques dits DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques).

- ***Au niveau des sites de fabrication***

La prise en compte de l'environnement dans la législation française date du milieu des années 60. Le premier texte en environnement est la loi sur l'eau, en 1964. En 1975, une loi relative aux déchets est publiée. L'année suivante paraît un texte fondateur dans le domaine de la prise en compte de l'environnement par les entreprises : la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Issue de textes préalables (décret de 1810 puis loi en 1917), son objectif est de soumettre à la surveillance de l'Etat les installations qui représentent des dangers ou des inconvénients pour l'environnement au sens large [Journal Officiel de la République Française, 1976]. Le Code de l'Environnement [Code de l'environnement, 2010] au début des années 2000, a permis de codifier les textes relatifs aux diverses lois portant sur les différents thèmes de l'environnement en un ensemble cohérent et structuré. Ainsi, la base juridique de la politique de l'environnement industriel en France est la législation ICPE décrite dans le titre 1^{er} du livre V du code de l'environnement. Elle concerne toutes les activités industrielles définies par la « nomenclature des installations classées », incluant certaines activités d'agriculture intensive et les activités de traitement des déchets, mais excluant les installations nucléaires et les mines qui font l'objet d'une réglementation spécifique. Elle définit les procédures d'autorisation et de contrôle, se focalise sur la responsabilité de l'exploitant et introduit, dès 1976, les études d'impact et de danger. Dans ce contexte, les sites de fabrication des EEE sont soumis en France à la loi ICPE de 1976 et doivent par conséquent vérifier à quel régime ils appartiennent (déclaration, enregistrement ou autorisation). Les régimes sont définis par l'intermédiaire de seuils dans la nomenclature ICPE qui répertorie l'ensemble des substances et activités soumises à contrôle. Les entreprises concernées par le régime d'autorisation doivent alors entamer une procédure de demande d'autorisation à exploiter qui se traduit en particulier par la réalisation d'un dossier de demande d'autorisation. Ce dernier inclut, entre autres, trois études principales : l'étude d'impact (intégrant une étude sanitaire), l'étude de danger et la notice hygiène et sécurité. Par l'intermédiaire de ces trois études, l'entreprise doit alors expliquer les éléments mis en œuvre afin de prévenir les pollutions et risques liés à son activité [Cikankowitz et Laforest, 2010].

Au niveau européen, la directive « IED » (Industrial Emission Directive ou directive sur les émissions industrielles) a été définitivement adoptée le 8 novembre 2011 par le Conseil des ministres de l'Union européenne [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2010b]. Elle remplace et renforce la directive relative à la prévention et la réduction intégrées de la pollution (IPPC) de 1996 [Journal Officiel de l'Union Européenne, 1996], élément important de la politique européenne en matière de réduction des rejets dans l'environnement basé sur plusieurs principes comme l'approche intégrée pour les permis d'exploiter (prise en compte des émissions dans l'eau, l'air et les sols au sein d'un même document), la mise en œuvre des meilleures techniques disponibles (MTD), la flexibilité de mise en œuvre des MTD en fonction des conditions locales et la participation du public au processus de délivrance du permis et de suivi des émissions de ces installations.

La directive IED s'applique aussi bien aux sites industriels qu'aux procédés ou unités de production ainsi qu'aux processus managériaux ou de gestion des risques les composant [Laforest, 2008]. Elle vise à prévenir et à réduire la pollution de l'air, de l'eau et du sol causée par les installations industrielles en réglementant les émissions de toute une série de polluants, y compris les composés soufrés et azotés, les particules de poussière, l'amiante et les métaux lourds. L'objectif principal étant d'améliorer la qualité de l'air, de l'eau et du sol au niveau local par l'intermédiaire des points suivants :

- **rationaliser la législation européenne** : l'ensemble des directives relatives aux émissions industrielles relatives aux grandes installations de combustion, à l'incinération des déchets, aux émissions de solvants et à l'industrie du dioxyde de titane sont désormais réunies dans un seul et même texte ;
- **renforcer et préciser le rôle des documents sectoriels de référence** (les BREFs – Best References document) pour déterminer les conditions d'exploitation par les autorités compétentes ;
- instaurer des **dispositions pour la révision périodique** des conditions d'autorisation,
- **renforcer les obligations des États membres** en matière de contrôle des installations,
- renforcer les dispositions relatives à la fermeture et la remise en état des sites.

- ***Au niveau des produits***

L'intégration des exigences environnementales dans les politiques et actions communautaires a été mise en place par le traité d'Amsterdam de 1997. Ainsi, de nombreux textes européens paraissent avec pour objectif essentiel la mise en place des principes du développement durable dans les politiques européennes. Par conséquent, l'Union Européenne a instauré une stratégie ayant pour finalité d'atteindre des résultats concrets dans divers secteurs, particulièrement impactant sur l'environnement.

Concernant les équipements électriques et électroniques, trois directives européennes permettent de couvrir l'ensemble du cycle de vie des produits depuis la fabrication jusqu'à son élimination : la directive EuP (« Energy Using Products »); la directive RoHS (« Restriction of Hazardous Substances ») et la directive DEEE. Les principaux textes sont référencés dans le Tableau 3.

- La directive EuP n°2009/125/CE du Parlement Européen et du Conseil [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2009] concerne l'établissement d'un cadre pour la fixation d'exigences en termes d'éco-conception pour les produits consommateurs d'énergie. Cette **directive EuP** (ou « éco-conception ») a pour objectif principal d'améliorer l'efficacité énergétique de ces

produits tout au long de leur cycle de vie. Cependant, la directive ne couvre pas seulement la consommation d'énergie des produits, elle cherche à établir un cadre cohérent pour l'application des exigences communautaires en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie en vue d'assurer la libre circulation des produits qui sont conformes auxdites exigences, et d'améliorer leur impact global sur l'environnement. La directive vise à harmoniser le marché européen unique de l'énergie en utilisant des produits à cette fin. Pour cela, plusieurs objectifs sont posés comme la mise en place d'un étiquetage des équipements, d'une harmonisation des diverses réglementations nationales pour obtenir une homogénéité au sein de l'Union Européenne ou encore la disponibilité des documents techniques (processus de fabrication, rapports d'essai) et les exigences posées par la directive.

- La **directive RoHS** de 2003 relative à la Limitation des Substances Dangereuses [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2003] a été révisée en juin 2011 [Parlement et Conseil Européen, 2003b], [Parlement et Conseil Européen , 2003a]. Elle impose, lors de la fabrication des EEE, la substitution de certains retardateurs de flamme tels que les PBB (biphényles polybromés) et les PBDE (diphényléthers polybromés) ainsi que de plusieurs métaux comme le mercure, le cadmium, le plomb ou le chrome hexavalent. Sur ces métaux, la teneur maximale acceptée est de 0,1% et de 0,01% pour le Cadmium. Ces changements peuvent avoir de fortes conséquences sur les industries par la modification de processus de fabrication et par conséquent d'outils et de machines de production.
- La directive 2002/96/CE (dite « **directive DEEE** ») du 27 janvier 2003 [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2003] concerne les mesures spécifiques dont les déchets d'équipements électriques et électroniques doivent faire l'objet. Au-delà d'un objectif de collecte fixé à 4 kg de DEEE par personne et par an, cette directive pose les principes du droit de l'environnement reconnus en droit communautaire et en droit national [Flipo et al., 2007] et établit les définitions des EEE et des DEEE ainsi que les catégories des équipements. Enfin, ce texte contient des prescriptions techniques concernant les opérations de traitement notamment au sujet de l'obligation d'extraire certains composants présentant des risques pour l'environnement pour les diriger vers des filières adaptées [Parlement et Conseil Européen, 2003b].

Ces trois directives, complémentaires les unes des autres sont complétées par des décisions et règlements qui viennent conforter les principaux objectifs en donnant un cadre volontaire de reconnaissance aux produits respectant certains critères. Ainsi, le règlement (CE) n°1980/2000 révisé l'attribution du label écologique par l'intermédiaire de plusieurs décisions présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Décisions précisant les critères d'attribution du label écologique européen

Décisions	Produits concernés
Décision de la Commission du 9 juin 2011 (JOUE L151 du 10 juin 2011)	Ordinateurs personnels
Décision 2011/330/UE de la Commission du 6 juin 2011 (JOUE L 148 du 7 juin 2011)	Ordinateurs portables
Décision 2011/333/UE de la Commission du 7 juin 2011 (JOUE L 149 du 8 juin 2011)	Papier à copier Papier graphique

Pour conclure, le règlement (CE) n°106/2008 du parlement européen et du conseil du 15 janvier 2008 a permis l'élaboration d'un programme communautaire d'étiquetage relatif à l'efficacité énergétique des équipements de bureau [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2008].

- ***Au niveau des organisations utilisatrices d'EEE***

En 2003, la Stratégie Nationale Développement Durable (SNDD) met en avant la nécessité pour l'Etat de devenir exemplaire en fixant des objectifs concrets et quantifiables en matière d'éco-responsabilité dans tous les domaines environnementaux et définit des indicateurs de suivi [Délégation interministérielle au développement durable, 2007]. Ce document révisé en 2006 a fait l'objet d'une circulaire du Premier ministre (n° 5351/SG) du 3 décembre 2008 nommée « l'exemplarité de l'Etat au regard du développement durable dans le fonctionnement de ses services et de ses établissements publics » [Délégation interministérielle au développement durable, 2010]. Toujours dans cette optique d'exemplarité, le code des marchés publics de 2006 intègre explicitement le développement durable en mentionnant des objectifs de développement durable incontournables dans les conditions d'exécution des marchés. Ce texte sera renforcé en 2007 par le Plan National d'Action pour les achats publics durables qui fixe des objectifs en termes de commande publique durable et présente les outils disponibles pour les acheteurs publics.

En complément de soucis d'exemplarité, le décret n°2011-193 du 21 février 2011 portant sur la création d'une direction interministérielle des systèmes d'information et de communication de l'Etat a été publié. Il a pour objectif d'assurer la cohérence des travaux des différentes directions des systèmes d'information (DSI) des diverses administrations et établissements publics d'Etat mais aussi la mise en œuvre de mutualisations de divers services. Cette structure permettra d'avoir une représentation de l'Etat dans les organisations internationales, par exemple pour les groupes de travail relatifs à la normalisation.

L'ensemble des directives européennes relatives aux EEE et présentées dans le Tableau 3 ont été transposées en droit français pour leurs applications sur le territoire national. La mise en œuvre de ces filières de recyclage et de valorisation constitue un des objectifs des décrets d'application de la directive DEEE et de la loi Grenelle. En effet, des objectifs de gestion et de réduction des déchets ont été fixés dès 2009 avec la parution de la loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (dite « loi Grenelle 1 ») puis confortés en 2010 avec la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 (« loi Grenelle 2 ») qui en précise les mesures d'application. En favorisant ces filières, l'objectif principal est de limiter le traitement des installations de stockage et d'incinération à 60 % des déchets produits. Un autre objectif concernant les déchets est de diminuer de 15 % les quantités de déchets destinées à l'enfouissement ou à l'incinération et de réduire la production d'ordures ménagères de 7% sur les années à venir. Ces textes sont complétés par l'ensemble des textes réglementaires français regroupés au sein du code de l'Environnement [Code de l'environnement, 2010].

Les textes réglementaires au départ très généraux (ex : équipements électriques) se précisent et tiennent alors compte des différentes phases de vie de l'équipement considéré (ex : fin de vie avec les DEEE). Dans le paragraphe suivant, les enjeux relatifs à ces différentes étapes du cycle de vie des équipements informatiques sont explicités.

Tableau 3: Listes des principaux textes européens et français relatifs aux équipements informatiques en fonction de l'étape du cycle de vie

Phase du cycle de vie	Europe	France
Conception	- Directive 2005/32/CE du Parlement Européen et du Conseil concerne l'établissement d'un cadre pour la fixation d'exigences en termes d'éco-conception pour les produits consommateurs d'énergie dite « Directive EuP »	Texte non transposé en droit français car les règlements européens portant application de cette directive sont applicables directement en droit français
	- Règlement européen (CE) no 1275/2008 du 17 décembre 2008 portant application de la directive 2005/32/CE en ce qui concerne les exigences d'éco-conception relatives à la consommation d'électricité en mode veille et en mode arrêt des équipements ménagers et de bureau électriques et électroniques	Textes de portée générale s'appliquant directement et intégralement dans tous les Etats membres
	- Règlement européen (CE) no 278/2009 du 6 avril 2009 portant application de la directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les exigences d'éco-conception relatives à la consommation d'électricité hors charge et au rendement moyen en mode actif des sources d'alimentation externes	
	- Directive RoHS relative à la Limitation des Substances Dangereuses JOUE du 13 février 2003	- Décret n°2005-829 du 20 juillet 2005 codifié aux articles art R.543-172 à R.543-206 du Code de l'environnement. Transposition de la directive RoHS en droit français
	- Directive 2008/103/CE du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive 2006/66/CE relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs, en ce qui concerne la mise sur le marché des piles et des accumulateurs dite « Directive batteries » JOUE n°327 du 5 décembre 2008	- Arrêté du 9 novembre 2009 relatif au transit, au regroupement, au tri et au traitement des piles et accumulateurs usagés prévus à l'article R. 543-131 du chapitre III du titre IV du livre V de la partie réglementaire du code de l'environnement - Arrêté du 18 novembre 2009 fixant les cas et conditions dans lesquels les obligations relatives au taux de cadmium dans les piles et accumulateurs portables ne s'appliquent pas, en application de l'article R. 543-126 du chapitre III du titre IV du livre V de la partie réglementaire du code de l'environnement - Arrêté du 18 novembre 2009 relatif à la procédure d'enregistrement et de déclaration au registre national pour les piles et accumulateurs prévu à l'article R. 543-132 du code de l'environnement.
- Règlement n°1907 / 2006 du 18 décembre 2006 dit REACH (enRegistrement, Evaluation et Autorisation des substances CHimiques)	Textes de portée générale s'appliquant directement et intégralement dans tous les Etats membres	
- Règlement EC/106/2008 relatif à l'étiquetage des équipements de bureau		
Extraction		- Réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)
Production	- Directive IED 2010/75/UE du parlement européen et du conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution)	- Loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)
Utilisation	- La directive 2006/32/CE relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales - La directive 92/75/CEE concernant l'indication de la consommation en énergie des appareils domestiques par voie d'étiquetage	- Stratégie nationale Développement durable (SNDD) dès 2003 - Code des marchés publics de 2006 - Plan national d'action pour les achats publics durables en 2007 - Circulaire du Premier ministre n° 5351/SG du 3 décembre 2008 relative à « l'exemplarité de l'Etat au regard du développement durable dans le fonctionnement de ses services et de ses établissements publics » - Décret n° 2011-193 du 21 février 2011 portant création d'une direction interministérielle des systèmes d'information et de communication de l'Etat
Fin de vie	- Directive 2002/96/CE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), en ce qui concerne les compétences d'exécution conférées à la Commission. Texte modifié par la directive 2008/34/CE du 11 mars 2008.	- Décret n°2005-829 du 20 juillet 2005 codifié aux articles art R.543-172 à R.543-206 du Code de l'environnement (Partie réglementaire Livre V Titre IV). Transposition de la directive DEEE en droit français
	- Directive 2008/103/CE du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive 2006/66/CE relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs, en ce qui concerne la mise sur le marché des piles et des accumulateurs dite « Directive batteries » JOUE n°327 du 5 décembre 2008	- Décret n° 2009-1139 du 22 septembre 2009 relatif à la mise sur le marché des piles et accumulateurs et à l'élimination des piles et accumulateurs usagés et modifiant le code de l'environnement (dispositions réglementaires)

1.1.3 Des enjeux environnementaux différents selon les étapes du cycle de vie des EEE

Afin de comprendre les enjeux relatifs aux équipements électriques et électroniques, nous nous attarderons sur les quatre étapes de leur cycle de vie : la phase d'extraction des matières premières, la phase de production, la phase d'usage et la phase de fin de vie.

- **Phase d'extraction des matériaux constitutifs**

La production des équipements informatiques est très consommatrice de ressources naturelles. Une étude parue en 2003 estime que pour fabriquer un ordinateur sont nécessaires [Ruediger et Williams, 2003] :

- 240 kg de combustibles ;
- 22 kg de produits chimiques et
- 1 500 litres d'eau.

Pour obtenir un ordinateur, un rapport massique (produit fini/intrants) de 1/10 est nécessaire (c'est-à-dire que pour 1 kg de produit fini, 10 kg d'intrants ont été nécessaires en amont dans le processus de fabrication) alors que dans les industries traditionnelles telles que l'industrie aéronautique ou automobile, un rapport de 1/3 est déjà considéré comme élevé pour des chaînes de production mondialisées [Corne et al., 2009].

Les équipements des technologies de l'information sont fabriqués partout dans le monde. Ainsi, il n'existe pas de différence significative de leur contenu matériel suivant les pays de production.

En revanche, la présence de chacun des matériaux est dépendante de sa fonction dans les composants. Les matériaux constitutifs sont principalement [ADEME Alsace, 2007] :

- des **métaux ferreux** : le fer et les différents alliages à base de fer sont utilisés pour des applications où une bonne résistance électrique est demandée, ce qui est le cas dans plusieurs composants des équipements électroniques.
- des **métaux non ferreux** (cuivre, plomb) : le cuivre et les alliages de cuivre permettent une bonne conductivité électrique et thermique, une grande ductilité et une bonne résistance à la corrosion [ADEME, 2011a]. Ainsi, ces métaux composent les fils électriques des équipements. Il en va de même pour le plomb dont la résistance à la corrosion le fait utiliser dans les EEE au contact des acides dans les batteries [Brignon, 2005]. De plus, la densité élevée du plomb lui permet d'être une protection efficace contre les radiations ou le bruit [Tukker et al., 2001].
- des **métaux rares** (lithium, indium, or,...) : le lithium constitue actuellement l'élément indispensable pour tous les équipements électriques et électroniques mobiles en permettant aux batteries rechargeables d'être à la fois efficaces et légères ; l'indium est tout aussi important pour ses propriétés conductrices largement utilisées dans plusieurs éléments comme les écrans où il est intéressant pour son adhérence au verre et sa transparence en couche mince [Goudet, 2007] ; l'or est utilisé dans les EEE pour ses propriétés de conductivité et anticorrosives. De part son inaltérabilité et sa grande ductibilité, l'or est employé pour la confection de connexions dans les EEE.

L'utilisation des métaux rares est grandissante dans les TIC (Technologies de l'Information et de la Communication), les technologies vertes et les applications militaires. Leur intérêt réside dans l'exploitation de leurs propriétés [Drezet, 2011a], [Drezet, 2011b] :

- *optiques* : coloration (verre, céramique), télévision couleur, éclairage fluorescent, radiographie médicale
 - *chimiques* et *structurales* : cracking du pétrole (50% des oxydes de lanthanides produits aux USA sont utilisés à cet usage), pots catalytiques (réduction des NOX)
 - *mécaniques* : la dureté des terres rares associée à une réaction chimique facilite le polissage du verre
 - *magnétiques* : utilisées dans un alliage avec d'autres métaux, les terres rares permettent d'obtenir des aimants miniatures très puissants (éoliennes, téléphonie, électroménager)
- du **silicium** : De part ses propriétés semi-conductrices, le silicium constitue un des éléments incontournables pour la fabrication des microprocesseurs. En fonction des substances avec lesquelles il est combiné dans ledit processeur, il est soit conducteur, soit isolant et porte ainsi les signaux 0 et 1, qui constituent la base du code binaire.
Le silicium est le principal constituant du sable, du quartz, des roches et de la terre glaise. Il représente environ un quart de la croûte terrestre [Gallimard, 2004], ce qui en fait le deuxième élément chimique le plus courant sur la planète après l'oxygène. Cependant, cette ressource n'est pas illimitée pour autant. Le silicium utilisé habituellement, encore appelé silicium métallurgique, est pur à 98 % et très bon marché à produire pour des applications telles que la fabrication du verre, du bronze, des laques, des vernis ou de la porcelaine. Pour les équipements électroniques, le silicium doit atteindre un niveau de pureté d'au moins 99,9 %, ce qui nécessite un processus de production onéreux ainsi qu'un personnel qualifié et d'importantes consommations d'énergie. Peu d'entreprises mondiales produisent ce silicium extrêmement pur engendrant des difficultés d'approvisionnement.
 - des **matériaux inertes** comme le verre, le bois ou le béton sont présents en faible quantité et servent principalement d'isolants pour les différents composants ;
 - des **plastiques**, contenant ou non des retardateurs de flamme halogénés utilisés principalement pour les coques et boîtiers divers des équipements.
 - des **composants spécifiques** : comme les chlorofluorocarbures (CFC) utilisés lors de la fabrication des circuits électroniques ayant comme propriété principale le fait d'être ininflammables.

De plus, la provenance des différentes matières premières constitue un enjeu mondial important car ces dernières nécessitent souvent de longues phases de transport pour être acheminées jusqu'au lieu de production. La Figure 6 illustre la répartition mondiale des principales sources de matières premières utilisées pour un ordinateur et schématise les transports réalisés. Même si le cas présenté ne tient pas compte de l'ensemble des matières premières nécessaires, il illustre le contexte mondial de cette problématique.

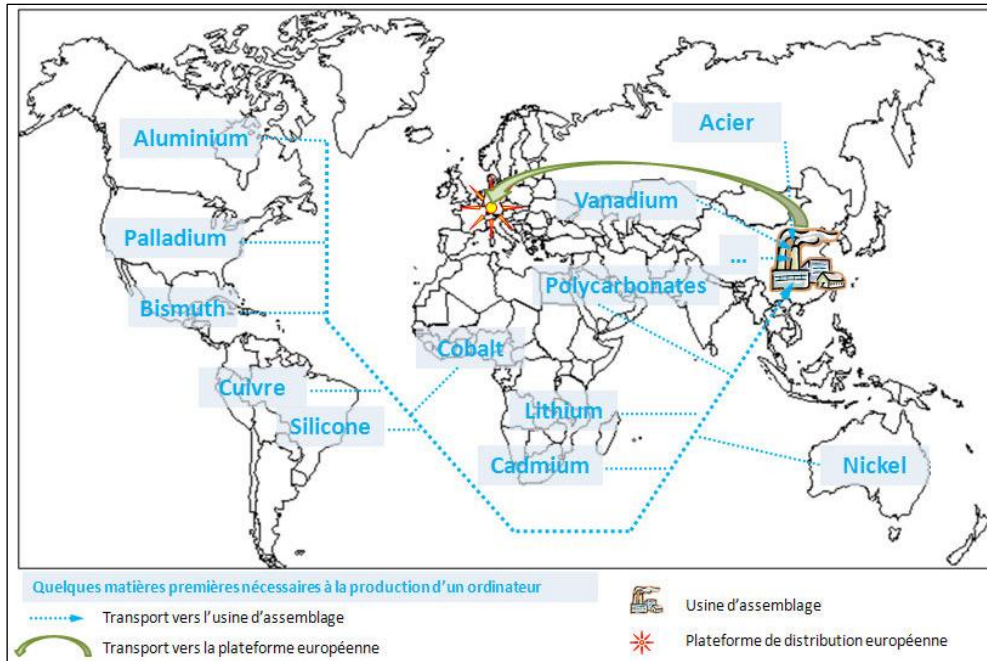


Figure 6: Illustration de l'enjeu planétaire de l'extraction des matières premières, l'assemblage et la distribution d'un ordinateur (d'après [Ruediger et Williams, 2003])

Ce thème est particulièrement présent dans la littérature, notamment en Chine où des mines de tailles inégales sont réparties sur le territoire [He et al., 2010] comme les sites de Bayan Obo ou de Sichuan et leurs exploitations ne sont pas sans conséquences pour l'environnement [Schüler et al., 2011]. L'extraction, la séparation et le raffinage des terres rares se réalisent en plusieurs étapes ayant des impacts sur l'environnement liés en grande majorité aux produits chimiques employés [Drezet, 2011a]. De plus, les unités de protection de l'environnement sont rares sur ces installations de production, engendrant d'importants rejets gazeux, d'eaux usées et de déchets solides toxiques [Drezet, 2011a]. Parmi les impacts liés à ces exploitations, nous citerons :

- la **phase de broyage** du minerai pendant laquelle une importante quantité de poussières contenant du thorium est émise. L'exposition à ces poussières augmente le risque de décès liés au cancer du poumon [Chen et al., 2004]
- l'**extraction** par lixiviation : forages dans lesquels des acides (tels que l'acide chlorhydrique ou l'acide sulfurique) sont injectés pour dissoudre le minerai. La récupération de la solution puis son traitement permettent alors d'extraire les terres rares présentes mais produisent des effluents et des déchets solides contenant des fluorures et du thorium. Cette technique n'est pas contrôlable hydro-géologiquement et contamine les sols et les nappes phréatiques [Ministry of Environmental Protection, 2009]
- les **étangs de stockage** des déchets génèrent une pollution des nappes phréatiques dont l'eau est utilisée par les populations voisines pour l'agriculture et l'alimentation [Buckley, 2010].

Enfin, les enjeux liés à la composition de ces équipements résultent de la rareté de certains composants constitués de métaux rares (voir partie 3 de ce même chapitre) dont les ressources sont disséminées à la surface de la planète.

Les matériaux nécessaires à la composition des équipements ont fait l'objet d'un rapport par l'Union Européenne [European Commission, 2010], ce dernier a été repris et analysé par le groupe de travail Ecoinfo du CNRS et fait l'objet d'une synthèse disponible sur le site internet [www.ecoinfo.cnrs.fr]. Le Tableau 4 issu de cette synthèse présente les 14 matières premières considérées comme critiques en termes de ressources pour l'UE. Aujourd'hui, ces matériaux sont utilisés dans de nombreux domaines d'application.

Tableau 4: Liste des 14 matières premières critiques pour l'UE (par ordre alphabétique) [Drezet, 2010]

Éléments	Applications dans les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)	Autres applications
Antimoine	Micro condensateurs,retardateurs de flamme,écrans CRT	Médecine
Beryllium	Transistors haute puissance	Rayons X, mécanique, magnétisme, nucléaire, acoustique
Cobalt	Batteries Lithium-ion	Alliages (aimants permanents), catalyse
Fluorite	Outils d'exposition	Métallurgie, microscopie, optique
Gallium	Circuits intégrés	Stockage, d'énergie, bio-médical
Germanium	Infrarouge militaire	Optique
Graphite	Évacuation de la chaleur (écrans, ordinateurs et téléphones portables)	Métallurgie
Indium	Écrans (ITO), semi-conducteurs, soudure sans plomb	Métallurgie
Magnésium	-	Métallurgie
MGP ^a : métaux du groupe du platine :		
- Platine	Disques durs, fils thermocouples, piles à combustible	Catalyse
- Palladium	Condensateurs	Catalyse
Néodyme	Technologie laser	Aimants permanents
Niobium	Micro condensateurs	Alliages métalliques
Tantale	Micro condensateurs	Alliages métalliques
Tungstène	Circuits intégrés (connexion)	Métallurgie, catalyse,...

Afin de pallier à la raréfaction de la ressource et à la problématique de l'éloignement entre site d'extraction et de production, les recherches actuelles portent sur la possibilité de remplacer ces ressources [Abadie, 2011] ou de mettre en place des filières de récupération, de valorisation des équipements en fin de vie [ADEME Alsace, 2007] pour récupérer ces éléments dans les équipements avant qu'ils ne soient détruits.

- **Phase de fabrication**

S'il est complexe d'avoir des informations précises concernant la composition des équipements informatiques (Tableau 5), il peut s'avérer plus difficile encore d'obtenir des informations sur les procédés de fabrication. Ceci est dû à plusieurs facteurs. Le premier étant que le secteur informatique est fortement confidentiel et concurrentiel. En effet, la compétitivité est inhérente à ce secteur industriel. Pour croître et proposer des produits ou services de manière compétitive, les sociétés choisissent souvent de conserver leurs secrets de fabrication [Erkman, 1998]. Cette course pour gagner sans cesse plus de parts de marché engendre un manque de transparence pour l'utilisateur qui n'a plus accès aux différentes données relatives au produit [Campbell-Kelly et Aspray, 2004]. Le second élément, ayant pour conséquence la difficulté à obtenir des informations relatives aux procédés de fabrication et aux composants des équipements informatiques, réside dans la multiplicité des sous-traitants dans le secteur. Une étude parue en 2008 estime que dans le secteur informatique, le niveau de sous-traitance moyen est de 12 alors que dans la majorité des autres

secteurs, atteindre 5 niveaux est déjà considéré comme exceptionnel (la moyenne se situant à trois niveaux) [Drezet, 2010].

La quantité de matières dangereuses et toxiques pour la santé et l'environnement, dans les composants, est importante : plomb, cadmium, mercure, chrome, ... comme l'a présenté la phase d'extraction. Le Tableau 5 mentionne les produits chimiques présents dans les composants et les raisons de leur utilisation [Greenpeace, 2005]. Ces composants étant désormais réglementés [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2003], seules d'infimes quantités subsistent.

Tableau 5: Liste des produits chimiques présents dans les équipements [Source: [Greenpeace, 2005] cité dans [Flipo et al., 2007]]

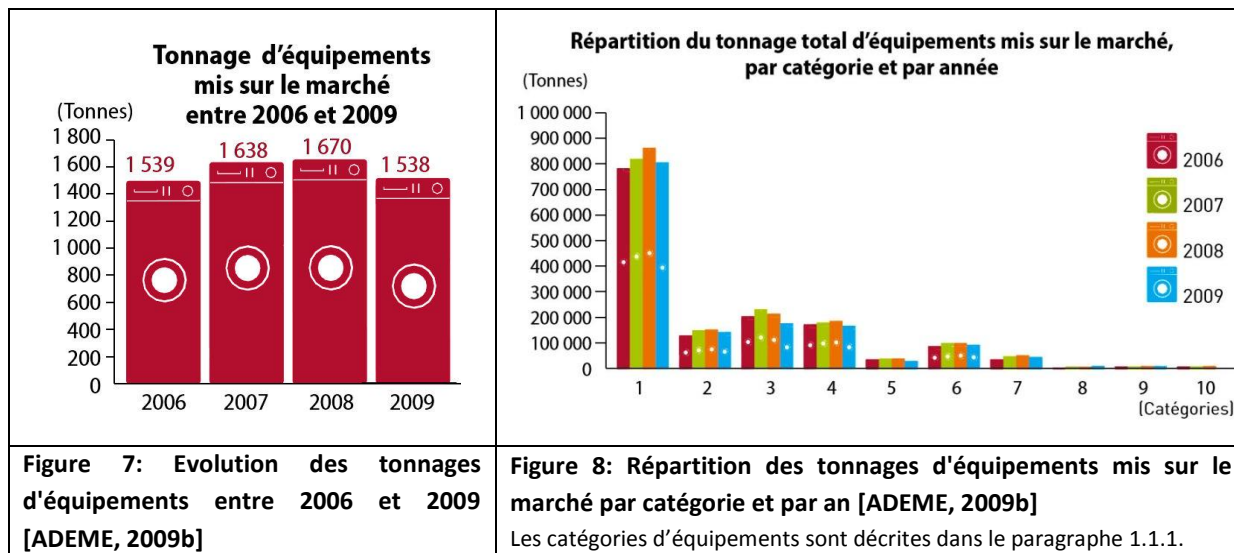
Substances	Applications
Plomb	Soudures Revêtement des pattes de composants Peintures utilisées comme pigments et agents desséchants PVC utilisé comme stabilisant Piles et batteries
Cadmium	Revêtements déposés par électrolyse Soudures spéciales (dans certains types de fusibles par exemple) Contacts électriques, relais, commutateurs Stabilisant PVC Pigments à base de plastique, verre et céramique Certaines matières à base de verre et de céramique
Mercure	Lampes, capteurs, relais
Chrome hexavalent	Revêtements passivés sur métaux, dans les peintures anticorrosion
PBB (diphényle polybromé) et PBDE (éther diphényle polybromé)	Ignifuges dans les matières plastiques

L'évaluation des performances des entreprises passent notamment par l'évaluation des coûts réels de leurs produits ou services en termes financiers mais également en termes d'impacts sur l'environnement [Grisel et Osset, 2004]. Ces dernières, généralement des analyses du cycle de vie sont réalisées par des scientifiques ou des sociétés privées mais il est rare que les résultats sortent de ce réseau et soient communiqués au grand public. Les données alors disponibles dans le domaine public sont souvent rares et anciennes.

Néanmoins, dans les études parues, les principales conclusions insistent sur l'ampleur des substances utilisées pour réaliser un composé. Ainsi, il ne faut pas sous-estimer les impacts liés aux conditions de fabrication des équipements et notamment la gestion de la pollution générée dans les pays producteurs [Chen et al., 2004] [Dinglong Li et al., 2010] [Hao Cai, 2011]. En effet, la majorité des impacts se produisent lors de la phase de fabrication et non durant la phase d'utilisation. La littérature montre la répartition des impacts avec 80% pour la phase de fabrication et 20% pour la phase d'utilisation [Flipo et al., 2007] [Ruediger et Williams, 2003].

L'ampleur de l'impact de cette phase de production peut être évaluée via les quantités d'équipements mises sur le marché. Ainsi, en 2009, l'ADEME estime à 1,54 millions de tonnes le poids des équipements mis sur le marché en France. Même si ce tonnage est en diminution de près de 8,5 % par rapport à 2008 il est relativement conséquent [ADEME, 2009b]. C'est la première fois que depuis la création du registre des DEEE, les quantités déclarées diminuent (Figure 7).

Initialement attribuée à la crise économique que traversent les marchés, d'autres explications peuvent être avancées tel : le développement depuis quelques années des écrans plats remplaçant les écrans cathodiques plus lourds (dits CRT), la multifonctionnalité des équipements ou encore leur miniaturisation. La Figure 8 révèle que cette diminution de tonnage est homogène quelle que soit la catégorie concernée (chaque catégorie diminuant dans les mêmes proportions).



- **Phase d'usage**

Un des enjeux majeurs de la phase d'usage est lié à la consommation électrique des équipements. De nombreuses études paraissent sur la consommation énergétique liée à la phase d'usage des équipements [Souchon Foll et al., 2007] [Cremer et al., 2003]. Cette consommation par équipement en phase d'utilisation a été divisée par 5 entre 1996 et 2001 et une consommation en veille divisée par 2 [Cremer et al., 2003]. Si ces évolutions technologiques ont des répercussions importantes au niveau environnemental, il ne faut pas perdre de vue que l'objectif premier était d'augmenter la durée d'autonomie des équipements, critère commercial non négligeable concernant la mobilité. Cependant, avec le temps, les usages se multiplient, de même que les capacités de stockage ou encore les puissances des processeurs, entraînant une augmentation de la consommation électrique par équipement. Ce phénomène est accentué par leur nombre également en constante augmentation [Berkhout et Jertin, 2001] de manière générale ainsi qu'au sein de chaque foyer [ADEME, 2009b]. « *Les gains de consommation sont en grande partie compensés par la multiplicité des équipements et l'augmentation de tailles des écrans* » [Flipo et al., 2007]. Dans un article de 2007 intitulé « *TV : Les écrans plats anéantissent 15 ans d'efficacité énergétique* », l'analyse de M. Layet se conclut par le fait que « *les plus petits écrans sont retirés du commerce* » faute de clientèle pour cette catégorie d'équipements [Layet, 2007]. Cette conclusion est transposable aux écrans informatiques, ces derniers ayant subi le même engouement et une rapide augmentation de leur dimension [Hewlett Packard, 2010] engendrant une consommation électrique plus importante. En effet, l'étude REMODECE (menée conjointement par l'ADEME, l'Union Européenne et EDF en 2008) rappelle que la consommation électrique d'un écran augmente proportionnellement au carré de sa diagonale [Enertech, 2008]. La même étude indique qu'un téléviseur ordinaire consomme en moyenne 160 kWh/an alors que pour un écran LCD ou plasma, cette même consommation peut aller jusqu'à 650 kWh/an [Enertech, 2008].

Néanmoins, l'estimation de la part de la consommation énergétique à attribuer à la consommation des équipements électroniques reste un débat. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur la question en estimant tour à tour la consommation des TIC par rapport à la consommation totale d'électricité d'un pays (3% aux USA d'après [Laitner, 2002]), la consommation d'internet par rapport à la consommation totale électrique d'un pays (13% aux USA d'après [Mills et Huber, 1999]) ou encore la consommation d'une catégorie d'équipement à l'échelle d'un pays (en Allemagne, les mobiles représenteraient 0,4 TWh d'après [Schafer et Weber, 2003]). Cette dernière indiquant même que la consommation des équipements de télécommunication représentait à eux-seuls 0,7 % de la consommation électrique totale du pays en 1996 soit 3,1 TWh (consommation équivalente à la consommation électrique estimée pour internet la même année (1996) [Schafer et Weber, 2003]).

Mais la difficulté pour déterminer la part des équipements informatiques dans les consommations électriques des foyers résulte du fait qu'il est nécessaire de croiser les informations issues d'études énergétiques avec des études sociologiques de comportements en termes d'usage des équipements [Souchon Foll, 2008].

Cependant, l'arrivée des compteurs intelligents encouragera probablement un suivi plus régulier des consommations électriques au sein d'un foyer [Parlement Européen, 2010].

- **Phase de fin de vie : DEEE**

Un équipement électrique et électronique peut être jeté pour différentes raisons [Flipo et al., 2007] :

- l'équipement ne fonctionne plus : il est considéré comme hors d'usage ;
- l'équipement est réparable mais les conditions de réparation sont dissuasives (prix trop élevé, achat par correspondance, réparateur non coopératif) ;
- seule une partie de l'équipement est hors d'usage engendrant la mise au rebut d'un équipement complet ;
- l'équipement fonctionne mais est considéré comme obsolète. Il est donc remplacé par un équipement plus récent. En effet, un utilisateur renouvelant son équipement chaque année va se débarrasser d'un équipement en état de fonctionnement, et augmenter la quantité de DEEE. Les utilisateurs étant en majorité à la recherche des dernières nouveautés technologiques, la durée de vie des équipements se raccourcit de même que les services proposés par les nouvelles versions des équipements. Ce fut le cas dernièrement avec l'arrivée de l'iPhone 4 dont 70% des acquéreurs possédaient la version 3 de ce même équipement [Bordage, 2009].

A la vue de la composition des équipements informatiques, le recyclage est avant tout un axe non négligeable concernant la protection de la santé publique. En effet, les matières dangereuses intégrées dans les équipements sont une source de pollution non négligeable pour les sols et les nappes phréatiques si ces équipements sont éliminés en centres d'enfouissement techniques en l'état. Au niveau mondial, ce sont près de 100 millions de tonnes de déchets toxiques qui seraient produits par an [Flipo et al., 2007]. Ces tonnages impressionnants incitent à développer le recyclage de ces équipements, mais l'objectif principal réside dans la réduction de la pollution générée par une mauvaise gestion de leur fin de vie.

Les impacts de ces substances sur la santé [Ko et Osei-Bryson, 2004] et l'environnement sont d'autant plus importants que les conditions de démantèlement des équipements ne sont pas toujours respectées. En effet, de nombreuses quantités de déchets toxiques sont traitées dans des conditions difficiles dans des pays d'Afrique ou d'Asie. L'envoi des DEEE dans ces pays pose de

nombreuses questions sur les conditions dans lesquelles le démantèlement est réalisé tant sur le plan environnemental que concernant la santé humaine avec des conditions de travail souvent peu respectueuses des droits humains [Overeem, 2009] [Electronics Take Back Coalition, 2010].

En 2008, 80% des EEE finissaient incinérés ou enterrés [Bensebaa et Boudier, 2008]. De plus, constitués de métaux rares, les EEE trouvent désormais échos auprès des industriels qui voient en eux une source de revenus non négligeable. Les différentes filières de traitement existantes et leur dénomination dans la réglementation française et européenne sont décrites dans le Tableau 6.

Tableau 6: Filières de traitement des DEEE [ADEME, 2009b]

Intitulé selon la réglementation française	Intitulé selon la réglementation européenne	Type de traitement
Réemploi	Réutilisation	Réutilisation de l'équipement entier
Réutilisation en pièces	Réutilisation de composants	Réutilisation de pièces ou sous-ensembles de l'équipement
Recyclage	Recyclage	Recyclage-matière
Valorisation énergétique	Récupération d'énergie	Valorisation énergétique
Destruction	Élimination	Élimination sans valorisation (mise en décharge, incinération sans récupération d'énergie)

Ainsi, le recyclage n'est pas le seul mode de gestion de ces équipements, le réemploi peut s'avérer adapté pour permettre la transmission des équipements à une population où les besoins sont importants et encore peu couverts faute de moyens financiers. Malheureusement encore peu appliquée, cette méthode évolue aujourd'hui, notamment avec l'activité d'associations (telles que la fédération ENVIE, par exemple, qui regroupe des associations d'insertion créées dans les années 1980 dont le métier historique est la rénovation et la vente d'appareils électroménagers à petits prix) et le recours à la technologie des clients légers pour l'installation de salles informatiques à moindres coûts [ADEME, 2011b]. Lors du réemploi d'une partie des composants uniquement, la filière de retraitement est appelée la réutilisation en pièces. Cette dernière permet également de former de nouveaux équipements à partir d'éléments de divers équipements hors d'usage. Cette méthode constitue ainsi une technique de fabrication à moindres coûts financiers et environnementaux [ADEME, 2011b].

L'existence des différentes filières de traitement est un point positif quant au devenir des EEE en fin de vie, mais de nombreux problèmes subsistent notamment pour la collecte et le tri des équipements ainsi récupérés. En effet, le tri doit être réalisé de manière adéquate et correctement car « *les moyens techniques de séparation des matières ont des possibilités limitées* » [Flipo et al., 2007]. De même, d'un point de vue économique, si les matériaux valorisables sont mis en mélange avec des matériaux non valorisables où à faible rendement de valorisation, ils ne sont plus récupérables. Ce dernier point engendrant alors une diminution du rendement de valorisation et donc une perte financière non négligeable.

Ainsi, la collecte doit être sélective et ce d'autant plus que dans le cadre des EEE, la provenance des équipements doit être signalée, impliquant une dissociation des collectes de biens domestiques et professionnels. Ceci résulte de la transcription de la directive européenne DEEE en droit français par application du décret français du 22 juillet 2005. Ce dernier fait la distinction entre les déchets d'origines professionnelles et domestiques conduisant à deux filières de traitement. Dans le cas de la filière domestique, les consommateurs ont désormais la possibilité de rendre leurs équipements au distributeur lors de l'achat d'un nouveau matériel ou de le déposer dans les espaces de collectes

prévu à cet effet. Pour ce qui est de la filière professionnelle, les producteurs doivent adhérer à un éco-organisme agréé, mettre en place un système individuel de traitement ou encore déléguer à l'utilisateur final la gestion de la fin de vie de l'équipement [Journal Officiel de la République Française, 2005].

Il est aujourd'hui nécessaire de réaliser des études sur les rendements et les objectifs de la mise en place des différentes filières afin d'établir si, tant sur le plan environnemental qu'économique, il est préférable de développer des filières de réutilisation ou de reconditionnement. Plusieurs questions se posent encore : à partir de quand un équipement ne doit pas être réparé mais servir de sources de pièces détachées pour une réutilisation en pièces ? Dans la même optique, des questions ont été soulevées lors de la mise en place du décret 2005-829 concernant le recyclage ou la valorisation, faut-il encourager la récupération des substances présentes dans les équipements ou favoriser la production énergétique par un système de valorisation [Priou, 2007] [Flipo et al., 2007] ?

1.2 ...à la naissance du « Green IT »

1.2.1 Origine, définitions et objectifs

Au Sommet de la Terre de Rio (novembre 1992), Maurice Strong (secrétaire du sommet) déclarait que la « *nouvelle révolution industrielle serait fondée sur l'intégration complète de l'environnement à notre vie économique. Elle comporterait donc la refonte de l'ensemble de notre système industriel, refonte réussie sur les plans environnemental et économique grâce à l'utilisation efficace des matières premières et de l'énergie, et au recyclage et à l'élimination rationnelle des déchets.* » [Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1992].

Dans le secteur informatique, la préoccupation de l'environnement est apparue sous les termes anglais Green IT ou Green computing qui se traduit en français par « informatique éco-responsable ». Elle a pour objectif d'intégrer le triptyque (environnement, économie, social) du développement durable dans les équipements informatiques et plus généralement dans les technologies de l'information et de la communication. Elle intègre toutes les phases du cycle de vie, depuis la fabrication jusqu'à la fin de vie en passant par la phase d'utilisation ; chacune de ces étapes ayant des préoccupations spécifiques vis-à-vis de l'environnement. Il s'agit notamment de réduire les consommations en énergie ou de diminuer l'utilisation de produits polluants. En pratique, le Green IT se focalise essentiellement sur l'efficacité énergétique des équipements avec de nombreux efforts sur la réduction des consommations électriques. Les enjeux principaux étant liés aux consommations électriques importantes. Au niveau mondial, le secteur informatique est responsable d'environ 2% des émissions des gaz à effet de serre (GES) [Gartner, 2007].

Les « éco-techniques de l'information et de la communication » (éco-TIC) ont été définies au journal officiel de la république française du 12 juillet 2009 comme « *des techniques de l'information et de la communication dont la conception ou l'emploi permettent de réduire les effets négatifs de l'activité humaine sur l'environnement* ». Ce texte précise que « *la réduction des effets négatifs de l'activité humaine sur l'environnement tient à la diminution de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre qui résulte du recours aux éco-techniques ou à la conception même de ces techniques, qui s'attache à diminuer les agressions qu'elles pourraient faire subir à l'environnement au cours de leur cycle de vie* » [Journal Officiel de la République Française, 2009a]. Egalement définie comme une tendance industrielle visant à tenir compte des contraintes et coûts en énergie des

matériels informatiques, de nombreuses recherches sont menées sur le sujet de l'informatique éco-responsable [Dao et al., 2011] [Jenkin et al., 2011].

Même si l'apparition de ce concept dans la législation française est très récente, l'informatique éco-responsable trouve ses origines avec la naissance en 1992 du programme Energy Star créé par l'Agence de Protection Environnementale (EPA) et le ministère de l'énergie américain. L'objectif était de proposer un label décerné aux équipements informatiques avec une consommation électrique plus faible que la moyenne. L'EPA espérait faire réduire la quantité d'émissions des gaz à effet de serre en encourageant les citoyens à acheter des produits labélisés Energy Star [Fanara, 2003]. Puis, l'EPA a étendu ce label à de nombreux autres équipements (bureau, systèmes de climatisation, éclairages, etc.). Il est aujourd'hui utilisé pour la plupart des appareils électroménagers et informatiques. Des conseils et des recommandations à destination des entreprises et des particuliers afin d'optimiser, pour la phase d'utilisation de l'appareil, l'utilisation de l'énergie dans l'objectif de réduire les impacts environnementaux comme les émissions de gaz à effet de serre peuvent être trouvés sur le site internet Energy Star (<http://www.eu-energystar.org>)

Les objectifs du Green IT sont d'améliorer la performance énergétique des outils de production informatique [Wati et Koo, 2011]. Cependant, pour être crédible, une telle démarche doit reposer sur des éléments mesurables et concrets : des informations quantifiées pour prendre des décisions à la fois économiques et écologiques et faire des choix en matériaux [Van Grembergen et Amelinckx, 2002].

Si dans un premier temps, l'approche consistait à comparer les caractéristiques techniques de consommations transmises par les fournisseurs, ces données ont par la suite été mises en doute. Notamment les contextes et protocoles de mesures pouvant différer d'un constructeur à l'autre, la vérification des spécificités techniques en était rendue difficile. Ainsi, certains biais dans les résultats affichés par les constructeurs pouvaient apparaître.

1.2.2 Différents Green IT possibles

La circulaire du 3 décembre 2008 relative à l'exemplarité de l'Etat au regard du développement durable dans le fonctionnement de ses services et de ses établissements publics [Journal Officiel de la République Française, 2008] détaille en vingt fiches thématiques la mise en place d'actions permettant l'élaboration d'une politique de développement durable. Les fiches relatives à l'informatique éco-responsable couvrent quatre thématiques principales [Journal Officiel de la République Française, 2008] :

- Le **choix du matériel bureautique** afin de sélectionner des équipements permettant des économies de ressources non renouvelables (consommations électriques et emplois de matériaux recyclés).
- Les **solutions d'impression** avec un objectif de réduction des volumes d'impressions superflues. L'atteinte de cet objectif pourra résulter de plusieurs actions comme le remplacement des imprimantes individuelles par des copieurs multifonctions et/ou la réalisation de campagnes de communication interne sur les bons usages des matériels ou la mise en place de chartes d'utilisation ;
- La **gestion de l'usage du papier** par l'utilisation de papier éco-responsable (recyclé ou labellisé), la communication des bonnes pratiques telles que les impressions recto-verso ou

encore une communication auprès des utilisateurs sur les consommations annuelles de papier de l'organisation ;

- La **gestion des déchets** avec une politique de recyclage des déchets informatiques afin d'en réduire la quantité et par conséquent diminuer les impacts environnementaux relatifs à la gestion des déchets (valorisation ou recyclage).

A ces principales thématiques peuvent s'ajouter un ensemble de mesures comme :

- le développement éventuel du télétravail ;
- l'optimisation des moyens de communication en interne et en externe ;
- et en dernier recours car beaucoup plus contraignants et coûteux, encourager les modifications au sein des processus métiers afin de minimiser leurs impacts sur l'environnement (les contextes technique, réglementaire et économique rendent ce dernier point le plus délicat à réaliser au sein d'une organisation quelconque mais peut être source d'une économie non négligeable).

Comme défini précédemment, le terme de Green IT signifie informatique éco-responsable. Il s'agit donc d'intervenir à deux échelles : d'une part au niveau du secteur de l'informatique afin d'en limiter ses impacts sur l'environnement, c'est le « Green for IT » et d'autre part d'utiliser les systèmes informatiques afin de réduire les impacts environnementaux des autres secteurs, c'est le « IT for Green ».

- ***Green for IT***

Le Green IT traditionnel ou Green IT 1.0 ou encore Green for IT vise à utiliser les technologies nécessaires afin de diminuer l'impact environnemental généré par le secteur informatique dans sa globalité.

Ainsi, les nouvelles technologies permettent d'intervenir sur les 2% d'émissions de CO₂ liées au secteur informatique [Gartner, 2007]. Deux axes majeurs de développement peuvent alors être considérés :

- L'utilisation de produits à faible consommation d'énergie : issus d'efforts menés par les constructeurs afin de proposer sur le marché des équipements moins gourmands en énergie et répondant aux normes et lois en vigueur visant à diminuer l'utilisation de substances toxiques pour l'homme et nocives pour l'environnement (les sites internet des constructeurs comme HP ou Apple possèdent au moins une page d'explications concrètes). Les éditeurs de logiciels participent également à cette évolution en développant des outils de gestion des ressources en temps réels.
- L'optimisation des équipements en les utilisant plus longtemps ou en améliorant leur utilisation. Il a ainsi été mis en avant qu'un serveur classique n'était souvent utilisé que 8 à 15 % du temps pendant lequel il est allumé [Schafer, 2009]. En utilisant par exemple la virtualisation, il est alors possible de réduire le nombre de machines utilisées dans un Système d'Information tout en maintenant une puissance de traitement constante pouvant évoluer et maîtriser les coûts.

- ***IT for Green***

Appelé IT for Green ou Green IT 2.0, il s'agit ici de développer des stratégies permettant de réduire les 98% d'émissions CO₂ restantes résultant des autres secteurs d'activité grâce aux TIC [Flipo et al., 2009] [Breuil et Brun, 2007] [Gartner, 2007].

Dans cette approche, l'emploi à bon escient des équipements informatiques pourrait permettre de réduire les impacts environnementaux des autres secteurs d'activités. A ce niveau, des techniques telles que la téléconférence ou la télé-présence sont envisagées. En effet, au sein d'une organisation, quel que soit son domaine d'activité, il est admis que les transports représentent la plus grande source d'impacts environnementaux [ADEME, 2009a]. Ainsi, la diminution des transports de matières premières et de différents produits ou encore ceux des employés constituent une source potentielle d'économie. En mettant en place un système de visioconférence ou téléconférence, les employés se déplacent moins pour assister à des réunions. Il en va de même lors de la mise en place de solutions de télétravail qui peuvent permettre la suppression d'une partie des trajets domicile-travail pouvant représenter jusqu'à 60% des transports d'une entreprise [ADEME, 2009a]. Cette approche, que nous ne développerons pas dans ce travail de thèse a cependant comme caractéristique d'augmenter les besoins et utilisation des EEE, ce qui motive encore davantage la mise en place concomitante d'une approche « Green for IT », dans laquelle notre travail de thèse trouve sa place.

1.3 Synthèse sur les enjeux environnementaux des technologies de l'information

Fort consommateur de ressources tant énergétiques que de matières premières, le secteur de l'informatique devient un secteur préoccupant pour l'environnement. En découpant la problématique de ce secteur selon les différentes étapes du cycle de vie de ces produits, les enjeux sont plus facilement identifiables mais n'en restent pas moins conséquents.

Concernant les matériaux constitutifs, la diminution des stocks de ressources et notamment celles des terres rares devient préoccupante. Au niveau de la phase de production, le principal enjeu réside dans la prise de conscience de la part des producteurs des pressions qu'ils exercent sur l'environnement : émissions de polluants (dans l'eau, l'air, le sol), utilisation de composés toxiques, emploi de matériaux non-renouvelables ou rares, procédés de fabrication coûteux en énergie... La mise en place des différentes réglementations concernant l'interdiction de certaines substances toxiques devrait engendrer une amélioration de la situation. Au niveau de la phase d'utilisation, les consommateurs doivent prendre conscience de leur pouvoir d'action et adapter leurs comportements afin de limiter les dépenses énergétiques. Enfin, au niveau de la fin de vie, l'enjeu principal réside dans la mise en place de solutions de recyclage efficaces qui permettent d'éviter de jeter dans la nature des produits aux impacts négatifs importants pour l'environnement et de récupérer des métaux précieux présents dans les différents équipements qui deviennent désormais un enjeu majeur face à leur raréfaction.

Partie 2 Les enjeux de l'évaluation

2.1 Pourquoi faire une évaluation environnementale ?

2.1.1 Le modèle Pressions – Etat – Réponses (PER)

En 1993, l'OCDE développe le modèle **PER** (Pression – Etat – Réponse) [OCDE, 1993] qui repose sur l'idée que les activités humaines exercent des **pressions** sur l'environnement et affectent sa qualité et la quantité des ressources naturelles (**Etat**). La société répond alors à ces changements par la mise en place de politiques environnementales pour adapter son comportement à la situation (**Réponses**). Ce modèle est présenté dans la Figure 9.

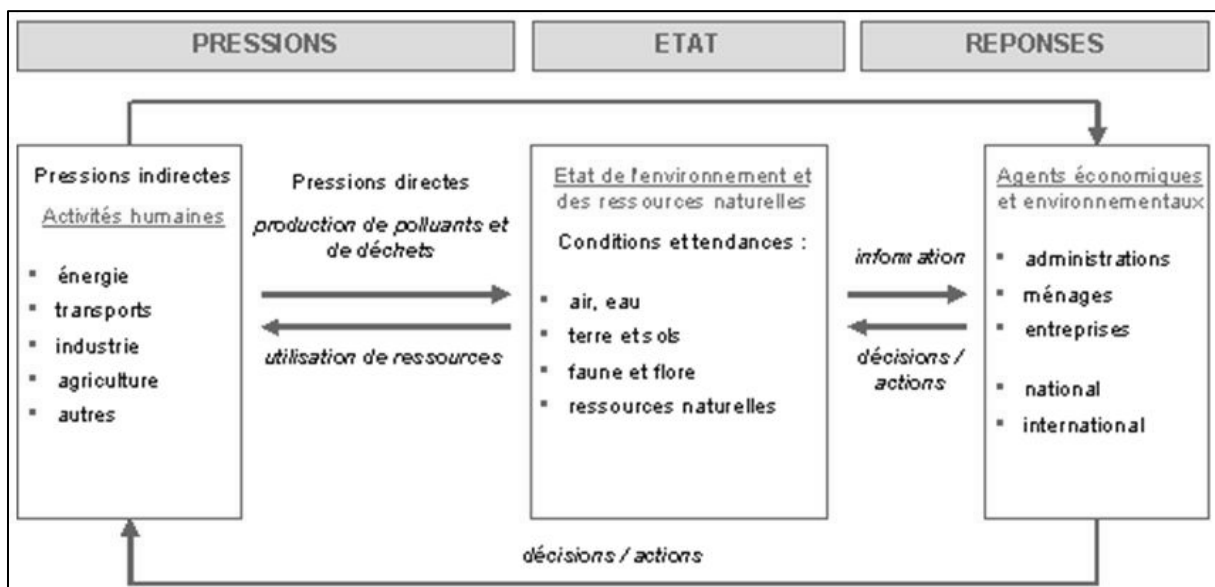


Figure 9: Modèle Pressions – Etat – Réponses (PER) [OCDE, 1993]

Ce modèle PER a évolué vers le modèle **DPSIR** (des termes anglais Driving forces, Pressures, State, Impacts, Responses) très vite adopté par l'EPA [Berge et al., 1997]. Il s'agit alors de décomposer l'analyse en cinq étapes (voir Figure 10) selon une cascade de cause à effet (Forces, Pressions, Etat, Impacts, Réponses). La démarche réside alors en une analyse des problèmes environnementaux en considérant les développements économiques et sociaux comme des forces motrices qui exercent des pressions sur l'environnement. L'état de l'environnement évolue alors sous ces pressions ce qui aboutit à des impacts sur l'environnement (écosystèmes et société humaine) déclenchant des réponses de la part des différents acteurs ou parties prenantes [OCDE, 1993].

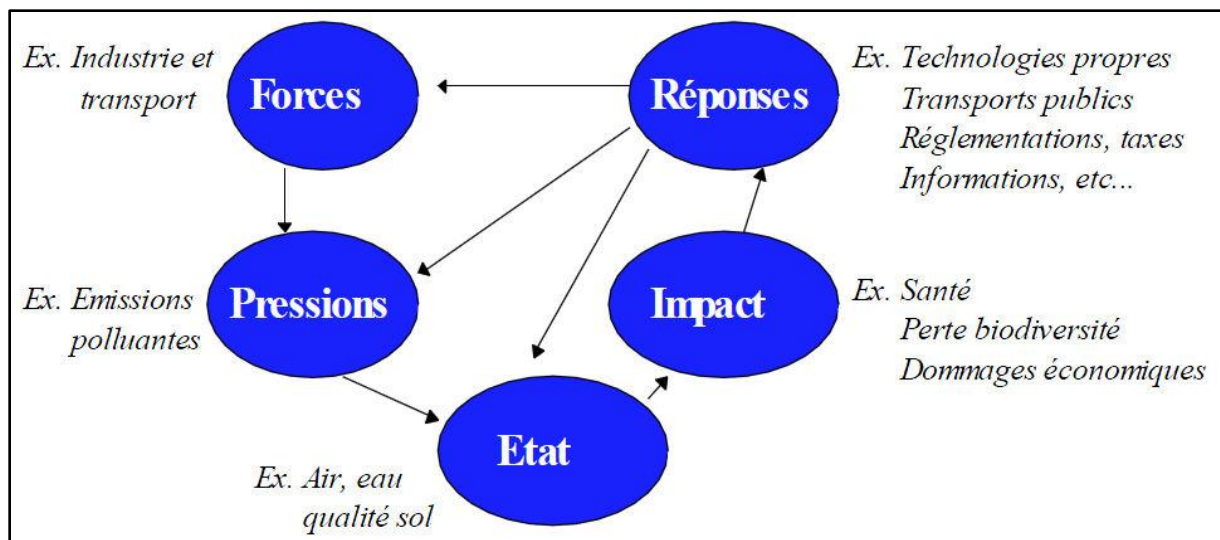


Figure 10: Modèle DPSIR [Berge et al., 1997]

L'analyse de l'ensemble de ces éléments constitue une évaluation environnementale permettant d'aboutir à **l'identification des différents impacts environnementaux engendrés par le système**. Cette identification représente un pré-requis indispensable à la mise en place de moyens d'action afin de limiter ces impacts. Par conséquent, l'évaluation environnementale est un outil support dans un système d'aide à la décision.

2.1.2 Evaluation environnementale pour l'aide à la décision

La prise de conscience de phénomènes environnementaux de grande ampleur comme le changement climatique ou plus généralement la compréhension des relations existantes entre l'homme et son environnement ont fortement induit l'intégration des questions environnementales au sein des processus décisionnels [Friot, 2009]. De part les dégâts sociaux et écologiques mais aussi économiques qui sont liés aux perturbations de l'environnement, l'ensemble des acteurs semblent concernés [Parry et al., 2007] [Munn, 2002] [Stern, 2007]. Ainsi, cette volonté d'intégration de considérations environnementales constitue l'ordre du jour principal des discussions entre les différents acteurs de la vie politique, du tissu économique ou encore des consommateurs.

L'objectif d'une évaluation environnementale est de réaliser un constat des effets potentiels générés sur l'environnement par des activités, des produits ou des services d'une organisation. Cet objectif ne permet pas de résoudre les problèmes mais de les identifier [Faure-Rochet, 2009]. L'évaluation environnementale sert alors de base à la définition d'objectifs d'amélioration et à la rédaction d'un programme d'actions. Mais le choix de la mise en place d'actions d'amélioration peut s'avérer compliqué. C'est alors qu'interviennent de nombreux paramètres pour aider les décideurs dans leurs choix.

La prise de décision se définit comme la sélection d'une solution selon les objectifs de départ et en fonction des informations connues au moment de la décision [Office de la Langue Française, 2011]. L'information devient alors l'élément clé de la prise de décision [Mintzberg, 1990] et peut donc se définir comme la « *signification que l'homme attribue à des données qu'il a sélectionnées et qui est susceptible de modifier sa perception de l'environnement ou son comportement afin de l'aider à gérer les risques et l'incertitude dans laquelle il se trouve* » [Gondran, 2001]. A travers l'ISO 5127, l'AFNOR précise encore cette notion d'information en indiquant que cette dernière correspond à la

« *signification que l'homme attribue à des données à l'aide de conventions employées pour les représenter* » [ISO 51 27, 2001]. A ces caractéristiques, Mintzberg ajoute que, pour que la décision soit prise par les décideurs, il faut, entre autres, utiliser des données analytiques pour les sujets qui exigent une attention particulière [Mintzberg, 1990].

Il faut donc permettre aux décideurs d'avoir accès à ces données en les structurant de manière à ce que l'information soit transmise de la manière la plus complète et objective possible. Il s'agit alors d'aide à la décision dont la méthode peut être basée sur une trame en 7 points [Benoit, 2002] :

1. Formulation du problème
2. Définition des systèmes à comparer
3. Elaboration d'une famille de critères devant répondre à des exigences d'exhaustivité, de cohérence et de non redondance
4. Evaluation des critères
5. Modélisation des préférences globales ou agrégation des résultats de critères
6. Analyse de sensibilité et de robustesse
7. Synthèse des résultats et élaboration des recommandations

Il existe plusieurs outils tels que l'analyse multicritère ou les arbres de décision ainsi que des méthodologies scientifiques permettant ce travail d'évaluation. Le choix de l'un d'entre eux est défini en fonction des objectifs fixés par le décideur et du contexte de l'étude.

Ainsi, nous pouvons définir l'**information** comme la signification attribuée par l'homme à un ensemble de données présélectionnées susceptibles de modifier sa perception et générer une prise de décision.

Par conséquent, les méthodes d'aide à la décision servent à l'organisation et à la synthèse des informations de manière à faciliter la **prise de décision** par les décideurs, et ce sans oublier qu'une décision constitue un processus multi-acteurs résultant de multiples interactions.

Ainsi, la décision peut intégrer les informations issues de l'évaluation environnementale des diverses solutions proposées. Cette évaluation se base sur divers éléments tels que les aspects environnementaux directs et indirects ainsi que les impacts environnementaux locaux et globaux, directs et indirects.

2.2 Sur quoi repose l'évaluation environnementale

Une évaluation environnementale repose sur une série d'indicateurs permettant l'évaluation des impacts environnementaux relatifs à une activité, un produit ou un service d'une organisation. Ces divers impacts retranscrivent de manière quantifiée les aspects environnementaux de cette même organisation.

Encart n° 1 :

Un indicateur sert à la quantification et à la simplification de phénomènes afin de mieux comprendre la réalité souvent complexe qui nous entoure [FAO, 2011]. Il permet ainsi de se tenir informé des changements pouvant avoir lieu au sein d'un système. Un système pouvant être une organisation ou une de ses sous-parties. Dans le contexte environnemental, le système est **une situation environnementale**, cette situation pouvant évoluer au cours du temps. Pour définir ce système, il faut donc choisir le périmètre géographique de la situation environnementale qui fait l'objet de l'évaluation ainsi que la fenêtre temporelle d'observation de cette situation [Adolphe et al., 2006].

2.2.1 Aspects environnementaux (directs et indirects)

Depuis les premières alertes lancées, entre autres, par Rachel Carson en 1962 [Carson, 1962], la problématique environnementale s'est médiatisée avec désormais une prise en considération des différents aspects environnementaux [European Environment Agency, 2005] mais aussi les responsabilités qui y sont liées.

Tel que précisé par l'organisation internationale de normalisation, un aspect environnemental est défini comme l'« *élément des activités, produits ou services d'un organisme susceptible d'interactions avec l'environnement* » [ISO 14001, 2004].

En outre, le règlement européen, dit « éco-audit », fait appel à la notion d'aspect environnemental en mentionnant que des critères basés sur la législation communautaire permettront d'établir quels sont les aspects tant directs qu'indirects d'une organisation, qui ont un impact significatif sur l'environnement [Conseil Européen, 2001]. Cette définition est plus précise car elle ne se limite pas à évoquer les interactions avec l'environnement mais mentionne le fait que les aspects environnementaux puissent avoir un impact significatif sur l'environnement. De plus, deux types d'aspects environnementaux peuvent être distingués : les aspects directs et les aspects indirects. Ainsi, un aspect environnemental direct concerne les activités, produits ou services d'une organisation dont cette dernière a la maîtrise [Conseil Européen, 2001]. A titre d'exemple, le système de filtration des effluents gazeux d'une entreprise constitue un aspect environnemental direct. En revanche, la localisation d'une plateforme de distribution d'un fournisseur de cette entreprise représente un aspect environnemental indirect, c'est-à-dire relié aux activités, produits et services d'une entreprise dont la maîtrise ne lui est pas directement attribuée [Conseil Européen, 2001]. Dans ce dernier exemple, la maîtrise directe de cet aspect est attribuée au fournisseur.

Ainsi, si l'impact environnemental est une dégradation de la qualité de l'environnement, la cause de cette dégradation peut être le rejet dans l'environnement d'une substance. Il s'agit là d'un phénomène de cause à effet dont la cause est l'aspect environnemental [Personne, 1998].

Pour mieux identifier les définitions couramment acceptées pour ces termes, nous avons étudiés 36 rapports de développement durables publiés chaque année par les entreprises cotées en bourse [Journal Officiel de la République Française, 2001] (dont la liste est présentée en Annexe 1) [Moreau et al., 2009]. La notion d'aspect environnemental employée est alors sensiblement différente de celle donnée par l'ISO [ISO 14001, 2004]. Ces définitions considèrent alors les émissions de polluants (plus particulièrement de NOX et de CO2) et la diminution des nuisances sonores.

Cette analyse met en évidence un manque de compréhension et d'appropriation de la notion d'aspect environnemental proposée par l'ISO. En effet, les thèmes pris en compte dans les rapports de développement durable relevant de la notion d'aspects indirects sont souvent qualifiés d'impacts indirects.

2.2.2 Impacts environnementaux (locaux & planétaires)

Apparu vers 1824 le terme impact prend son origine dans le mot latin « *impactus* » qui signifie « heurter » [André et al., 1999]. Il est désormais défini dans les dictionnaires de la langue française, comme « *l'effet, l'influence d'une action forte* » mais aussi comme « *les conséquences éventuelles d'un aménagement sur l'environnement* » [Le Petit Robert, 2001]. Par ailleurs, le ministère de l'environnement croise la sensibilité du territoire et les composantes d'un projet pour en définir les impacts environnementaux potentiels. Il s'agit alors d'identifier les modifications pouvant s'opérer dans l'environnement suite à un aménagement. Ces changements pouvant s'avérer positifs ou négatifs et intervenir à plus ou moins long terme [Michel, 2001].

Cette définition est celle reprise dans les normes de l'ISO, en précisant que les aspects environnementaux sont à l'origine de ces changements de l'environnement [ISO 14001, 2004]. L'impact environnemental est donc ainsi considéré comme l'effet produit par un aspect environnemental qui se trouve alors être la cause de cet impact. Les impacts environnementaux peuvent alors être estimés par différentes méthodes d'évaluation environnementale. Il s'agit alors d'une phase d'analyse destinée à « *comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement* » [ISO 14040, 2006].

Avant de préciser les notions d'impact local et d'impact planétaire, il est nécessaire de faire la distinction entre impact planétaire et impact global. En effet, les impacts planétaires considèrent une échelle la plus large possible et comprennent l'ensemble des impacts ayant une répercussion au niveau mondial (exemple : déplétion de la couche d'ozone, changement climatique) [Hitz et Smith, 2004]. Un impact global regroupe l'ensemble des aspects et impacts environnementaux ainsi que leurs interrelations [Hitz et Smith, 2004]. Ainsi, bien que leurs définitions soient bien distinctes pour les écologues, la confusion entre ces termes est fréquente. Le terme d'impact **global** étant couramment utilisé plutôt que **planétaire**.

De même, alors que leurs sens respectifs peuvent paraître comme plus éloignés, il n'est pas rare de voir des confusions et bon nombre de recoupements quant à l'emploi des termes d'impact local et planétaire. C'est le cas pour les émissions de polluants qui sont considérées d'une part comme un impact local du fait qu'elles vont avoir une incidence sur une zone géographique proche de la source d'émission. D'autre part, les émissions sont également considérées comme ayant un impact planétaire. Par exemple, les émissions de gaz à effet de serre ont une incidence sur le changement climatique.

Avec une problématique mondiale sur la disponibilité des ressources, leur utilisation et exploitation sont désormais répertoriées parmi les impacts planétaires. Il en va de même pour les émissions atmosphériques dont la conséquence pour certains polluants peut être planétaire en se comptabilisant en indicateur d'impact « changement climatique ».

De plus, le fait que la réglementation française se soit intéressée dans un premier temps aux impacts locaux peut expliquer le décalage existant entre ces deux échelles. En France, la réglementation considère des aspects aussi variés que les rejets d'eaux pluviales, le stockage de matières, les

traitements des effluents, la pollution des eaux superficielles ou encore les bruits et vibrations émises par l'installation [Journal Officiel de la République Française, 1998], tous liés à des impacts considérés comme locaux.

Finalement, les termes d'impact local et planétaire peuvent être définis comme suit :

- Impact local :

Une grande partie des impacts sur l'environnement liés aux activités humaines possède des effets perceptibles à l'échelle locale. Il est possible de classer ces impacts par rapport au milieu avec lequel l'interaction est la plus importante tels que :

- Impacts sur le sol : par exemple la dégradation de la qualité du sol engendrée par le stockage des déchets
- Impacts sur l'air : par exemple les émissions de polluants via la mauvaise filtration de l'air d'une usine
- Impacts dans les eaux : par exemple la modification de la faune et de la flore via la contamination d'un cours d'eau par les effluents issus d'une organisation.

Dans le cadre de notre étude, les impacts locaux reprennent en partie ces éléments. Il apparaît alors clairement que l'expression «impact local» fait référence à une dimension géographique de proximité.

- Impact planétaire :

L'équilibre de la planète repose sur une série de grands mécanismes comme les cycles des principaux éléments chimiques ou molécules [Adoue, 2007]. Les conditions nécessaires à la vie sont assurées par ces éléments. L'homme, via ses activités, dérègle ces fragiles équilibres : c'est par exemple la problématique actuelle du réchauffement climatique via la perturbation du phénomène naturel de régulation de la température globale dit «effet de serre».

La bibliographie réalisée et les rapports étudiés parlent d'« **impact global** » si un des mécanismes assurant l'équilibre de la planète venait à être perturbé par l'activité industrielle concernée alors que cette définition est celle d'un impact planétaire. Ainsi, sont mentionnés des termes comme couche d'ozone, gaz à effet de serre ou changement climatique.

Considérant la dimension géographique, une troisième échelle d'impact peut être considérée au niveau régional [Ballerini et Alazard-Toux, 2006]. Les impacts associés à chacune d'entre elles diffèrent. Ainsi, pour l'échelle planétaire sont considérés les impacts tels que l'effet de serre, la déplétion de l'ozone stratosphérique et la déplétion des ressources naturelles. Pour l'échelle locale, des impacts comme l'eutrophisation et le smog photochimique alors qu'à l'échelle régionale c'est l'acidification qui est considérée.

Ainsi, les impacts planétaires de l'activité humaine sur la biosphère sont considérables. S'ils sont par nature moins perceptibles que les impacts locaux, ils représentent toutefois une menace importante pour l'homme car ils peuvent perturber des mécanismes essentiels à la vie sur terre et ont un caractère irréversible et une inertie beaucoup plus forte. Il en va de même pour les impacts directs et indirects.

- **Impact direct et indirect**

Pierre ANDRE (1999) définit les **impacts directs** comme des «*impacts résultants d'une relation de cause à effet entre une composante du projet et un élément de l'environnement*» et considère les **impacts indirects** comme des «*impacts découlant d'une modification d'un élément de l'environnement ayant subi un impact direct*». Ainsi, les effets provoqués par les impacts directs engendrent des impacts indirects [André et al., 1999]. Un impact direct peut être par exemple le rejet de polluants dans l'eau d'une rivière, l'impact indirect engendré sera la dégradation de la qualité du cours d'eau. Ces impacts indirects peuvent aussi bien être environnementaux, économiques, sociaux et sanitaires [Wood, 2003].

L'analyse de l'utilisation des termes « impacts directs et indirects » des rapports étudiés [Moreau et al., 2009] laisse supposer que les définitions appliquées par les entreprises sont relativement homogènes entre elles. Cependant, pour les entreprises, la notion d'impact indirect correspond souvent plus à la définition d'*aspect* indirect [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2006a]. Ainsi, notre étude portant sur des rapports de développement durable montre que l'empreinte écologique des fournisseurs est fréquemment citée comme un impact indirect alors qu'il s'agit d'un aspect indirect [Moreau et al., 2009]. Les impacts réellement indirects des pollutions industrielles (pollution de la chaîne alimentaire, par exemple) sont donc peu identifiés par les entreprises. En effet, les impacts directs concernent les impacts résultant de l'activité de la société alors que les impacts indirects sont associés aux impacts provoqués par l'activité de l'entreprise via par exemple ses fournisseurs ou ses clients.

L'ensemble de ces notions d'aspects et d'impact environnemental sont représentées sur la Figure 11.

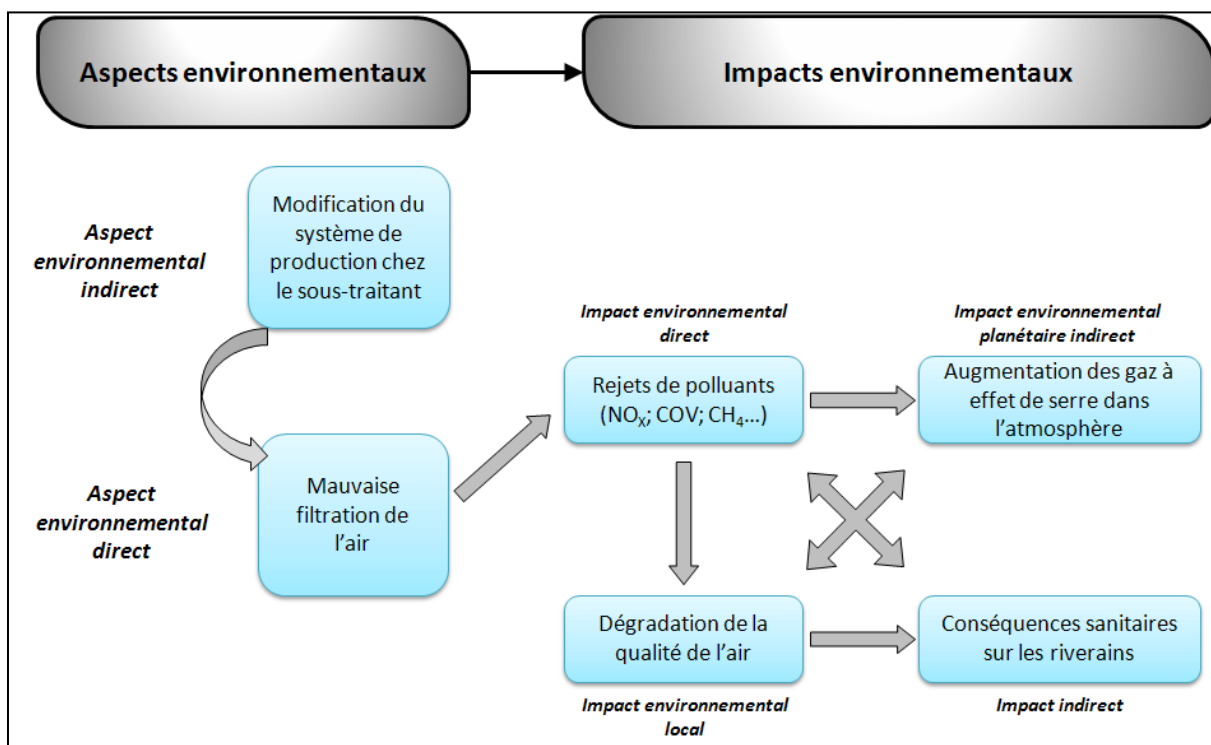


Figure 11: Schéma explicatif des liens existants entre les impacts et les aspects environnementaux [Moreau et al., 2009]

2.2.3 Définitions et objectifs des indicateurs

- **Définitions**

Les définitions d'indicateurs sont multiples, mais ont toutes pour point commun d'évoquer l'indicateur comme un élément quantifiable par l'intermédiaire d'un paramètre ou d'une valeur qui découle d'un paramètre pour décrire un phénomène [Breuil et Brun, 2007]. Les références les plus citées sont celles de l'OCDE qui explique le calcul d'un indicateur sur la base de paramètres donnant des informations sur l'environnement, sur un phénomène ou sur une zone géographique [OCDE, 1993].

La norme environnementale ISO 14 031 aborde le lien entre un indicateur et un impact en précisant que l'indicateur permet d'attribuer une grandeur observée ou calculée à un impact environnemental [ISO 14031, 2000]. Bien souvent, les indicateurs sont des variables observables qui sont utilisées pour rendre compte d'une réalité qui n'est pas systématiquement observable [Boulanger, 2004] [Tyteca, 2002].

Pour qu'un indicateur puisse être considéré comme intéressant et utile pour une étude, il se doit d'avoir certains critères tel la pertinence, la simplicité, la représentativité, le consensus, la précision, l'objectivité, l'absence d'ambiguïté, la mesurabilité, la sensibilité aux variations des paramètres, le pouvoir discriminant et la comparabilité [Tyteca, 2002] [Raymond, 2009].

La nature d'un indicateur peut-être très variable : il peut s'agir de mesures réalisées sur le terrain, de données statistiques ou encore de résultats issus de modélisations. De même, les valeurs peuvent être qualitatives ou quantitatives. Bien souvent, les indicateurs sont des variables observables qui sont utilisées pour rendre compte d'une réalité qui, elle, n'est pas systématiquement observable [Boulanger, 2004].

Un indicateur correspond donc à une information chiffrée qui permet d'évaluer une situation à un moment précis. « *Un indicateur peut notamment avoir pour but de rendre appréhensible une réalité complexe (c'est particulièrement le cas des indicateurs de développement durable)* » [Boutaud, 2004].

- **Objectifs**

Le choix des indicateurs pour réaliser l'évaluation environnementale d'une organisation découle notamment d'une **volonté de répondre aux exigences imposées** par l'article 116 de la loi 2001-420 du 15 mai 2001 relatives aux nouvelles régulations économiques. Cette dernière impose aux entreprises françaises cotées en bourse, soit 700 entreprises en 2004 d'après l'Observatoire sur la Responsabilité Sociétale des Entreprises (ORSE) [ORSE, 2004] de réaliser un « reporting » réglementaire de données brutes destinées à l'information concernant la gestion sociale et environnementale de leur activité [Journal Officiel de la République Française, 2001]. Mais au-delà du simple respect de la réglementation, les entreprises voient dans ces rapports une opportunité de communication. Pour cela, elles élaborent et publient leurs résultats sous forme d'indicateurs sociaux (par exemple : le nombre d'embauches en contrat à durée indéterminée (CDI) ou le nombre de salariés handicapés) mais aussi environnementaux (par exemple : les émissions annuelles de CO₂, SO₂ et ou NO_x).

Dans cette vision, l'indicateur apparaît comme un outil de pilotage de la stratégie environnementale ou comme la base d'un système d'un management, permettant la communication des résultats aux différents publics visés (actionnaires, clients, fournisseurs, partenaires, ...).

La pertinence ou non d'un indicateur dépend en grande partie du contexte dans lequel il est créé et utilisé. Un processus méticuleux d'élaboration ou de sélection s'impose donc face à une situation déterminée. De même, les indicateurs doivent être utilisés de façon adéquate lors d'une évaluation comme une Evaluation de la Performance Environnementale (EPE). La norme ISO 14 031 donne les lignes directrices pour sa réalisation et son utilisation.

En outre, la norme ISO 14 040 [ISO 14040, 2006] décrit les principes de la méthode d'évaluation environnementale nommée Analyse de Cycle de Vie (ACV) dont les principes sont considérés comme fondamentaux et posent les bases pour établir des indicateurs complets et objectifs. Parmi ces principes, l'élaboration des indicateurs est un point essentiel. Ils doivent être établis en fonction des objectifs de l'étude. Pour cela, l'approche itérative permet la mise en perspective des objectifs à chaque étape de l'évaluation. L'approche complète de l'ACV passe par la prise en compte de l'intégralité du cycle de vie d'un produit et l'utilisation de plusieurs indicateurs environnementaux.

Un indicateur doit renvoyer une image fidèle du phénomène à étudier pour permettre une évaluation rapide et simple des données à surveiller [Victor, 2007]. Pour cela, il existe différents types d'indicateurs ayant chacun un rôle dans l'organisation mais aussi des fonctions différentes.

- **Catégories d'indicateurs**

Plusieurs classements sont possibles lorsqu'il s'agit de répertorier les indicateurs. Afin de structurer les indicateurs par objectifs, Aurélien Boutaud utilise le modèle PER pour distinguer en trois catégories les indicateurs [Boutaud, 2004] (Tableau 7).

Tableau 7: Objectifs et exemples d'indicateurs de pression, d'état et de réponse de l'environnement (d'après [Boutaud, 2004])

Catégorie d'indicateurs	Objectifs	Exemples
Pression	Rendre compte de la pression exercée sur l'environnement	Volume de polluants liquides émis
Etat	Mesurer l'état de l'environnement	Qualité des eaux dans un cours d'eau
Réponse	Estimer le niveau de réponse apporté pour améliorer l'état et/ou réduire la pression	Taux de raccordement au réseau d'eaux usées

La norme internationale ISO 14 031 propose une autre classification et décrit deux catégories principales :

- les **indicateurs de condition environnementale (ICE)** : « *expression spécifique qui fournit des informations sur la condition locale, régionale, nationale ou mondiale de l'environnement* » [ISO 14031, 2000]

L'objectif de tels indicateurs est d'apporter les informations nécessaires à la compréhension des impacts (potentiels) des aspects environnementaux d'une organisation afin d'améliorer la gestion des impacts environnementaux.

- les **indicateurs de performance environnementale (IPE)** sont définis comme une « *expression spécifique qui fournit des informations sur la performance environnementale d'un organisme* » en admettant que la définition de performance environnementale soit l'ensemble des « *résultats obtenus par la direction d'un organisme concernant ses aspects environnementaux* » [ISO 14031, 2000].

Ces IPE se distinguent alors en deux sous-catégories :

- *indicateurs de performance de management (IPM)* fournissant des informations sur les efforts accomplis pour influencer la performance environnementale de l'organisation. L'objet étudié ici concerne les efforts au niveau du management de l'organisation et non ces réalisations vis-à-vis de l'environnement;
- *indicateurs de performance opérationnelle (IPO)* qui traduisent les informations relatives aux résultats de la mise en place d'actions par l'organisation.

La Figure 12, issue de la norme ISO 14031 illustre les liens entre la direction de l'organisation considérée, ses opérations et la condition de l'environnement. Les différents indicateurs IPE, IPM et IPO sont présentés sur cette Figure 12.

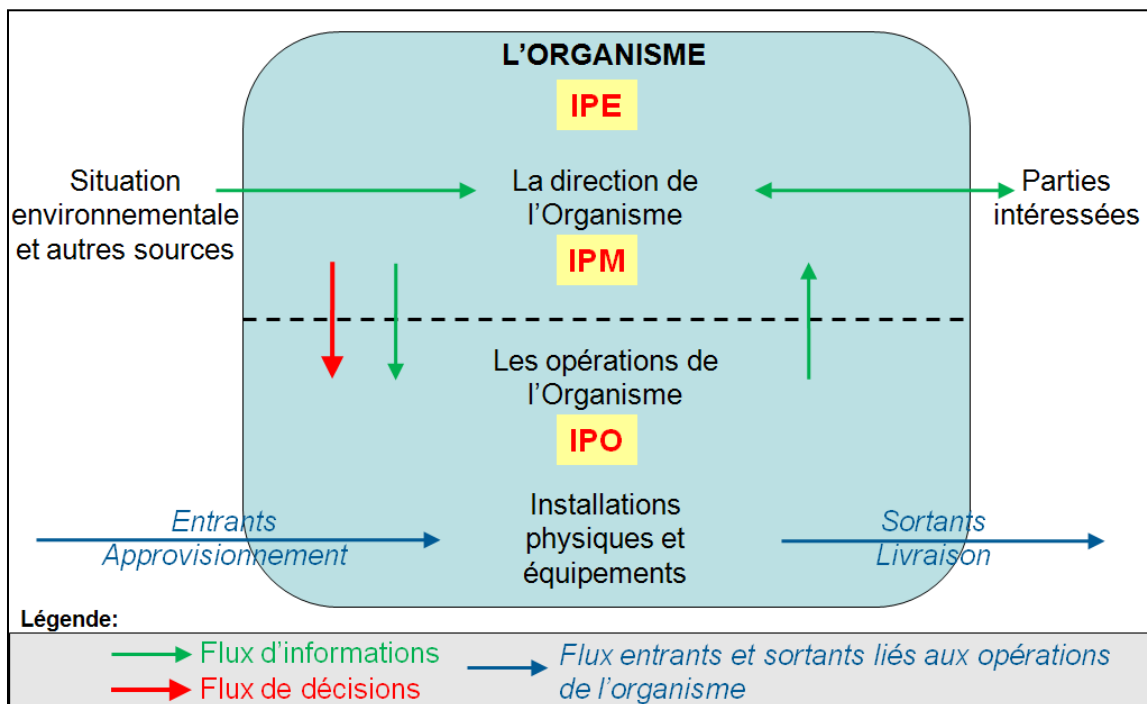


Figure 12: Les différentes catégories d'indicateurs environnementaux [ISO 14031, 2000]

De plus, certains indicateurs opérationnels peuvent être utilisés comme **outils de suivi**, notamment lorsqu'ils sont liés à l'activité, au résultat ou à l'objectif faisant l'objet du suivi. Ils permettent de connaître les écarts d'une situation donnée par rapport à une situation de référence.

Par conséquent, afin qu'une évaluation soit la plus complète possible, elle doit comporter plusieurs catégories d'indicateurs : des **indicateurs environnementaux** et des **indicateurs de suivi**. Les indicateurs environnementaux permettent d'avoir une connaissance et d'améliorer la compréhension des impacts sur l'environnement liés aux activités d'une organisation. Les indicateurs de suivi permettent d'enregistrer l'évolution de la situation par rapport à la situation initiale ou une situation de référence à atteindre.

2.2.4 Elaboration et utilisation des indicateurs

- **Elaboration et choix des indicateurs**

Pour qu'un indicateur puisse être considéré comme pertinent pour une étude, il se doit d'avoir les qualités suivantes [Tyteca, 2002] [Raymond, 2009] [Boutry, 2008].

- les **qualités d'usage** :
 - la simplicité : l'information doit pouvoir être récupérée facilement, de manière rapide et peu coûteuse.
 - la représentativité d'un indicateur s'établit selon trois paramètres. Il doit être quantifiable mais aussi exhaustif, c'est-à-dire qu'il considère l'ensemble du phénomène qu'il mesure et enfin il doit être objectif et donc ne doit pas être sujet à débat.
 - l'opérationnalité : il doit donner des indications claires et précises à l'utilisateur.
- les **qualités métrologiques** : en qualité d'instrument de mesure, il doit répondre aux qualités exigées à tout instrument de mesure. Ainsi, un indicateur se doit d'être tout d'abord juste, puis fidèle, constant et reproductible c'est-à-dire qu'il a la capacité de donner la même mesure si la situation se présente à nouveau. Enfin, l'indicateur doit être précis afin que sa marge d'erreur ne soit pas trop importante en fonction de la précision des mesures réalisées.
- qu'il s'agisse d'un indicateur de suivi ou non, parmi les **qualités systémiques**, on retrouve :
 - la pertinence qui représente une description parfaite du phénomène étudié ;
 - la cohérence indiquant qu'une amélioration constatée sur un indicateur contribue réellement à une amélioration de manière plus générale ;
 - la convergence permettant de s'assurer que l'amélioration sur un point n'engendre pas la détérioration sur un autre.

L'élaboration d'indicateur doit donc tenir compte de l'ensemble de ces éléments. Pour cela, une méthodologie précise en quatre étapes doit être respectée [Laforest, 2008] [Cikankowitz, 2008] [Raymond, 2009]. Soit :

- 1) Le **champ de mesure** doit être défini clairement afin d'obtenir un cadre précis et des limites dans lesquelles les mesures vont être réalisées.
- 2) La **détermination des objectifs** constitue la seconde étape. Ces objectifs doivent correspondre aux champs de mesures définis à l'étape précédente et peuvent faire l'objet de plusieurs critères. Ils permettent de donner un sens à la mesure.
- 3) La **composition de l'indicateur** permet de transcrire en données chiffrées les paramètres des différents critères retenus en fonction des objectifs. Pour réaliser cela, il faut identifier un ou plusieurs critères permettant un positionnement par rapport aux objectifs mais aussi établir les paramètres permettant de quantifier le(s) critère(s) et ainsi obtenir des valeurs pour mesurer l'indicateur. Il existe ainsi une trilogie « critère – paramètre – indicateur » où chaque notion est dépendante du niveau de globalité ou au contraire de détail auquel on se situe [Maystre et Bollinger, 1999] : un indicateur étant composé de paramètre, ce dernier pouvant être sous-divisé en un ou plusieurs critères. Ainsi, certains paramètres peuvent s'avérer très représentatifs d'une situation plus générale et par conséquent prétendre au titre d'indicateur.
- 4) Le **format** (dénombrement, ratio, taux, ...) **et les seuils de référence** (valeur minimum, maximum, plage de valeur, valeur à atteindre) de l'indicateur seront définis. En effet, la nature d'un indicateur peut être très variable : il peut s'agir de mesures réalisées sur le

terrain, de données statistiques ou encore de résultats issus de modélisations. De même, les valeurs peuvent être qualitatives ou quantitatives.

La normalisation, l'agrégation et/ou la standardisation peuvent également faire partie du processus d'élaboration d'indicateur. La Figure 13 représente l'enchaînement de ces étapes dans l'élaboration d'un indicateur agrégé.

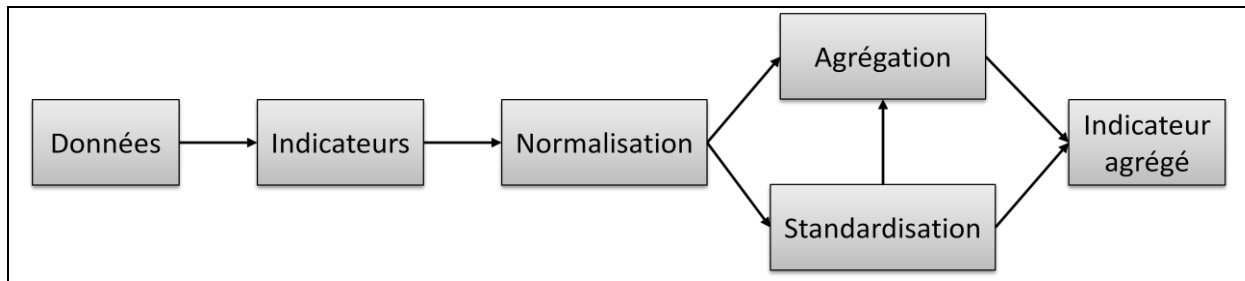


Figure 13: Etapes du développement d'indicateurs environnementaux (inspiré de [Olsthoorn et al., 2001])

Néanmoins, bien qu'en suivant les étapes précédentes, les indicateurs créés ne sont pas neutres et il est possible d'y distinguer l'influence du concepteur comme le mentionne Aurélien Boutaud dans sa thèse [Boutaud, 2004].

- **Utilisation des indicateurs**

Les différents indicateurs utilisés devront permettre d'obtenir des informations objectives susceptibles d'aider le décideur dans sa prise de décision.

Les informations résultantes des méthodes d'évaluation classiques ne permettent que rarement une prise de décision directe (difficile de prendre une décision si plusieurs indicateurs sont affichés et si ces derniers donnent des informations contraires). Néanmoins, comme indiqué précédemment, ce n'est qu'avec cette vision multicritère qu'un problème complexe peut être appréhendé de la manière la plus complète. C'est dans cette optique que de nombreux outils d'analyse multicritères ont été développés permettant à la fois de garder cette vision complète mais aussi en donnant une indication plus fine sur la solution proposée afin de répondre à un objectif. De plus, les informations ainsi collectées peuvent être converties en indicateurs globaux, centralisant plusieurs informations afin d'attribuer une note finale et ainsi aider le décideur dans son choix.

Pour l'aide à la décision, les résultats d'évaluation peuvent être donnés sous la forme d'un indicateur agrégé. Cependant le regroupement d'informations sous un score unique est généralement synonyme de « perte d'information » et peut masquer l'existence d'un paramètre important. Le Tableau 8 illustre simplement ce phénomène par la mise en place d'un indicateur global via cinq indicateurs pour deux situations différentes. Pour une même note globale, les variations de comportement des cinq indicateurs pris individuellement ne sont pas mises en avant. De plus, avec une note globale identique, le décideur n'a pas suffisamment d'information et ne peut opter pour l'une ou l'autre solution.

Tableau 8: Illustration de la perte d'information liée à l'agrégation des informations sous une note globale.

	Situation 1	Situation 2
Indicateur 1	2	1
Indicateur 2	2	1
Indicateur 3	2	6
Indicateur 4	2	0
Indicateur 5	2	2
Note globale	10	10

A cette notion d'indicateur agrégé ou non, s'ajoute la perception que les différents acteurs pourront avoir sur les indicateurs utilisés et l'importance qu'ils accordent à chacun d'eux. La question de la perception en management concerne la lecture des enjeux essentiels de l'organisation et de la représentation de la réalité. Elle est centrale dans les grandes décisions engageant l'avenir de l'organisation comme dans l'exercice du management au quotidien [Wiedmann et al., 2006].

De manière générale, les indicateurs sont utilisés afin d'obtenir une mesure de la performance d'une organisation. C'est le cas lors de la réalisation d'une Evaluation de la Performance Environnementale (EPE) [ISO 14031, 2000]. Mais d'autres utilisations peuvent être identifiées comme la réalisation de diagnostics environnementaux [ADEME, 2011a], qui permettent d'effectuer un état des lieux global. L'objectif est d'évaluer les atteintes à l'environnement d'une organisation en vue de définir des objectifs à atteindre par l'identification de points forts et de points sensibles. Ainsi des actions pourront alors être engagées, et les indicateurs permettront de suivre l'évolution de la situation suite à leur mise en place.

La majorité des outils d'évaluation environnementale utilisent des indicateurs, ces derniers pouvant varier selon les objectifs de chaque outil. Leur application doit alors considérer les spécificités de l'étude (objectifs, contraintes et limites) et nécessite une adaptation de l'outil qui se traduit dans la plupart des cas par la création d'un nouveau panel d'indicateurs tout en conservant les caractéristiques propres à l'outil appliqué.

Le paragraphe suivant présente les outils d'évaluation environnementale existants ainsi que leur complémentarité et leurs convergences. Leur analyse mettra en évidence les possibles lacunes pouvant persister au sein de ces méthodes d'évaluation environnementale.

2.3 Outils méthodologiques d'évaluation environnementale existants

De manière générale, les outils existants suivent la même démarche. Dans un premier temps, le recueil des données est effectué concernant la situation actuelle et passée. Puis, les effets engendrés sont identifiés afin de mener une analyse des phénomènes appliqués et des risques encourus par l'organisation. Enfin, dans un dernier temps, des solutions sont proposées par rapport aux risques identifiés : possibilité d'amélioration, mise en place de mesures d'urgence, de prévention.

Une dizaine d'outils d'évaluation environnementale ont été étudiés suivant leurs principaux objectifs, impacts, champs d'application, avantages et inconvénients.

2.3.1 Objectifs principaux de différents outils d'évaluation environnementale

Les méthodes d'évaluation environnementale globale ont pour objectifs d'établir des profils environnementaux d'activités, de services ou de produits afin de minimiser leurs impacts sur l'environnement. Les résultats de ces évaluations indiquent donc des points forts sur lesquels l'organisation devra s'appuyer et des points sensibles sur lesquels elle devra agir. Afin d'obtenir des résultats les plus complets possibles, les évaluations peuvent, ou non, considérer l'ensemble des impacts susceptibles de perturber les équilibres planétaires.

- ***L'Etude d'impact (EI) réglementaire***

La prise de conscience de l'impact que peut avoir l'homme sur son environnement dans les années 70 se concrétise dans de nombreux pays par l'institution de lois visant à réduire les nuisances et pollutions et à atténuer les impacts des grands projets sur l'environnement. C'est ainsi qu'apparaissent différentes dispositions juridiques internationales pour protéger l'environnement et, plus précisément, est publiée, en France la loi n°76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature instaurant les études d'impacts, plus connues désormais sous le nom d'études d'impact réglementaires [Journal Officiel de la République Française, 1976]. L'article L122-1 du Code de l'Environnement français mentionne que ces études doivent permettre d'apprécier les conséquences de la réalisation d'aménagements ou d'ouvrages qui peuvent porter atteinte à l'environnement [Code de l'environnement, 2010]. L'objectif est de réaliser une étude sur les modifications de l'environnement engendrées par le projet et les « mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables pour l'environnement » [Journal Officiel de la République Française, 1976]. Il s'agit ici d'obtenir toutes les informations nécessaires à la **caractérisation et la quantification des impacts environnementaux sur les milieux naturels et humains, au niveau local**. Ces études doivent comparer et évaluer les avantages et inconvénients des solutions retenues et des alternatives ayant fait l'objet d'une évaluation affinée. Elles proposent des mesures compensatoires et/ou d'accompagnement pour atténuer les effets du projet, avec ou sans enquête publique. Ces mesures sont cependant rarement suffisantes pour éviter la modification de la biodiversité, pour réparer les effets de coupure écologique des routes, voies ferrées, canaux malgré la mise en place d'un réseau national de corridors biologiques. La portée des études d'impact a été renforcée par :

- des procédures de concertation ou de débat public pour certains projets de grande ampleur ;
- de nouvelles démarches et outils d'évaluation et de cartographie (Système d'information Géographique – SIG) des enjeux écologiques, environnementaux, ... ;
- de nouvelles démarches d'évaluation de sensibilités des territoires d'étude.

Cependant, ces études d'impact sont bien plus souvent considérées comme un passage réglementaire obligé plutôt que comme un outil d'aide à la décision permettant d'améliorer le projet concerné.

- ***Méthode d'analyse environnementale et de hiérarchisation des aspects environnementaux***

Accentué par les préoccupations des parties intéressées pour les questions relatives à l'environnement et au développement durable, le contexte législatif actuel encourage la mise en œuvre de politiques de développements économiques ainsi que l'application de mesures visant à la protection de l'environnement. Ainsi, de nombreux organismes cherchent à atteindre et à démontrer

leur bon niveau de performance environnementale, en mettant en place, de façon volontaire, une démarche de maîtrise des impacts de leurs activités, produits et services sur l'environnement dans le cadre d'un système de management environnemental (SME) [ISO 14001, 2004]. Ces démarches débutent généralement par la réalisation d'une analyse environnementale, la définition d'objectifs de performance et d'une politique environnementale puis la réalisation d'audits environnementaux afin de suivre l'évolution des performances. Néanmoins, la mise en œuvre d'une telle démarche d'amélioration continue au sein d'une organisation ne représente pas une garantie de sa performance environnementale. Elle exige toutefois, entre autres, à l'organisation de faire un suivi des exigences légales qui s'appliquent à l'organisation concernée. Les normes internationales ont en effet pour objectif de fournir des règles pour la structuration et l'intégration d'un SME afin d'aider les organismes à atteindre leurs objectifs environnementaux et économiques [ISO 14001, 2004], mais les normes de type ISO 14 001 ne définissent pas d'objectifs substantifs à atteindre par l'organisme certifié. Ainsi, la norme ISO 14 001 prescrit :

- l'établissement d'une politique environnementale,
- l'identification des aspects environnementaux et de déterminer les impacts environnementaux significatifs,
- l'identification des exigences applicables (légales et autres),
- l'identification des priorités et le choix des objectifs environnementaux,
- l'établissement d'une structure et d'un programme d'application de la politique précédemment élaborée,
- de faciliter les activités de planification, maîtrise, surveillance, actions préventives et correctives, audit et revue afin de s'assurer simultanément que la politique est respectée et que le système de management environnemental reste adapté,
- d'être capable de s'adapter aux changements de circonstances.

Pour atteindre les objectifs prescrits par la norme, un système documentaire est recommandé. Pour que ce dernier soit complet, quatre niveaux sont proposés [Prats, 2011] :

- Niveau 0 : la politique environnementale et le domaine d'application du SME
- Niveau 1 : les procédures identifiées
- Niveau 2 : les modes opératoires, instructions, consignes, formulaires, ...
- Niveau 3 : les enregistrements (documents indiquant les résultats obtenus ou apportant la preuve de la réalisation d'une activité)

La réflexion menée pour l'élaboration d'un SME au sein d'une organisation permet d'identifier les aspects et impacts environnementaux et vise à enclencher une démarche d'amélioration continue engageant l'ensemble du personnel [ISO 14001, 2004].

- ***L'évaluation des performances environnementales (EPE)***

L'EPE est apparue en 2000 et est standardisée par la norme ISO 14 031 [ISO 14031, 2000]. Il s'agit ici d'un **outil de management environnemental** interne à l'entreprise qui évalue si les critères environnementaux de l'organisme et les valeurs des indicateurs de performance sont bien en adéquation. Les impacts environnementaux sont donc évalués indirectement par cet outil dont le centre d'intérêt est l'évaluation du système de management et non les impacts environnementaux. L'évaluation consiste alors à récupérer les données des différents aspects environnementaux et ainsi examiner l'évolution dans le temps des impacts environnementaux de l'entreprise ainsi que la

dégradation des milieux impactés. Ces données recueillies sont confrontées avec la politique environnementale et les objectifs de l'entreprise.

Ainsi, l'EPE se focalise sur le système de management d'une organisation vis-à-vis de l'environnement et non sur les impacts environnementaux résultants de cette organisation mais d'autres outils permettent l'évaluation des impacts en considérant un voire plusieurs d'entre eux. Cependant, cette norme n'est pas certifiable. Après un léger engouement de la part des entreprises à son lancement, vers les années 2000, ce référentiel semble désormais peu approprié par le milieu industriel.

- **Les outils d'évaluation des émissions de GES**

Depuis la signature du protocole de Kyoto en 1997, une attention particulière est portée sur les émissions de gaz à effet de serre. Ce protocole vise à réduire les émissions des six gaz à effet de serre principaux : le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote, les hydrofluorocarbures, les perfluorocarbures et l'hexafluorure de soufre [Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1997]. L'objectif de cette diminution est de limiter l'accroissement du phénomène d'effet de serre et ainsi ralentir les changements climatiques à la surface de la Terre.

Pour atteindre cet objectif de diminution des émissions, il est nécessaire dans un premier temps de quantifier ces émissions. Le secteur de l'évaluation des émissions de GES est devenu un secteur prometteur et évolue constamment en matière de réglementations, normes et bonnes pratiques. En France, après une première tentative avortée de mise en place d'une « contribution climat énergie » (plus connue sous le nom de « taxe carbone ») en 2009, la réglementation met en place des objectifs face à cette évaluation des émissions de gaz à effet par l'intermédiaire du décret n° 2011-829 du 11 juillet 2011. Ce dernier définit l'obligation pour les personnes morales de droit privé employant plus de 500 personnes pour la France métropolitaine ou plus de 250 personnes pour les régions et départements d'outre mer de réaliser un bilan d'émissions de GES [Journal Officiel de la République Française, 2011].

Certains outils se focalisent sur cet impact environnemental en particulier. C'est notamment le cas du GHG protocol (GreenHouse Gas protocol) et de la méthode Bilan Carbone® [ADEME, 2010]. L'objectif de ces deux outils est d'**estimer la quantité d'émissions de gaz à effet de serre (GES)** liée à une activité.

- Le protocole des gaz à effet de serre (GHG Protocol) a été institué en 1998 par le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) et le World Resources Institute (WRI). Il cherche à établir, en partenariat avec des entreprises, des ONG et des gouvernements, les bases des connaissances concernant la comptabilisation et la déclaration des gaz à effet de serre [Fransen et al., 2007]. La liste des gaz à effet de serre (GES) considérés dans ce protocole est celle mentionnée par le Protocole de Kyoto à savoir : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).
- Le Bilan Carbone® (BC) est un outil de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre développé par J-M. Jancovici via l'ADEME en 2002. Le Bilan Carbone® permet d'évaluer, en ordre de grandeur, les émissions de gaz à effet de serre engendrées par chacun des processus physiques nécessaires à l'existence d'une activité ou organisation humaine [ADEME, 2010] dès lors qu'il est possible de leur assigner des frontières claires. Il s'agit ainsi

d'évaluer les émissions directes ou induites par une activité ou un territoire à partir de données facilement disponibles.

Ce dernier outil, initié par l'ADEME a engendré la naissance depuis fin 2011 de l'Association Bilan Carbone (ABC). Cette dernière mobilise des acteurs du secteur privé et public autour de l'évolution de la méthode et de l'outil Bilan Carbone® ainsi que pour la diffusion de son utilisation. L'ABC souhaite dynamiser et pérenniser la qualité du Bilan Carbone® et le pourvoir d'une approche managériale et stratégique de la mesure des émissions de GES.

Depuis sa création, l'ABC s'efforce de faire évoluer la méthode en un système managérial et stratégique. De plus, elle agit sur la sensibilisation et la formation des parties prenantes, jusque dans les milieux universitaires, « *l'Association Bilan Carbone souhaite inscrire l'exigence et la qualité du diagnostic Bilan Carbone® comme référent européen et international* » [Association Bilan Carbone, 2011].

La réalisation du GHG protocol passe dans un premier temps par la définition des périmètres organisationnels et opérationnels de l'organisation étudiée. Du choix de ces périmètres dépendent les caractéristiques de l'organisation, de l'objectif d'information sur les GES ainsi que des besoins des utilisateurs. Les règles méthodologiques du Bilan Carbone® suivent celles du GHG Protocol et sont compatibles avec la norme ISO 14 064 [ISO 14064, 2006] sur la comptabilité et la vérification des gaz à effet de serre. Le Bilan Carbone® fournit une base méthodologique et technique pour garantir l'exhaustivité des émissions issues de l'ensemble des activités de l'entreprise et un degré de précision permettant de décider quelles actions de réduction des émissions devraient être engagées.

L'application de telles méthodes permet l'expression des émissions de gaz à effet de serre d'une activité en tonne équivalent CO₂. Ces émissions sont le plus souvent calculées à partir de facteurs d'émissions disponibles dans différentes bases de données telles que Ecoinvent ou pouvant être estimées.

En France, c'est la base carbone qui représente la base des facteurs d'émissions du Bilan Carbone® : elle contient plus de 1 900 facteurs d'émissions (kg équivalent CO₂ par unité) et 800 données sources (ex : consommation moyenne d'un véhicule). Il s'agit d'une base de données publique disponible au travers de l'outil Bilan Carbone® et du guide des facteurs d'émissions téléchargeables sur le site de l'ADEME. Actuellement utilisée pour la réalisation de bilans GES réglementaires ou volontaires, elle constitue une référence nationale pour les facteurs d'émissions [ADEME, 2011b].

- **L'analyse du cycle de vie (ACV)**

L'ACV, standardisée par les normes ISO 14 040 [ISO 14040, 2006] à ISO 14 044 [ISO 14044, 2006], se base sur un bilan à la fois quantitatif et qualitatif des aspects et impacts environnementaux potentiels d'un système. L'évaluation environnementale est réalisée selon les différentes étapes du cycle de vie du produit étudié (« *de l'acquisition des matières premières à sa production, son utilisation, son traitement en fin de vie, son recyclage et sa mise au rebus* » [ISO 14040, 2006]). Egalement appelée méthode d'évaluation « du berceau à la tombe » [Curran, 2008], l'ACV s'attache à **caractériser les impacts environnementaux le long du cycle de vie**. La finalité est de détecter les points forts et/ou les points faibles d'un système afin d'agir directement à un niveau pertinent [Gilet, 2000]. Une analyse du cycle de vie se réalise en quatre étapes [ISO 14040, 2006] : la définition des

objectifs, l'inventaire, l'évaluation des impacts et l'interprétation des résultats (Figure 14). Une ACV peut avoir plusieurs applications comme par exemple la planification stratégique ou le marketing (Figure 14).

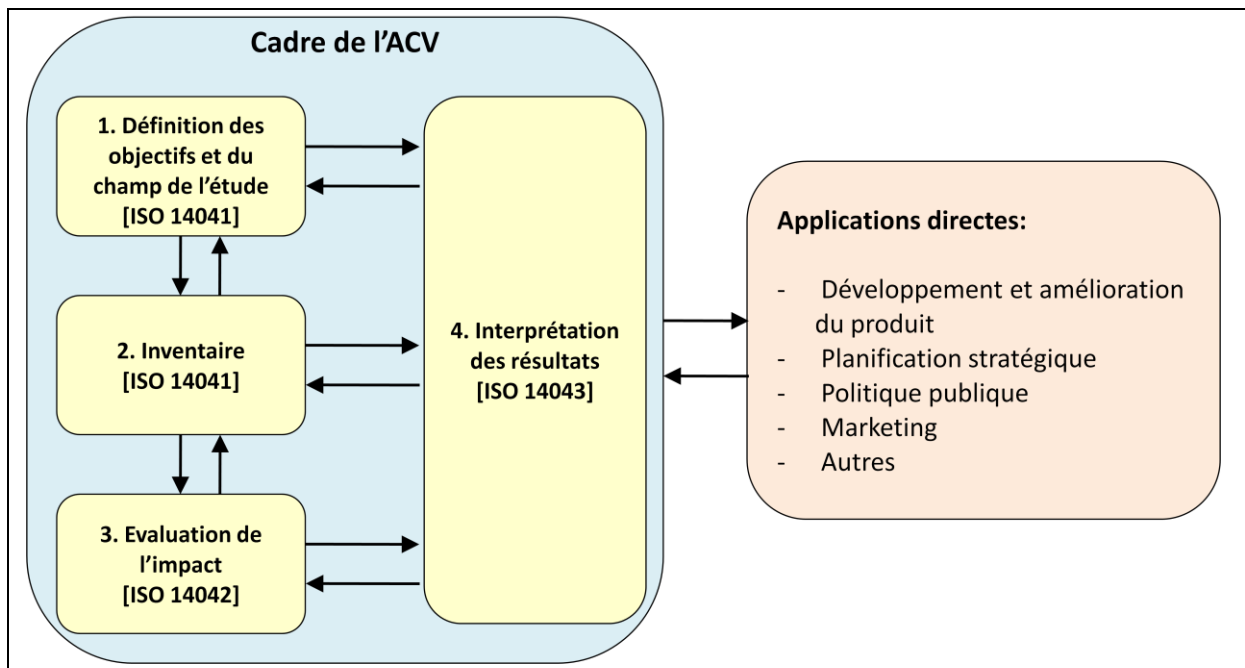


Figure 14: Les différentes phases et applications directes de l'ACV [ISO 14040, 2006]

L'étape 3, l'évaluation de l'impact est réalisée par l'intermédiaire de facteurs de caractérisation. Une ACV étant une étude longue et complexe, elle se réfère généralement à des études ultérieures et pour cela fait appel à des bases de données. D'autre part, il existe également des bases de données qui centralisent les résultats d'ACV antérieures.

Il existe différents logiciels d'ACV qui permettent de calculer les impacts environnementaux potentiels à partir des données d'inventaire. Le logiciel permet de construire le modèle de cycle de vie du produit et d'associer les processus élémentaires correspondants. Les logiciels intègrent plusieurs méthodes d'évaluation et différentes bases de données. Les outils logiciels sont multiples et possèdent chacun leur spécificité : le plus couramment utilisé est l'outil SIMAPRO, il est relativement simple d'utilisation et centralise une douzaine de bases de données (dont Ecoinvent). L'outil GABI possède la particularité d'être adapté au procédé et permet la réalisation d'un arbre des procédés. Il est également très utilisé. Les autres outils d'ACV sont utilisés mais moins connus que les deux précédents comme TEAM ou Umberto. La commission européenne a récemment publié une liste de logiciels ACV, disponible sur internet (<http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcaifohub/toolList.vm>) [Commission Européenne, 2011].

- **Les outils d'analyse des flux**

Les outils MIPS (Material Input Per Service), MFA (Material Flow Analysis) et l'empreinte écologique (EE) consistent en une analyse des flux entrants et/ou sortant afin d'en établir un profil environnemental. Il s'agit alors à ce niveau d'**estimer les flux résultant d'une activité, d'un service ou d'une population.**

MIPS est un outil développé dans les années 1990 par Friedrich Schmidt-Bleek de l'institut Wuppertal. C'est un outil d'aide à la décision ressemblant fortement à une ACV [Ritthoff et al., 2002]. Cependant, il ne considère que les flux de matières entrants dans le cycle de vie d'un produit, et non l'ensemble des flux entrants et sortants. Cet outil retranscrit sous la notion de « poids environnemental » la consommation de ressources nécessaires tout au long du cycle de vie d'un produit. Cette consommation représente les prélèvements et les rejets à partir de ressources naturelles. Le « poids environnemental » se calcule en divisant les matières naturelles indispensables par unité de service ou de fonction (MIPS) par le flux annuel total de matières (TMF) [Schmidt-Bleek, 2001]. Cet outil est généralement appliqué à l'évaluation des services.

L'analyse des flux de matières (MFA) (ou Analyse des Flux de Substances – SFA) est une méthode d'évaluation environnementale qui comptabilise les flux entrants et sortants dans un système bien défini. Très utilisée en écologie industrielle, la MFA permet d'une part d'avoir une meilleure compréhension des interactions existantes entre une industrie et ses écosystèmes connexes et d'autre part de calculer des indicateurs ou encore élaborer des stratégies d'améliorations de ces flux de matières [Brunner et Rechberger, 2004]. La MFA est avant tout un outil de gestion des flux d'un système [Cikankowitz, 2008].

L'approche « empreinte » basée sur les consommations a d'abord été proposée avec l'empreinte écologique par M. Wackernagel et W. Rees dans les années 1990. Cet indice, plutôt considéré comme un indicateur de pression exercée par l'homme sur l'environnement, est estimé pour 150 nations par le Global Footprint Network et ses résultats sont publiés tous les deux ans par l'association WWF International. Il est souvent utilisé comme un moyen de communication vers le grand public du fait de sa représentation visuelle des impacts identifiés. L'Empreinte écologique correspond à une superficie théorique des sols et d'eau biologiquement productive nécessaire pour produire durablement les ressources satisfaisant les besoins d'une population donnée et pour assimiler ses déchets [Wackernagel, 1994]. A travers une unité commune, l'hectare global, hectare ayant une productivité correspondant à la moyenne mondiale. L'empreinte écologique regroupe plusieurs impacts environnementaux en un indicateur unique, en s'appuyant sur les données de consommation du système étudié. L'empreinte écologique est une mesure de la demande de l'homme sur la nature en évaluant la quantité biologiquement productive (zone terrestre et maritime) nécessaire pour maintenir un modèle de consommation donné [Boutaud et Gondran, 2009]. Cette mesure peut ensuite être comparée à la biocapacité disponible, également exprimée en zones terrestres et maritimes. Classiquement utilisée à l'échelle d'un pays, il est également possible de l'appliquer à une échelle plus fine et ainsi estimer l'empreinte écologique d'un territoire ou d'une organisation [El Bouazzaoui, 2008]. Cette précision dans l'échelle d'application, résulte notamment dans l'emploi de principes d'analyse des flux pour préciser les données à une échelle plus fine [Wiedmann et al., 2006].

L'intérêt des entreprises, des consommateurs et des décideurs politiques pour le concept d'Empreinte Ecologique est avéré [Lash et Wellington, 2007]. En dépit d'un abus de langage, le terme « Empreinte Carbone » (Carbon Footprint) est utilisé comme diminutif pour la quantité de carbone émise par une activité ou une organisation [Wiedmann et Minx, 2007]. Cependant, il existe une composante carbone de l'Empreinte Ecologique qui va au-delà en traduisant cette quantité de dioxyde de carbone en surface de forêt nécessaire pour séquestrer ces émissions [Hertwich et

Peters, 2009]. Il s'agit alors de représenter la demande que les combustions de ressources fossiles exercent sur la planète [Hammond, 2007].

Avec la problématique actuelle sur la ressource en eau, l'approche « empreinte » s'est alors déclinée sous la forme « d'empreinte eau » (« water footprint ») relative à l'importante consommation et pollution d'eau. A l'échelle mondiale, l'utilisation majoritaire de l'eau résulte de la production agricole mais une consommation non négligeable d'eau est liée aux secteurs industriels et domestiques [World Water Assessment Program, 2009]. La consommation totale d'eau et sa pollution sont généralement considérées comme la somme d'une multitude d'exigences indépendantes en eau par les diverses activités. L'idée de considérer l'utilisation de l'eau le long des chaînes d'approvisionnement a suscité un intérêt après l'introduction du concept de « l'empreinte eau » par Hoekstra en 2002 [Hoekstra, 2003]. L'empreinte eau est un indicateur de l'utilisation d'eau douce qui mesure non seulement l'utilisation directe de l'eau d'un consommateur ou un producteur, mais aussi l'utilisation indirecte de l'eau liée à la fabrication des objets qu'il consomme. Par conséquent, le consommateur final a peu conscience de la consommation d'eau et de la pollution qui peuvent être associées à un produit tout au long de sa chaîne de production et d'approvisionnement. La mise en évidence de ces volumes d'eau cachés peut permettre une meilleure compréhension de la problématique mondiale de la ressource en eau douce [Hoekstra et Chapagain, 2008]. Compréhension nécessaire pour améliorer la gestion de la ressource en eau à la surface de la Terre. L'empreinte eau est un indicateur utilisé à l'échelle des Nations et des produits.

L'empreinte eau peut être considérée comme un indicateur complet de ressources en eau douce. L'empreinte eau d'un produit représente le volume d'eau douce utilisée pour fabriquer le produit, mesurée sur la chaîne d'approvisionnement. C'est un indicateur multidimensionnel, montrant les volumes de consommation d'eau par source et les volumes pollués par type de pollution; toutes les composantes de l'empreinte totale de l'eau sont précisées géographiquement et temporellement [Hoekstra et al., 2011].

- **Synthèse des objectifs des outils d'évaluation environnementale**

Les différents outils cités ci-dessus ainsi que leurs objectifs sont synthétisés dans le Tableau 9.

Tableau 9: Objectifs principaux des outils d'évaluation environnementale étudiés

Outils	Impacts	Périmètre d'étude	Approches	Objectifs
Etude d'impacts (réglementaire)	Locaux (GES depuis 2010)	Site	Spécifique	Caractériser et quantifier les impacts environnementaux au niveau local
EPE	Planétaires Locaux	Site	Générique Spécifique	Suivre les impacts d'une activité : outil de management environnemental
ACV	Planétaires Locaux	Produit Service	Générique Spécifique	Caractériser les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie
GHG protocol Bilan Carbone[®]	Planétaires	Site Produit	Générique	Estimer les émissions de gaz à effet de serre générées directement et indirectement par une activité ou un territoire.
Empreintes Ecologique (Eau et Carbone)	Planétaires	Site Produit	Générique	Estimer les flux matériels et énergétiques générés par une activité, un service, une population ou un territoire.
MFA	Planétaires Locaux	Site	Spécifique	
MIPS	Planétaires	Produit	Générique	

2.3.2 Les indicateurs d'impact environnemental

De manière à être les plus exhaustives possible, les évaluations environnementales doivent couvrir un large ensemble d'impacts. Aucune des méthodes d'évaluation environnementale ne peut prendre en compte la totalité de ces impacts et leurs éventuelles interactions [El Bouazzaoui, 2008].

Ils ont pour objectif de représenter l'état de l'environnement, les pressions sur l'environnement (consommations de ressources naturelles, émissions, par exemple) ou les réponses apportées pour limiter les impacts. Ils peuvent décrire l'évolution d'un phénomène donné.

- **Emissions de gaz à effet de serre (unité de référence : kg CO₂-Eq)**

L'indicateur relatif aux **émissions de gaz à effet de serre** a pour objectif de décrire l'évolution (généralement l'augmentation) de la contribution des activités humaines au phénomène d'effet de serre.

L'atmosphère terrestre est composée de nombreux gaz d'origines naturelles et anthropiques. Certains de ces gaz provoquent le phénomène d'effet de serre en absorbant et émettant les radiations émises par la terre mais aussi l'atmosphère et les nuages. Les principaux gaz à effet de serre (GES) présents naturellement dans l'atmosphère terrestre sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde d'azote (N₂O), le méthane (CH₄), et l'ozone (O₃). Il existe également des GES d'origine uniquement anthropique comme les halocarbures ou encore les substances contenant du chlore et du bromure. Certains de ces gaz sont par ailleurs réglementés par le Protocole de Montréal (1987) [Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, 1987] relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone [Mulumba, 2000]. Ce protocole a pour objectif de réduire de moitié les substances qui réduisent la couche d'ozone. La Convention Climat [Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1992] a acté le fait que les pays les plus développés avaient une responsabilité historique plus forte liée aux émissions bien

plus importantes de par leur passé industriel et qu'ils devaient donc fournir des efforts plus importants (responsabilités communes mais différenciées). Le protocole de Kyoto (1997) [Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1997], fixera des objectifs de réduction par pays pour les six GES que sont le CO₂, N₂O, le CH₄, l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbures (PFC) [MEDDTL, 2011]. Notons que ces estimations évacuent les émissions d'eau (H₂O) dans l'atmosphère qui contribuent pourtant au changement climatique mais dont la part des émissions anthropiques est difficile à estimer au vu des émissions naturelles. Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) a recensé plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre, mais seuls les six gaz précités sont considérés dans le protocole de Kyoto [Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1997] et sont donc généralement pris en compte dans les méthodes d'évaluation environnementale (par exemple le GHG protocol) [Le Treut, 2003]. Ce dernier résulte d'un travail de nombreux pays dont la France pour établir des politiques de réduction ou de limitation de ces GES. L'objectif du Protocole de Kyoto est de limiter l'accroissement du phénomène d'effet de serre et de ralentir la hausse des températures à la surface de la terre. Le Tableau 10 détaille le pourcentage des émissions estimé pour chacun de ces six gaz ainsi que leurs origines anthropiques.

Afin de pouvoir comparer les différents gaz à effet de serre existant, le GIEC a défini : le **potentiel de réchauffement mondial** (PRG ou GWP *Global Warming Potential*). Cet indice représente l'effet combiné de l'efficacité des gaz à absorber le rayonnement infrarouge sortant ainsi que leur durée de vie dans l'atmosphère. Ce PRG permet d'estimer le pouvoir de réchauffement d'une masse de GES dans l'atmosphère par rapport à celui du dioxyde de carbone, l'unité de référence [MEDDTL, 2011]. Cet indice est calculé sur une durée déterminée, généralement choisie arbitrairement à 100 ans. Au départ, cette durée a été fixée par la convention-cadre des Nations Unies en 1992 qui signalait aux pays qu'ils pouvaient utiliser la période de 100 ans pour exprimer leurs projections en équivalent CO₂. Peu à peu, ce point est devenu une règle dont peu se souviennent au point que les PRG à 100 ans sont appliqués systématiquement [Dessus et al., 2008a].

Tableau 10: Les six gaz à effet de serre du Protocole de Kyoto (d'après [MEDDTL, 2011])

Gaz	Origines	PRG à 100 ans	Part des émissions (concentrations réelles)
Dioxyde de Carbone (CO₂)	Combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon) et de la biomasse ; des <i>changements d'affectation des terres</i> et autres processus industriels	1 (Gaz de référence des autres GES)	70 %
Protoxyde d'Azote (N₂O)	Activités agricoles ; Combustion de la biomasse et des produits chimiques comme l'acide nitrique	298	16%
Méthane (CH₄)	Décomposition anaérobique (sans oxygène) des déchets dans les décharges ; Digestion animale ; Décomposition des déchets animaux ; Production et distribution de gaz naturel et de pétrole ; Production de charbon ; Combustion incomplète de combustibles fossiles.	25	13%
Hydrofluorocarbures (HFC)	Utilisés dans les systèmes de réfrigération et les semiconducteurs Employés dans les aérosols et les mousses isolantes	entre 1 300 et 11 700	2%
Perfluorocarbures (PFC)	Produits dérivés de la fusion de l'aluminium et de l'enrichissement de l'uranium ; Utilisés dans la fabrication des semi-conducteurs	entre 6 500 et 9 200	
Hexafluorure de soufre(SF₆)	Utilisé dans l'industrie lourde pour isoler les Equipements à haute tension et pour la fabrication des systèmes de refroidissement des câbles.	23 900	

Tel qu'indiqué dans le Tableau 10, les gaz fluorés ne représentent que 2% des émissions de gaz à effet de serre, mais il faut tenir compte de leurs PRG qui sont très largement supérieurs à ceux des trois autres gaz. Ces PRG importants, associés à leur très longue durée de vie en font d'importants contributeurs aux changements climatiques. Cet impact se calcule selon l'Équation 1 [Houghton, 1995] :

$$Changement\ climatique = \sum_i PRG_{a,i} \times m_i \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

- a = nombre d'année (généralement fixé à 100 ans)
- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise (en kg)

Néanmoins, des critiques sont soulevées par la littérature par rapport à l'utilisation de ce PRG trop souvent employé sans les précautions nécessaires [Global Chance, 2008]. En effet, le PRG ne s'applique qu'aux émissions ponctuelles à un instant donné. De graves erreurs peuvent résulter de son utilisation sans précaution pour des mesures sur les durées. L'emploi du PRG pourrait alors minimiser l'ampleur d'une diminution des émissions de gaz à durée de vie courte, tels que le méthane, par exemple. Il est donc indispensable de prendre en considération les limites d'utilisation de ce potentiel pour comptabiliser les émissions de GES [Dessus et al., 2008a].

A force d'utilisation, il est souvent oublier que l'emploi du PRG pour évaluer des émissions suppose de faire référence à une période d'intégration pour évaluer les effets résultant de ces émissions [Global Chance, 2008]. Pour le méthane par exemple, le PRG égal à 25 n'est valable que sur une période de cent ans. Par conséquent, l'émission ponctuelle d'une tonne de méthane en 2000 ne peut être comptabilisée comme 25 tonnes équivalent CO₂ que sur la base du cumul des contributions respectives au réchauffement du méthane et du CO₂ entre 2000 et 2100. Par conséquent, pour une émission en 2020, un PRG de 25 est valable uniquement pour des effets cumulés entre 2020 et 2120 [Dessus et al., 2008a].

En 2005 la France a émis 2,65 millions de tonnes (Mt) de CH₄ et 341 Mt de CO₂. Avec un PRG à 100 ans de 25, les émissions de CH₄ sont estimées à 66 Mt de CO₂ (soit 16 % de celles de CO₂). Ce calcul est juste pour les effets intégrés jusqu'en 2105 mais ne l'est plus à l'horizon 2055. En effet, le PRG du méthane à l'horizon de cinquante ans est de 42, soit 111 Mt de CO₂ (33 % des émissions de CO₂). Par conséquent, l'émission ponctuelle de méthane de 2005 prend une importance beaucoup plus grande (elle est presque doublée) en termes d'effet sur le climat [Dessus et al., 2008b].

A ces erreurs de manipulation du PRG s'ajoutent les incertitudes pouvant exister sur une telle donnée. Le GIEC travaille sur le calcul du PRG et sur ces incertitudes, en se faisant la voix de la communauté scientifique experte dans le domaine. Dans un rapport de 2000, le GIEC aborde la problématique des incertitudes dans les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, preuve que cette comptabilité est délicate et soulève de nombreuses interrogations [GIEC, 2000]. Le travail de ce groupe d'experts a également abouti à la rédaction de plusieurs rapports (en 1990, 1995, 2001, 2007) permettant d'évaluer l'état de la recherche dans le domaine de manière méthodique, claire et objective. Ainsi, le premier rapport a confirmé les préoccupations de la communauté scientifique sur la problématique du changement climatique. Il a incité l'ONU à établir une Convention cadre sur les changements climatiques dès 1992 [Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1992]. Le second rapport (1995) a fondé les bases des négociations pour le protocole de Kyoto. Le troisième rapport (2001) fait état des questions scientifiques liées aux efforts politiques menés. Enfin, le quatrième rapport paru en 2007 présente des scénarios plus affinés que ceux présentés dans les rapports précédents. Il confirme les prévisions déjà effectuées et mentionne que le réchauffement actuel du climat est à imputer aux émissions de gaz à effet de serre résultant des activités humaines. Ce rapport précise que le réchauffement constaté est exceptionnel, tant par son ampleur que par la rapidité à laquelle il se produit.

Avec l'utilisation du PRG, la molécule de référence pour les émissions de GES est le CO₂, l'indicateur s'exprime donc en kg CO₂ équivalent. Le calcul des émissions de GES est fréquemment réalisé dans les méthodes d'évaluation environnementale. En France, la méthode la plus répandue permettant cette évaluation est celle du Bilan Carbone® de l'ADEME.

- **Epuisement de l'ozone stratosphérique (unité de référence : kg CFC-11-Eq)**

L'ozone est un composé oxygéné de formule O₃. Au niveau troposphérique, l'ozone se crée naturellement par réactions photochimiques entre différents gaz issus des activités humaines. Au niveau stratosphérique, l'ozone est créé par l'interaction entre le rayonnement ultraviolet solaire et l'oxygène moléculaire (O₂), il joue alors un rôle essentiel dans l'équilibre radiatif [Vassy, 1968]. Parmi les phénomènes affectant les équilibres planétaires, la **dégradation de la couche d'ozone**

[Rousseaux, 1993] est estimée à l'aide d'un indicateur qui cherche à évaluer la contribution du produit à cet impact. Cet indicateur se calcule en agrégeant les émissions dans l'air des composés susceptibles de réagir avec l'ozone de la stratosphère (et notamment les chlorofluorocarbures : CFC, HCFC).

Environ 90 % de l'ozone du globe terrestre se trouve dans la stratosphère, dans une zone plus couramment appelée « couche d'ozone », située entre 15 et 35 km au-dessus de la surface de la Terre, la teneur étant maximale à 25 km. La couche d'ozone sert de filtre aux rayons du soleil et notamment les ultraviolets dangereux pour la santé humaine (UV-B). Le « trou de la couche d'ozone » correspond à un important appauvrissement de cette couche au-dessus de l'Antarctique. Cet appauvrissement est lié aux conditions météorologiques particulières dans l'hémisphère austral durant le printemps ainsi qu'aux émissions de composés industriels chlorés et bromés [MEDDTL, 2011].

L'indicateur d'épuisement de l'ozone stratosphérique cherche à évaluer la contribution du produit à la destruction de la couche d'ozone. Cet indicateur se calcule en agrégeant les émissions dans l'air des composés susceptibles de réagir avec l'ozone de la stratosphère (et notamment les chlorofluorocarbures : CFC, HCFC). Un facteur de caractérisation (ODP : Ozone Depletion Potential) a été établi par l'Organisation Météorologique Mondiale (www.wmo.int) en 1992. Ce facteur permet d'exprimer le potentiel d'épuisement de l'ozone de différents gaz contribuant à l'impact de diminution de l'ozone stratosphérique (Tableau 11). Contrairement à l'impact sur le changement climatique, il n'a pas été retenu de durée sur laquelle ce coefficient s'applique. Il est donc noté ODP_{∞} .

Tableau 11: Facteurs de caractérisation (ODP_{∞}) des différents gaz contribuant à l'impact « épuisement de l'ozone stratosphérique » [Guinée et al., 2002]

Substance	ODP (in kg CFC-11 eq./kg)
1,1,1-trichloroethane	0.11
CFC-11	1.0
CFC-113	0.90
CFC-114	0.85
CFC-115	0.40
CFC-12	0.82
HBFC-2401*	0.25
HBFC-1201*	1.4
HALON-1202*	1.25
HALON-1211	5.1
HALON-1301	12
HBFC-2311*	0.14
HALON-2402*	7
HCFC-123	0.012
HCFC-124	0.026
HCFC-141b	0.086
HCFC-142b	0.043
HCFC-22	0.034
HCFC-225ca	0.017
HCFC-225cb	0.017
Methyl Bromide	0.37
Methyl Chloride	0.02
Tetrachloromethane	1.2

La molécule de référence est le CFC 11. L'indicateur de diminution de l'ozone stratosphérique s'exprime donc en **kg CFC 11 équivalent**. Il se calcule avec l'Équation 2 [World Meteorological Organisation, 1992] :

$$\text{Epuisement de l'ozone} = \sum_i \text{ODP}_{\infty,i} \times m_i \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise (en kg)

- **La pollution photochimique (kg éthylène-Eq)**

La **pollution photochimique** aussi appelée pollution photo-oxydante résulte d'une réaction dans la troposphère entre les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatiles (COV) aboutissant à la formation de polluants photochimiques. Le principal polluant photochimique est l'ozone dont la présence s'accompagne d'autres espèces aux propriétés acides ou oxydantes telles que des aldéhydes, des composés organiques nitrés, de l'acide nitrique, de l'eau oxygénée. Ce phénomène concourt à l'accroissement de la pollution par l'ozone, en hausse d'environ 1% par an sur l'ensemble de l'hémisphère nord [ADEME, 2011b].

Cette pollution, plus connu sous le terme « pic d'ozone » ou « smog photochimique » s'observe surtout en été sous l'effet du rayonnement solaire et s'observe notamment dans les régions périurbaines. Une trop grande concentration d'ozone au niveau troposphérique peut être néfaste pour les organismes vivants. L'ozone et les polluants photochimiques sont également des espèces phyto-toxiques pouvant entraîner des perturbations lors de la photosynthèse et ainsi altérer la résistance des végétaux, diminuer leur productivité, provoquer des lésions visibles. Par ailleurs, ce phénomène peut contribuer à des modifications climatiques du fait que l'ozone est un gaz à effet de serre.

Un facteur de caractérisation (POCP : Photochemical Ozone Creation Potential) permet d'exprimer la pollution photochimique [Derwent et al. 1996]. De nombreuses substances sont considérées pour l'expression de cet impact, une partie d'entre elles sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12: Facteurs de caractérisation (POCP) des différentes substances contribuant à l'impact « pollution photochimique » [Guinée et al., 2002]

Substance	comp	CAS-number	POCP (in kg ethylene eq./kg)
1,1,1-trichloroethane	air	71-55-6	0.009
1,2,3-Trimethyl Benzene	air	526-73-8	1.27
1,2,4-trimethylbenzene	air	95-63-6	1.28
1,3,5-trimethylbenzene	air	108-67-8	1.38
1,3-Butadiene	air	106-99-0	0.851
1-Butanol*	air	71-36-3	0.62
1-Butene	air	106-98-9	1.08
1-Butoxypropanol*	air	57018-52-7	0.463
1-Butyl Acetate*	air	123-86-4	0.269
1-Hexene	air	592-41-6	0.874
1-Methoxy-2-propanol*	air	107-98-2	0.355
1-Pentene	air	109-67-1	0.977
1-Propanol*	air	71-23-8	0.561
1-Propyl Benzene	air	103-65-1	0.636
1-Propylacetate*	air	109-60-4	0.282
1-Undecane	air	1120-21-4	0.384
2,2-Dimethylbutane	air	75-83-2	0.241
2,3-Dimethylbutane	air	79-29-8	0.541
2-butanone	air	78-93-3	0.373
2-Butoxy-Ethanol*	air	111-76-2	0.483
2-Ethoxy-Ethanol*	air	110-80-5	0.386
2-Methoxy-Ethanol*	air	109-86-4	0.307
2-Methyl-1-Butene	air	563-46-2	0.771
2-Methyl-2-Butene	air	513-35-9	0.842
2-Methylbutan-1-ol*	air	137-32-6	0.489
2-Methylbutan-2-ol*	air	75-85-4	0.228
2-Methylhexane	air	591-76-4	0.411
2-Methylpentane	air	107-83-5	0.42
3,5-Diethyltoluene	air	20-50-240	1.3
3,5-Dimethylethylbenzene	air	934-74-7	1.32
3-Methyl-1-Butene	air	563-45-1	0.671
3-Methylbutan-1-ol*	air	123-51-3	0.433
3-Methylbutan-2-ol*	air	598-75-4	0.406
3-Methylhexane	air	589-34-4	0.364
3-Methylpentane	air	96-14-0	0.479
3-Pentanol*	air	584-02-1	0.595
Acetaldehyde	air	75-07-0	0.641
Acetic acid	air	64-19-7	0.097
Acetone	air	67-64-1	0.094
Acetylene	air	74-86-2	0.085

La molécule de référence est l'éthylène. L'indicateur de pollution photochimique s'exprime donc en **kg éthylène équivalent**. Il se calcule avec l'Équation 3 [Derwent et al., 1996].

$$Pollution\ photochimique = \sum_i POCP_i \times m_i \quad \text{Équation 3}$$

Avec :

- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise (en kg)

- **Epuisement des ressources (kg Antimoine-Eq)**

La production énergétique mondiale découle à 80% des combustibles fossiles. Les combustibles fossiles sont des produits issus de l'accumulation et de la transformation de matières végétales pendant des millions d'années de changements géologiques. Leurs formes principales sont le gaz, le pétrole, et le charbon. Si leur combustion est une des principales sources de pollution atmosphérique, terrestre et aquatique (par des fuites lors de la production), et les transports (les marées noires), et du CO₂, la raréfaction du gaz et du pétrole est un des enjeux majeurs actuels. En France, 55% de la consommation énergétique est à attribuer aux ressources fossiles soit : 37% provenant du pétrole, 15% du gaz et 3% pour le charbon [Nauroy, 2011]. Cependant, les modes de

production et de consommations actuels reposent sur la consommation de nombreuses autres substances, organiques ou minérales, dont les ressources sont finies.

Le **prélèvement des ressources** [Moll et al., 2005] peut être estimé par l'intermédiaire d'une analyse des flux de la quantité de matière première nécessaire à la réalisation d'un produit ou activité [Janin, 2000]. L'indicateur d'épuisement des ressources tient compte des consommations de ressources énergétiques ou non énergétiques (sauf l'eau) en pondérant chaque ressource par un coefficient (ADP : Abiotic resources Depletion Potential) correspondant à un indice de rareté (l'antimoine a une valeur de 1 par convention) (Tableau 13). Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine. Les ressources dont la valeur de l'indicateur est très faible (inférieure à 0,001) sont considérées comme non épuisables à l'échelle humaine [Guinée, 1995].

Tableau 13: Facteurs de caractérisation (ADP) des différents gaz contribuant à l'impact « épuisement des ressources fossiles » [Guinée et al., 2002]

Natural resource	Cas-number	ADP (in kg antimony eq./kg)	Natural resource	Cas-number	ADP (in kg antimony eq./kg)
actinium (Ac)	7440-34-8	6.33E13	polonium (Po)	7440-08-6	4.79E14
aluminium (Al)	7429-90-5	1E-8	praseodymium (Pr)	7440-10-0	2.85E-7
antimony (Sb)	7440-36-0	1	protactinium (Pa)	??????	9.77E6
argon (Ar)	7440-37-1	4.71E-7	radium (Ra)	7440-14-4	2.36E7
arsenic (As)	7440-38-2	0.00917	radon (Rn)	???	1.2E20
barium (Ba)	7440-39-3	1.06E-10	rhenium (Re)	7440-15-5	0.766
beryllium (Be)	7440-41-7	3.19E-5	rhodium (Rh)	7440-16-6	32.3
bismuth (Bi)	7440-69-9	0.0731	rubidium (Rb)	7440-17-7	2.36E-9
boron (B)	7440-42-8	0.00467	ruthenium (Ru)	7440-18-8	32.3
bromine (Br)	7726-95-6	0.00667	samarium (Sm)	7440-19-9	5.32E-7
cadmium (Cd)	7440-43-9	0.33	scandium (Sc)	7440-20-2	3.96E-8
calcium (Ca)	7440-70-2	7.08E-10	selenium (Se)	7782-49-2	0.475
cerium (Ce)	7440-45-1	5.32E-9	silicium (Si; silicon)	7440-21-3	2.99E-11
cesium (Cs)	7440-46-2	1.91E-5	silver (Ag)	7440-22-4	1.84
chlorine (Cl)	7782-50-5	4.86E-8	Sodium (Na)	7440-23-5	8.24E-11
chromium (Cr)	7440-47-3	0.000858	strontium (Sr)	7440-24-6	1.12E-6
cobalt (Co)	7440-48-4	2.62E-5	sulfur (S)	7704-34-9	0.000358
copper (Cu)	7440-50-8	0.00194	tantalum (Ta)	7440-25-7	6.77E-5
dysprosium (Dy)	7429-91-6	2.13E-6	tellurium (Te)	13494-80-9	52.8
erbium (Er)	7440-52-0	2.44E-6	terbium (Tb)	7440-27-9	2.36E-5
europium (Eu)	7440-53-1	1.33E-5	thallium (Tl)	7440-28-0	5.05E-5
fluorine (F)	7782-41-4	2.96E-6	thorium (Th)	7440-29-1	2.08E-7
gadolinium (Gd)	7440-54-2	6.57E-7	thulium (Tm)	7440-30-4	8.31E-5
gallium (Ga)	7440-55-3	1.03E-7	tin (Sn)	7440-31-5	0.033
germanium (Ge)	7440-56-4	1.47E-6	titanium (Ti)	7440-32-6	4.4E-8
gold (Au)	7440-57-5	89.5	tungsten (W); wolfram	7440-33-7	0.0117
hafnium (Hf)	7440-58-6	8.67E-7	uranium (U)	7440-61-1	0.00287
helium (He)	7440-59-7	148	vanadium (V)	7440-62-2	1.16E-6
holmium (Ho)	7440-60-0	1.33E-5	xenon (Xe)	7440-63-3	17500
indium (In)	7440-74-6	0.00903	ytterbium (Yb)	7440-64-4	2.13E-6
iodine (I)	7553-56-2	0.0427	yttrium (Y)	7440-65-5	3.34E-7
iridium (Ir)	7439-88-5	32.3	zinc (Zn)	7440-66-6	0.000992
iron (Fe)	7439-89-6	8.43E-8	Zirconium (Zr)	7440-67-7	1.86E-5
kaliium (K;potassium)	7440-09-7	3.13E-8	crude oil	8012-95-1	0.0201
krypton (Kr)	7439-90-9	20.9	natural gas*	nv	0.0187
lanthanum (La)	7439-91-0	2.13E-8	hard coal	nv	0.0134
lead (Pb)	7439-92-1	0.0135	soft coal	nv	0.00671
lithium (Li)	7439-93-2	9.23E-6	fossil energy**	nv	4.81e-4
lutetium (Lu)	7439-94-3	7.66E-5			
magnesium (Mg)	7439-95-4	3.73E-9			
manganese (Mn)	7439-96-5	1.38E-5			
mercury (Hg)	7439-97-6	0.495			
molybdenum (Mo)	7439-98-7	0.0317			
neodymium (Nd)	7440-00-8	1.94E-17			
neon (Ne)	7440-01-9	0.325			
nickel (Ni)	7440-02-0	0.000108			
niobium (Nb)	7440-03-1	2.31E-5			
osmium (Os)	7440-04-2	14.4			
palladium (Pd)	7440-05-3	0.323			
phosphorus (P)	7723-14-0	8.44E-5			
platinum (Pt)	7440-06-4	1.29			

* In kg antimony/m³ natural gas!
** In kg antimony/MJ fossil energy!

L'indicateur est calculé en faisant la somme pondérée (par les coefficients de rareté) des quantités consommées par le produit pendant tout son cycle de vie (Équation 4) [Guinée, 1995]. Donc, plus cet

indicateur est grand plus le produit "épuise" les ressources. Il s'exprime classiquement en **kg antimoine équivalent**.

$$Epuisement\ des\ ressources = \sum_i ADP_i \times m_i \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise (en kg sauf pour les gaz naturels ou les énergies fossiles)

- **Acidification (kg SO₂-Eq)**

L'acidification correspond à l'augmentation de l'acidité d'un sol, d'un cours d'eau ou de l'air en raison des activités humaines. Ce phénomène peut modifier les équilibres chimiques et biologiques et affecter gravement les écosystèmes. L'augmentation de l'acidité de l'air est principalement due aux émissions de SO₂, NOx et HCl, lesquels, par oxydation, donnent les acides HNO₃ et H₂SO₄. Les pluies acides qui en résultent ont un pH voisin de 4 à 4,5. Comme pour les autres impacts, un potentiel d'acidification (AP : Acidification Potential) est employé pour le calculer [Heijungs et al., 1992]. Il permet d'exprimer les différentes substances sous une seule unité, le **kg de SO₂ équivalent** (Tableau 14).

Tableau 14: Facteurs de caractérisation (AP) des différentes substances contribuant à l'impact acidification [Guinée et al., 2002]

Substance	CAS number	AP (in kg SO ₂ eq./kg)
ammonia	7664-41-7	1.88
hydrogen chloride	7664-01-0	0.88
hydrogen fluoride	7664-39-3	1.60
hydrogen sulfide	7783-06-4	1.88
nitric acid	7697-37-2	0.51
nitrogen dioxide	10102-44-0	0.70
nitrogen monoxide	10102-43-9	1.07
nitrogen oxides	10102-44-0	0.70
phosphoric acid	7664-38-2	0.98
sulfur dioxide	7446-09-5	1.00
sulfur trioxide	7446-11-9	0.80
sulphuric acid	7664-93-9	0.65

L'indicateur d'acidification est calculé à l'aide de l'Équation 5 [Heijungs et al., 1992].

$$Acidification = \sum_i AP_i \times m_i \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise (en kg sauf pour les gaz naturels ou les énergies fossiles)

- **Eutrophisation (kg PO₄³⁻-Eq)**

Le phénomène d'**eutrophisation** [ISO 14040, 2006], bien que naturel, est accentué par l'activité humaine lorsque le milieu reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent. Les principaux nutriments à l'origine de ce phénomène sont le phosphore (contenu dans les phosphates) et l'azote (contenu dans l'ammonium, les nitrates, et les nitrites). Il est donc considéré comme un impact environnemental aboutissant à des perturbations importantes des écosystèmes.

Comme pour les autres impacts, un potentiel d'eutrophisation (EP : Eutrophication Potential) est employé pour le calculer [Heijungs et al., 1992]. Il permet d'exprimer les différentes substances sous une seule unité, le **kg PO₄³⁻ équivalent** (Tableau 15).

Tableau 15: Facteurs de caractérisation (EP) des différentes substances contribuant à l'impact eutrophisation [Guinée et al., 2002]

Substance	CAS number	EP (in kg PO ₄ ³⁻ eq./kg)
ammonia	7664-41-7	0.35
ammonium	14798-03-9	0.33
nitrate	14797-55-8	0.1
nitric acid	7697-37-2	0.1
nitrogen	7727-37-9	0.42
nitrogen dioxide	10102-44-0	0.13
nitrogen monoxide	10102-43-9	0.2
nitrogen oxides	10102-44-0	0.13
phosphate	7664-38-2	1
phosphoric acid (H ₃ PO ₄)	7664-38-2	0.97
phosphorus (P)	7723-14-0	3.06
phosphorus(V) oxide (P ₂ O ₅)	1314-56-3	1.34
chemical oxygen demand (COD) ¹	-	0.022

L'indicateur d'eutrophisation est calculé à l'aide de l'Équation 6 [Heijungs et al., 1992].

$$Eutrophisation = \sum_i EP_i \times m_i \quad \text{Équation 6}$$

Avec :

- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise

- **Ecotoxicité (kg 1,4-DCB-Eq)**

L'écotoxicité est la propriété d'une substance de provoquer des effets néfastes sur les organismes vivants ou leur physiologie (effet au niveau biochimique) et leur organisation fonctionnelle (écosystème). Il existe plusieurs indicateurs d'écotoxicité selon le milieu récepteur pris en compte. Cet indicateur peut donc être décomposé en cinq sous-indicateurs :

- l'écotoxicité aquatique d'eau douce pour l'eau (FAETP : *Fresh water Aquatic EcoToxicity Potential*)
- l'écotoxicité aquatique d'eau douce pour les sédiments (FSETP : *Freshwater Sediment EcoToxicity Potential*)

- l'écotoxicité aquatique d'eau de mer pour l'eau (MAETP : *Marine Aquatic EcoToxicity Potential*)
- l'écotoxicité aquatique d'eau de mer pour les sédiments (MSETP : *Marine Sediment EcoToxicity Potential*)
- l'écotoxicité terrestre (TETP : *Terrestrial EcoToxicity Potential*)

Cet indicateur est comptabilisé en **kg de 1,4-dichlorobenzène équivalent**, considéré comme substance de référence. Les facteurs de caractérisation de certaines autres substances contribuant à cet impact sont mentionnés dans le Tableau 16 [Guinée et al., 2002].

Tableau 16: Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact écotoxicité (extrait du tableau) [Guinée et al., 2002]

Substance	Comp.	CAS number	FAETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	MAETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	FSETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	MSETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	TETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)
1,1,1-trichloroethane	air	71-55-6	1.2E-04 ¹	3.0E-01	1.0E-04	1.0E-01	1.8E-04
1,2,3,4-tetrachlorobenzene	air	634-66-2	1.0E-01	1.7E+01	1.2E-01	6.9E+00	9.9E-03
1,2,3,5-tetrachlorobenzene	air	634-90-2	7.3E-02	1.8E+01	8.1E-02	7.0E+00	1.8E-01
1,2,3-trichlorobenzene	air	87-61-6	8.5E-03	2.1E+00	9.3E-03	8.5E-01	7.5E-02
1,2,4,5-tetrachlorobenzene	air	95-94-3	7.3E-02	1.5E+01	8.5E-02	6.1E+00	2.4E-01
1,2,4-trichlorobenzene	air	120-82-1	9.9E-03	2.0E+00	1.1E-02	8.4E-01	8.8E-03
1,2-dichlorobenzene	air	95-50-1	2.9E-03	6.7E-01	2.7E-03	2.8E-01	5.3E-04
1,2-dichloroethane	air	107-06-2	1.2E-04	8.2E-02	1.0E-04	3.1E-02	2.6E-05
1,3,5-trichlorobenzene	air	108-70-3	1.6E-02	3.0E+00	1.7E-02	1.3E+00	1.9E-03
1,3-Butadiene	air	106-99-0	3.3E-07	2.7E-06	2.2E-07	3.0E-06	2.3E-08
1,3-dichlorobenzene	air	541-73-1	2.4E-03	4.6E-01	2.2E-03	2.0E-01	4.4E-04
1,4-dichlorobenzene	air	106-46-7	2.4E-03	7.4E-01	2.4E-03	2.9E-01	1.2E-02

Il n'a pas été retenu de durée sur laquelle ce coefficient s'applique. L'indicateur d'écotoxicité est calculé à l'aide des équations 7 à 11 [Huijbregts, 1999] et [Huijbregts et al., 2000].

$Ecotoxicité\ aquatique\ d'eau\ douce\ pour\ l'eau = \sum_i \sum_{ecom} FAETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i}$	Équation 7
$Ecotoxicité\ aquatique\ d'eau\ de\ mer\ pour\ l'eau = \sum_i \sum_{ecom} MAETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i}$	Équation 8
$Ecotoxicité\ aquatique\ d'eau\ douce\ pour\ les\ sédiments = \sum_i \sum_{ecom} FSETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i}$	Équation 9
$Ecotoxicité\ aquatique\ d'eau\ marine\ pour\ les\ sédiments = \sum_i \sum_{ecom} MSETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i}$	Équation 10
$Ecotoxicité\ terrestre = \sum_i \sum_{ecom} TETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i}$	Équation 11

Avec :

- i = substance considérée
- $ecom$ = émission dans le compartiment considéré (air, eau douce, eau de mer, terre agricole ou terre industrielle)
- $m_{ecom,i}$ = quantité de substance i émise dans le compartiment considéré

En fonction du type de communication qui vaudra être réalisée sur les résultats un indicateur agrégé représentant l'écotoxicité (les cinq sous-indicateurs réunis) pourra être envisagé. Ce regroupement permettra une vision globale mais engendrera une perte d'information quant à la répartition des impacts d'écotoxicité sur les différents écosystèmes.

- **Toxicité humaine (kg 1,4-DCB-Eq)**

L'absorption de produits chimiques par un organisme peut provoquer des effets biologiques bénéfiques (exemple de l'amélioration de la santé d'un individu après absorption d'un médicament) ou néfastes (exemple d'une atteinte pulmonaire après inhalation d'un gaz corrosif) [Lapointe, 2004]. Ainsi, l'indicateur de **toxicité humaine** [ISO 14040, 2006] permet de montrer la capacité ou la propriété que peut posséder une substance pouvant causer des effets néfastes au corps humain. Ces effets néfastes correspondent à la notion d'effet toxique [Jolliet et al., 2010]. L'effet toxique néfaste est lié à divers paramètres comme la dose, le mode d'absorption, la gravité des lésions provoquées et le temps relatif à l'apparition des lésions. Ces paramètres permettent de distinguer un effet aigu (temps court d'apparition d'une lésion) d'un effet chronique (temps d'exposition long). De même, il est possible de différencier un effet local, apparu au niveau du point de contact avec la substance et un effet systémique qui induit une réponse de l'organisme à un autre endroit que le point de contact avec la substance [Lapointe, 2004].

La toxicité humaine diffère de l'écotoxicité par le fait qu'il s'agit d'un impact sur l'homme en particulier (et non sur les autres organismes vivants – faunes et flores – et l'écosystème). L'indicateur de toxicité humaine est comptabilisé en **kg de 1,4-dichlorobenzène équivalent**, considéré comme substance de référence. Des facteurs de caractérisation des autres substances contribuant à cet impact sont mentionnés dans le Tableau 17 [Guinée et al., 2002].

Tableau 17 : Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact toxicité humaine (extrait du tableau) [Guinée et al., 2002]

Substance	Comp.	CAS number	HTP	
			(inf) (kg 1,4- DCB eq./kg)	(100 yr) (kg 1,4- DCB eq./kg)
chlormequat-chloride	fresh water	999-81-5	8.3E-01	8.3E-01
fenpropimorph	fresh water	67306-03-0	1.1E+03	1.1E+03
fluroxypyr	fresh water	69377-81-7	5.0E-02	5.0E-02
epoxiconazole	fresh water	??	1.0E+02	1.0E+02
ethylene oxide	fresh water	75-21-8	1.1E+04	1.1E+04
hydrogen fluoride	fresh water	7664-39-3	3.6E+03	9.4E+00
1,1,1-trichloroethane	seawater	71-55-6	9.6E+00	9.6E+00
1,2,3,4-tetrachlorobenzene	seawater	634-66-2	3.0E+01	3.0E+01
1,2,3,5-tetrachlorobenzene	seawater	634-90-2	2.5E+01	2.5E+01
1,2,3-trichlorobenzene	seawater	87-61-6	6.2E+01	6.2E+01
1,2,4,5-tetrachlorobenzene	seawater	95-94-3	3.0E+01	3.0E+01
1,2,4-trichlorobenzene	seawater	120-82-1	5.6E+01	5.6E+01
1,2-dichlorobenzene	seawater	95-50-1	4.1E+00	4.1E+00
1,2-dichloroethane	seawater	107-06-2	5.5E+00	5.5E+00
1,3,5-trichlorobenzene	seawater	108-70-3	5.4E+01	5.4E+01
1,3-Butadiene	seawater	106-99-0	4.5E+02	4.5E+02
1,3-dichlorobenzene	seawater	541-73-1	3.0E+01	3.0E+01
1,4-dichlorobenzene	seawater	106-46-7	4.7E-01	4.7E-01
1-chloro-4-nitrobenzene	seawater	100-00-5	2.2E+02	2.2E+02
2,3,4,6-tetrachlorophenol	seawater	58-90-2	2.6E-01	2.6E-01

Il n'a pas été retenu de durée sur laquelle ce coefficient s'applique. L'indicateur de toxicité humaine est calculé à l'aide de l'Équation 12 [Huijbregts, 1999] et [Huijbregts et al., 2000].

$$\text{Toxicité humaine} = \sum_i \sum_{ecom} HTP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad \text{Équation 12}$$

Avec :

- i = substance considérée
- $ecom$ = émission dans le compartiment considéré (air, eau douce, eau de mer, terre agricole ou terre industrielle)
- $m_{ecom,i}$ = quantité de substance i émise dans le compartiment considéré
- **Radiation ionisante (DALYs)**

Les radiations ionisantes transfèrent l'énergie dans les tissus vivants et interfèrent ainsi avec la structure des molécules. Dans les organismes vivants, cette énergie transférée peut perturber ou détruire les fonctions cellulaires ou encore changer le code génétique de ces cellules [Frischknecht et al., 2000].

Cet impact des rayonnements ionisants couvre les impacts résultant de rejets de substances radioactives ainsi que l'exposition directe à leurs radiations. Les radiations ionisantes présentent des effets indésirables. Elles sont susceptibles d'avoir un impact sur les tissus vivants, de façon immédiate ou retardée. L'évaluation de cet effet délétère sur l'organisme est particulièrement complexe à faire. L'exposition à ces rayonnements est nocive pour les êtres humains et les animaux, cet impact affecte donc la santé humaine, l'environnement et les ressources naturelles [Servent et al., 2005]. Certains des effets liés aux radiations ionisantes sont avant tout le résultat de la dose de radiations reçues par l'organisme. D'autres effets font suite au mode de radiation : inhalation, ingestion etc.

Les rayonnements ionisants sont exprimés en termes de nombre d'atomes désintégrés (ou décomposés) par unité de temps. L'unité internationale de la radioactivité est le becquerel (Bq), un Bq correspondant à une désintégration par seconde. La radioactivité d'une substance est alors exprimée en Bq.kg⁻¹ ou Bq.l⁻¹. La radioactivité décline toujours avec le temps. Le temps pris pour que la radioactivité d'une substance donnée diminue de moitié est connue comme la « demi-vie » de la substance [Servent et al., 2005].

Le facteur de caractérisation des substances contribuant à l'impact « radiation ionisante » prend en considération le compartiment dans lequel les émissions ont lieu et s'exprime en émission de becquerel par an. Ces facteurs sont mentionnés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Facteur de caractérisation des substances contribuant à l'impact radiation ionisante [Guinée et al., 2002]

Substance	comp.	Damage factor yr.kBq ⁻¹
Carbon-14 (C-14)	air	2.10E-7 ¹
Cesium-134 (Cs-134)	air	1.20E-8
Cesium-137 (Cs-137)	air	1.30E-8
Cobalt-58 (Co-58)	air	4.30E-10
Cobalt-60 (Co-60)	air	1.60E-8
hydrogen-3 (H-3)	air	1.40E-11
Iodine-129 (I-129)	air	9.40E-7
Iodine-131 (I-131)	air	1.60E-10
Iodine-133 (I-133)	air	9.40E-12
Krypton-85 (Kr-85)	air	1.40E-13
Lead-210 (Pb-210)	air	1.50E-9
Plutonium alpha (Pu alpha)	air	8.30E-8
Plutonium-238 (Pu-238)	air	6.70E-8
Polonium-210 (Po-210)	air	1.50E-9
Radium-226 (Ra-226)	air	9.10E-10
Radon-222 (Rn-222)	air	2.40E-11
Th-230	air	4.50E-8
Uranium-234 (U-234)	air	9.70E-8
Uranium-235 (U-235)	air	2.10E-8
Uranium-238 (U-238)	air	8.20E-9
Xe-133	air	1.40E-13
Ag-110m	fresh water	5.10E-10
Antimony-124 (Sb-124)	fresh water	8.20E-10
Cesium-134 (Cs-134)	fresh water	1.40E-7
Cesium-137 (Cs-137)	fresh water	1.70E-7
Cobalt-58 (Co-58)	fresh water	4.10E-11
Cobalt-60 (Co-60)	fresh water	4.40E-8
H-3	fresh water	4.50E-13
Iodine-131 (I-131)	fresh water	5.10E-10
manganese-54 (Mn-54)	fresh water	3.10E-10
Radium-226 (Ra-226)	fresh water	1.30E-10
Uranium-234 (U-234)	fresh water	2.40E-9
Uranium-235 (U-235)	fresh water	2.30E-9
Uranium-238 (U-238)	fresh water	2.30E-9
Am-241	sea water	3.10E-8
Antimony-125 (Sb-125)	sea water	1.50E-11
Carbon-14 (C-14)	sea water	1.20E-9
Cesium-134 (Cs-134)	sea water	7.90E-8
Cesium-137 (Cs-137)	sea water	7.90E-8
Cm alpha	sea water	5.70E-8
Cobalt-60 (Co-60)	sea water	3.90E-10
H-3	sea water	6.90E-14
Iodine-129 (I-129)	sea water	1.00E-7
Plutonium alpha (Pu alpha)	sea water	7.40E-9
Ru-106	sea water	1.40E-10
Sr-90	sea water	4.00E-12
Uranium-234 (U-234)	sea water	2.30E-11
Uranium-235 (U-235)	sea water	2.50E-11
Uranium-238 (U-238)	sea water	2.30E-11

L'indicateur de radiation ionisante est comptabilisé en **DALYs** (*Disability Adjusted Life Year*). Les DALYs représentent les années de vie ajustées sur l'incapacité. Soit la somme des années de vie potentiellement perdues en raison d'une mortalité prématurée et des années de vie productives perdues en raison d'incapacités [Guinée et al., 2002].

L'indicateur de radiation ionisante est basé sur cette notion de DALYs et est calculé à l'aide de l'Équation 13 [Frischknecht et al., 2000].

$$Radiation\ ionisante = \sum_{ecomp} \sum_i Damage\ Factor_{ecomp,i} \times a_{ecomp,i} \quad \text{Équation 13}$$

Avec :

- i = substance considérée
- $ecomp$ = émission dans le compartiment considéré (air, eau douce, eau de mer)
- $a_{ecomp,i}$ = activité de la substance i émise dans le compartiment considéré (en kBq)

Les **impacts locaux**, tels que le **bruit** (mesuré en décibels) ou les **odeurs** [Journal Officiel de la République Française, 1976] sont des impacts non négligeables, bien que peu souvent considérés dans les outils d'évaluation actuels.

Les indicateurs agrégés sont des indicateurs couramment utilisés dans les méthodes d'évaluation environnementale car ils permettent de rendre compte d'un impact sous une unité unique. Ils rassemblent donc les impacts de différentes substances contribuant au même impact. Ils sont calculés à partir d'hypothèses et de conventions disponibles dans des bases de données.

Les impacts environnementaux considérés dans les méthodes d'évaluation environnementale sont fonction des objectifs de l'étude. Ils permettent d'exprimer les impacts environnementaux les plus représentatifs pour le périmètre de l'étude envisagé.

2.3.3 L'évaluation des impacts environnementaux : Impacts intermédiaires (midpoint) et catégories de dommages (endpoint)

Comme indiqué précédemment, il existe plusieurs méthodes d'évaluation des impacts. Leur but est de relier les données d'inventaire aux impacts environnementaux causés par les substances inventoriées. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de rassembler les résultats d'inventaires ayant des effets similaires (comme l'ensemble des flux de substances ayant un effet sur la concentration de gaz à effet de serre par exemple). Ce regroupement dans des catégories d'impact constitue un niveau intermédiaire, ces catégories sont appelées des **catégories intermédiaires** (midpoint categories). A chacune d'elle correspond un indicateur : **l'indicateur intermédiaire** (midpoint indicator) permettant la comparaison des différents flux et leur caractérisation par rapport aux substances identifiées dans l'inventaire. Le terme « intermédiaire » exprime le fait que ce point se trouve quelque part sur la voie d'impact entre les résultats d'inventaires et les dommages [Jolliet et al., 2010].

Pour passer à la phase suivante, une étape supplémentaire est possible afin d'attribuer les différentes catégories intermédiaires déterminées précédemment à une ou plusieurs catégories de dommages. La Figure 15 représente le schéma général du cadre méthodologique liant les résultats d'inventaires aux catégories de dommages au travers des catégories intermédiaires [Jolliet et al., 2010]. Ces catégories considèrent les dommages sur les différents compartiments à protéger comme l'homme, le sol, l'air... La catégorie de dommages est représentée par un indicateur de dommages.

L'idée de ce cadre d'analyse est que le créateur d'une méthode d'analyse d'impact ou l'utilisateur peut choisir de s'arrêter au niveau intermédiaire ou au contraire aller jusqu'au niveau des dommages (Eco-indicator 99 par exemple). La tendance sera vraisemblablement d'offrir les deux alternatives au sein d'une même méthode, comme c'est le cas dans IMPACT 2002+ [Jolliet et al., 2010].

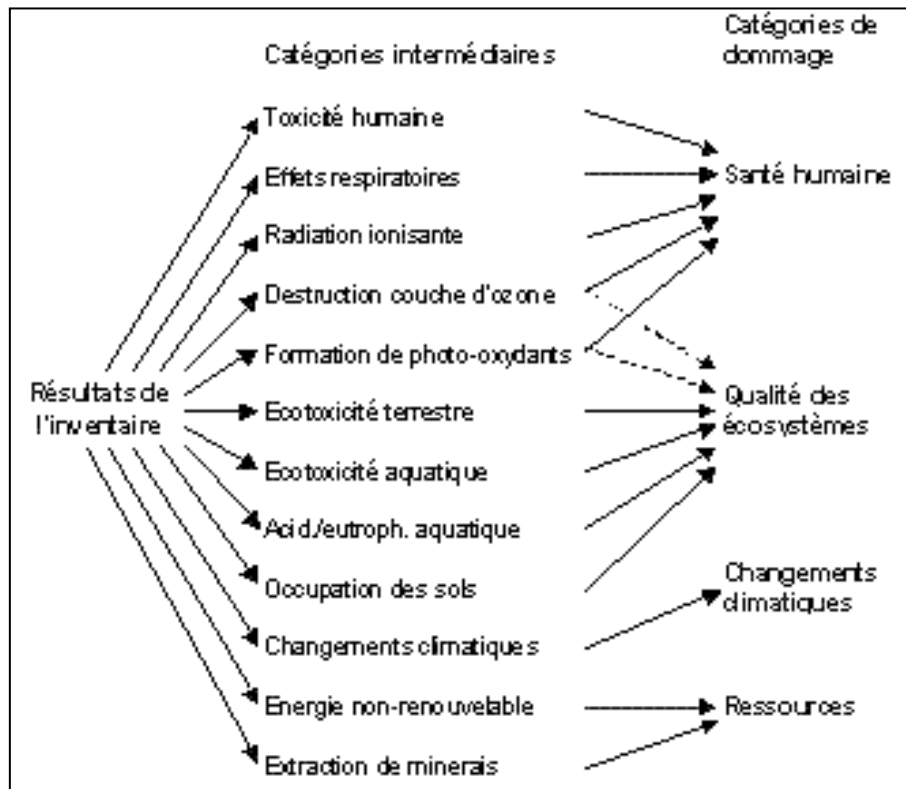


Figure 15 : Structure générale du cadre d'évaluation d'impact du cycle de vie [Jolliet et al., 2010]

En respectant ce cadre méthodologique, l'évaluation des impacts se déroule en trois étapes : la classification des émissions et des extractions, la caractérisation intermédiaire et la caractérisation des dommages.

L'étape de classification permet de définir une série de catégories d'impacts environnementaux intermédiaires. Les émissions et extractions de substances contribuant aux effets sur l'environnement retenus sont ensuite séparées (ou classées) dans les catégories d'impact correspondantes. Une émission peut contribuer à plusieurs catégories.

La caractérisation intermédiaire d'un polluant donné permet de pondérer les différentes émissions et extractions au sein de chaque catégorie intermédiaire auxquelles elles contribuent. Pour exprimer l'importance relative des différentes émissions au sein d'une même catégorie d'impact, les facteurs de caractérisation sont utilisés. Ces facteurs sont déterminés pour chaque substance et ont fait l'objet d'une présentation dans le chapitre 1 de ce manuscrit. Ils correspondent à un calcul reliant la masse de la substance considérée au facteur de caractérisation afin d'obtenir le score de l'impact intermédiaire concerné (Équation 14). Ils sont souvent exprimés en kg équivalent d'une substance de référence. C'est en appliquant cela que toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, HFC, CFC, méthane,...) sont ramenées à une émission en kg équivalent CO₂.

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \times M_s$$

Équation 14
[Jolliet et al., 2010]

Avec :

- SI_i = le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i
- $FI_{s,i}$ = le facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie intermédiaire i
- M_s = la masse émise ou extraite de la substance s

Pour obtenir les dommages, l'étape de caractérisation des dommages doit être effectuée dans un second temps. Cette étape permet d'évaluer la contribution des catégories intermédiaires à une ou plusieurs catégories de dommages engendrés. Pour cela, les dommages engendrés par une unité des différentes substances de référence (facteurs de caractérisation de dommages) sont multipliés par les scores d'impacts intermédiaires (résultat obtenu par l'Équation 14), ce calcul est présenté dans l'Équation 15. L'objectif est d'obtenir le score de caractérisation de dommages pour chaque catégorie de dommages.

$$SD_d = \sum_i FD_{i,d} \times SI_i$$

Équation 15
[Jolliet et al., 2010]

Avec :

- SD_d = le score de caractérisation de dommages pour la catégorie d
- $FD_{i,d}$ = le facteur de caractérisation de dommages reliant la catégorie i à la catégorie de dommages d
- SI_i = le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i

2.3.4 L'éco-efficience

Dans le monde industriel, la recherche de l'éco-efficacité passe par la réduction des résidus et de la pollution ainsi que par une diminution de la consommation énergétique et des ressources. Ainsi, l'éco-efficacité a l'avantage de contribuer à la protection de l'environnement. Néanmoins, afin de rendre ce concept plus fonctionnel, le conseil mondial des entreprises pour le développement durable (WBCSD) a proposé le terme « éco-efficience », pour « eco-efficiency » en anglais, lors du Sommet de la Terre de Rio de 1992. Cette notion a été formalisée dans le rapport « Changing course » de 1992 [Schmidheiny, 1992].

L'éco-efficience désigne l'efficacité avec laquelle les ressources naturelles (minérales, énergétiques et biologiques) sont utilisées par les systèmes industriels afin de proposer des produits ou des services à un prix concurrentiel tout en exerçant le moins de pressions sur l'environnement [Lehni, 2000]. Il s'agit alors de créer plus de valeur avec moins d'impacts, ce qui signifie [Madden et al., 2005] :

- réduire les incidences pour l'environnement liées à la production des produits ou services ;
- respecter la capacité de renouvellement des écosystèmes;
- diminuer l'usage des ressources et de l'énergie des produits et des services, tout au long de leur cycle de vie.

Pour assurer ces objectifs, sept facteurs ont été identifiés [Lehni, 2000] :

- réduire l'intensité matérielle des biens et des services
- réduire l'intensité énergétique des biens et services
- réduire la dispersion des substances toxiques
- améliorer la recyclabilité des matériaux
- optimiser l'utilisation des ressources renouvelables
- augmenter la viabilité des biens et services
- augmenter l'intensité de service des biens et services

Le calcul de l'éco-efficience fait donc intervenir à la fois les caractéristiques techniques du produit ou service et leurs conséquences sur l'environnement. Deux équations sont possibles en fonction des objectifs à atteindre (Équation 16 et Équation 17) [Lehni, 2000] :

$\text{Eco - efficience} = \frac{\text{Valeur des services ou produits}}{\text{Influence sur l'environnement}}$	Équation 16
$\text{Eco - efficience} = \frac{\text{Influence sur l'environnement}}{\text{Valeur des services ou produits}}$	Équation 17

Cette équation a été utilisée à plusieurs reprises dans des études à la suite de l'application d'une méthode d'évaluation environnementale afin de quantifier la rentabilité économique d'une action, d'un process industriel, d'un produit en y associant les pressions sur l'environnement qui en résulte [Burritt et Saka, 2006] [Maxime et al., 2006] [Taeko, 2007] [Cha et al., 2008].

Particulièrement pertinent dans un contexte d'aide à la décision pour les informations qu'il transmet, le calcul d'un indicateur d'éco-efficience s'avère d'autant plus utile qu'il permet une comparaison de différents scénarii dont l'expression finale sous forme graphique permet d'améliorer la compréhension des résultats [Taeko, 2007] [Cha et al., 2008].

2.3.5 Champs d'application des méthodes d'évaluation environnementale

Les démarches varient en fonction du périmètre auquel elles se rapportent. En effet, la revue des différents outils existants montre qu'il est possible d'évaluer un procédé, un projet ou un produit, une organisation (entreprise, collectivité) ou un territoire.

Lorsqu'il s'agit d'un **procédé**, la méthode d'évaluation des impacts environnementaux doit prendre en considération l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation de ce procédé. Pour cela, les différents flux nécessaires sont détaillés et insérés dans un modèle permettant d'être le plus exhaustif possible [Ritthoff et al., 2002]. L'outil le plus pertinent pour considérer les impacts d'un procédé semble être l'ACV car il est capable de décomposer le procédé sous forme de processus élémentaires auquel les flux élémentaires entrants et sortants sont rattachés, permettant ainsi une évaluation la plus exhaustive possible [Aissani, 2008]. Il en va de même pour un **produit** qui peut être décomposé selon les différentes étapes de son cycle de vie [ISO 14040, 2006]. A chacune de ces dernières, les flux seront alors identifiés afin que l'évaluation puisse être réalisée.

A l'échelle d'une **organisation**, outre le point de passage obligé que constitue l'étude d'impact réglementaire lorsque l'entreprise est une ICPE soumise à autorisation, les outils de type

management peuvent alors s'avérer plus cohérents afin de prendre en considération à la fois la situation de l'organisation mais aussi les évolutions possibles : en renforçant les points forts et en agissant concrètement sur les points faibles. Dans ce contexte, les outils tels que l'analyse environnementale initiale de l'ISO 14 031 et le Bilan Carbone® apparaissent alors les plus répandus actuellement.

En considérant désormais une échelle d'application plus large comme un **territoire**, des outils basés sur des données statistiques sont appliqués : Bilan Carbone®, Empreinte écologique [Wackernagel, 1994], par exemple.

Ainsi, à chaque outil correspond un périmètre d'application. Pour un **procédé** ou un **produit**, les outils les plus adaptés semblent être les outils basés sur l'analyse des flux entrants et sortants : l'ACV, MIPS et la MFA par exemple. Pour une **organisation**, il s'agira de l'ISO 14 031 et du Bilan Carbone®. Alors que pour un **territoire**, des outils exploitant des données statistiques sur la population du territoire sont privilégiés (exemple le Bilan Carbone®).

Les différents périmètres (Scopes) pris en compte concernent autant les activités internes à l'organisation que celles générées par les activités de l'ensemble de la chaîne de valeur (par exemple les phases de production et de fin de vie pour un produit). Ces postes sont regroupés en trois périmètres [ISO 14064, 2006] :

- **Scope 1** : Les émissions directes de GES proviennent des installations fixes ou mobiles situées à l'intérieur de ou possédées par l'organisation (périmètre de l'étude) ;
- **Scope 2** : Les émissions à énergies indirectes correspondent aux émissions associées à la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importée pour les activités de l'organisation.
- **Scope 3** : L'ensemble des autres émissions indirectes sont produites indirectement par les activités de l'organisation qui ne sont pas comptabilisées dans les scopes 1 et 2 mais qui sont liées à la chaîne de valeur complète.

Notons que l'approche réglementaire française d'émissions de GES concerne seulement les scopes 1 et 2 [Journal Officiel de la République Française, 2011].

Mais le découpage ne se fait pas systématiquement selon le périmètre de l'étude mais peut concerner l'approche établie. Dans le cas de la MFA :

- à échelle **nationale** ou **régionale**, la méthode peut également se nommer Comptabilité des Flux de Matières (Material Flow Accounting). A ce niveau, ce sont les échanges de matières entre une économie et l'environnement naturel qui sont analysés. Les indicateurs calculés permettent alors une évaluation du niveau de pression sur les ressources du système.
- à l'échelle d'une **entreprise**, l'objectif d'une MFA est d'optimiser les processus de production (matière et énergie utilisées).
- appliquée à l'échelle d'un **produit**, la MFA correspond à la phase d'inventaire de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

La méthode MIPS a été établie pour évaluer un service et non un produit. Par ce point, il diffère des autres méthodes précédemment citées (exceptée l'ACV). Pour évaluer ce service rendu, il considère sa consommation de ressources. L'approche service est relativement peu répandue dans les méthodes d'évaluation environnementale [Leduc et Raymond, 2000] [Raymond, 2009]. Cependant,

du fait que l'industrie du service se développe comment ces organisations peuvent évaluer leurs impacts sur l'environnement si les outils ne sont pas adaptés ? De plus, dans le domaine des équipements informatiques, de nombreuses sociétés ne sont plus propriétaires de leurs équipements, les contrats de location avec maintenance sont courants. Ainsi, en tant qu'utilisateur des équipements, les entreprises deviennent responsables des impacts qui leurs sont liés. Par conséquent, une méthode d'évaluation environnementale des services informatiques au sein d'une organisation doit être mise en place dans ce contexte.

2.3.6 Avantages des outils d'évaluation

Les avantages des outils d'évaluation sont nombreux et touchent divers domaines comme les impacts évalués, la manière de les exprimer ou encore la communication qui peut en découler.

Lorsqu'il est question d'environnement, la **communication** reste un avantage certain. Dans le cas de l'étude d'impact réglementaire, le résumé non technique facilite la présentation des résultats au public [El Bouazzaoui, 2008] lors de la phase d'enquête publique où les résultats sont accessibles à toute la population qui souhaite en prendre connaissance. L'EPE, véritable outil de management est supposée permettre l'établissement d'un dialogue avec les différentes parties prenantes.

La communication établie lors de la réalisation d'un Bilan Carbone® n'est pas du même ordre puisqu'il s'agit de communiquer vers l'extérieur les résultats de l'analyse afin de montrer d'une part que l'étude a été réalisée et d'autre part pour indiquer les objectifs devant être atteints par la suite.

L'expression de **plusieurs impacts** peut constituer un important atout pour un outil d'évaluation environnementale. Symbole d'une prise en compte de plusieurs catégories d'impacts, les résultats permettent une évaluation globale de l'ensemble de l'activité, organisation et / ou territoire vis-à-vis d'un panel d'impacts. Un panel se voulant être plus représentatif qu'un seul indicateur qui aura tendance à ne pas considérer tous les impacts ou à perdre de l'information suite à l'agrégation de résultats. De même, les informations présentées peuvent être de différentes natures. C'est ainsi que dans l'étude d'impact réglementaire, les informations peuvent laisser apparaître le coût financier des solutions d'améliorations ou encore l'explication des mesures compensatoires prévoyant d'être mises en œuvre. En outre, dans l'environnement, les interactions entre différents phénomènes sont multiples ainsi les phénomènes existants ne sont pas indépendants les uns des autres et seule l'utilisation de plusieurs indicateurs environnementaux peut permettre de les évaluer. De plus, il n'existe aucune certitude dans les valeurs des impacts du fait de la complexité des phénomènes pouvant se produire. Les impacts environnementaux exprimés représentent donc des impacts potentiels. Néanmoins, la représentation de ces divers impacts sous différents indicateurs vise à représenter une image plus fidèle à ce qui se passe en réalité (par comparaison avec l'utilisation d'un seul indicateur d'impact environnemental).

Cependant, les méthodes MIPS, BC®, GHG protocol et Empreinte Ecologique utilisent un **indicateur agrégé**. Cette présentation des résultats peut s'avérer être un atout non négligeable pour un outil d'évaluation environnementale. En effet, l'avantage de l'indicateur agrégé réside dans le fait d'obtenir une note finale globale pouvant alors être mise en parallèle avec la note obtenue lors d'une précédente évaluation ou pour un autre établissement par exemple. La comparabilité de l'indicateur agrégé en fait un atout important, atout d'autant plus marqué si cet indicateur s'exprime sous une unité pédagogique, facilement compréhensible par tous. On peut citer comme exemple une

déclinaison de l'outil MIPS, le sac à dos écologique, qui convertit les impacts environnementaux en un poids.

L'empreinte écologique présente également cet aspect pédagogique, d'autant plus que cet indicateur est le seul qui cherche à comparer « l'offre » en ressources naturelles (la biocapacité) avec la « demande » sur ces mêmes ressources, en exprimant la totalité des impacts sous la forme d'une surface nécessaire [Boutaud et Gondran, 2009].

Dans le guide méthodologique du Bilan Carbone®, l'ADEME mentionne le fait que l'un des points fondamentaux de cette méthode consiste à mettre sur un pied d'égalité les émissions de gaz à effet de serre qui prennent directement place au sein de l'entité (qui sont, d'une certaine manière, de sa responsabilité juridique ou territoriale directe) avec les émissions qui prennent place à l'extérieur de cette entité. Elles sont la contrepartie de processus nécessaires à l'existence de l'activité ou de l'organisation sous sa forme actuelle [ADEME, 2009a]. Dans cette catégorie « externe », on trouvera par exemple les émissions d'un camion affrété par une entreprise alors qu'il ne lui appartient pas mais qui transporte sa production ou les matières premières nécessaires à la production (aspect indirect). Ce dernier point ne peut cependant pas être pris en compte dans tous les outils. Ainsi, une ACV ne peut être exhaustive car des choix doivent être faits concernant certains paramètres (transport, hommes, infrastructures, etc), néanmoins elle permet d'obtenir des informations sur le produit tout au long de son cycle de vie et indique à l'entreprise les pistes d'améliorations possibles en gestion environnementale [Gilet, 2000]. Lorsqu'une ACV est réalisée dans un objectif d'amélioration ou de décision, elle peut permettre d'agir sur un produit mais aussi de développer des stratégies de respect de l'environnement à plus grande échelle (politique d'achat, stratégie marketing) [Gilet, 2000].

Les derniers avantages qui peuvent être cités concernant ces différents outils résident dans l'identification d'**indicateurs environnementaux spécifiques** notamment dans le cas de l'outil EPE [ISO 14031, 2000]. Dans le même outil, mais plus particulièrement dans l'outil MFA, un atout majeur consiste à une meilleure **compréhension des interactions** existantes entre une organisation et ses systèmes connexes [Brunner et Rechberger, 2004].

En conclusion, les principaux avantages qu'il paraît indispensable d'avoir dans une méthode d'évaluation environnementale sont :

- L'expression des impacts sous **plusieurs indicateurs** afin de conserver un degré d'information suffisant pour agir en fonction des enjeux et des priorités identifiés pour l'organisation faisant l'objet de l'étude.
- Un **indicateur agrégé** peut néanmoins être utilisé pour ses vertus pédagogiques.
- Un **indicateur d'éco-efficience** peut permettre de croiser un indicateur environnemental avec une donnée économique ou sociale.
- Bien que l'utilisation de bases de données soit fréquente, il semble intéressant de conserver l'utilisation d'**indicateurs spécifiques** du système étudié afin de conserver une plus grande fidélité à la réalité du système.

Bien que les avantages de ces différents outils soient importants et constituent leur force, il est nécessaire de mettre en perspective les limites liées à leur application.

2.3.7 Limites des outils d'évaluation environnementale

De manière générale, les principales limites des outils d'évaluation concernent :

- **L'accessibilité** des données qui peut parfois s'avérer difficile ;
- La simplification des résultats sous un seul impact : l'**indicateur agrégé** qui engendre une perte d'information non négligeable ;
- Les **impacts considérés** ne sont pas toujours les mêmes d'un outil à l'autre. Cette limite n'a de conséquence que si l'on cherche à obtenir des informations auprès de différentes structures qui n'ont pas mis en place le même outil. Une comparaison s'avèrera alors impossible ;
- Les **périmètres d'études** différents entre les outils disponibles qui rendent les comparaisons entre systèmes difficiles ;
- **L'interprétation des résultats** parfois difficile selon les conditions de réalisation de l'étude et les données disponibles
- Les **facteurs de conversion** utilisés :
 - Variabilité selon les méthodes
 - Variables à un instant t mais variables selon l'échelle de temps considérée et ayant vocation à évoluer au cours du temps en fonction de l'évolution des méthodes de calcul ainsi que des connaissances scientifiques sur le sujet. De plus, ils tiennent compte des pressions qui sont exercées sur l'environnement, ces dernières pouvant également évoluer à l'avenir ;
 - Manque de lisibilité sur les méthodes d'élaboration de ces facteurs
 - Les **incertitudes** sur les valeurs de ces facteurs, souvent importantes, elles permettent néanmoins d'obtenir un ordre de grandeur des impacts environnementaux.

Néanmoins, il est difficile d'aborder les limites sans les relier aux outils auxquels elles se réfèrent. Ainsi, le paragraphe suivant détaillera pour les principaux outils disponibles les limites qui leur sont associées.

La principale limite de l'outil EPE est que seuls les **aspects et impacts définis par la politique environnementale** de l'entreprise sont considérés dans l'évaluation [Gendron, 2005]. Ainsi, l'organisation peut délibérément choisir les points où elle se sait performante et omettre les points qu'elle considère peu avantageux, restreignant le périmètre de l'étude.

Toujours concernant le périmètre de l'étude, les limites de l'outil BC® sont liées au **choix du périmètre d'application** qui engendre parfois quelques ambiguïtés dans l'analyse. De même, le principe de cet outil étant d'exprimer l'impact d'une activité sur l'environnement en quantité de carbone, **seuls les impacts convertibles en gaz à effet de serre sont présentés** ce qui peut amener certains aspects (comme les consommations électriques par exemple) à apparaître, dans le contexte français, comme un point faible [ADEME, 2010]. L'autre outil ne considérant que les émissions de GES, le GHG protocol a fait l'objet de développement adapté à certaines filières comme l'industrie du bois, du papier ou encore du ciment. Cependant, la procédure de calcul peut s'avérer longue et complexe pour les filières n'ayant pas encore à leur disposition un outil spécifique adapté [Fransen et al., 2007].

Pour l'outil MIPS, son avantage au niveau pédagogique est compensé par un inconvénient non négligeable : il semble **ne pas prendre en compte la notion de pollution**. Il va comparer le « poids environnemental » total d'un service par rapport à un autre [Smeets et Wetering, 1999], sans tenir compte de l'impact de chacun de ces poids. Ainsi, un service nécessitant beaucoup de matière va être considéré comme plus impactant qu'un service nécessitant moins de matière, et ce indifféremment de l'impact environnemental que peuvent avoir les matières utilisées (1kg d'une matière peut être beaucoup moins toxique pour l'environnement que quelques grammes d'une autre matière).

Par définition, les outils d'évaluation environnementale prennent en considération essentiellement le **volet environnemental**. Par conséquent, ces outils ne peuvent être utilisés à des fins de stratégies de développement durable que s'ils viennent en complément d'un autre outil qui leur apportera les éléments relatifs aux critères sociaux et économiques. C'est le cas de l'ACV par exemple dont seule la dimension environnementale est analysée notamment via l'évaluation des effets défavorables pour l'environnement [Jolliet et al., 2010].

Concernant l'ACV, d'autres limites peuvent également être mises en avant comme l'exhaustivité de la démarche. La prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie et des impacts évalués, lui confère certaines limites quant **au coût de mise en œuvre, à la disponibilité et à la qualité des données à recueillir**. De plus, il est facilement concevable qu'en ayant l'objectif de réaliser une analyse du cycle de vie complet d'un produit, cette évaluation ne peut se faire qu'en simplifiant d'autres aspects [Guinée et al., 2002]. La mauvaise connaissance des mécanismes d'impacts peut attribuer une **incertitude dans les résultats** [Aissani, 2008]. De plus, la prise en compte du cycle de vie dans sa totalité empêche la prise en compte des caractéristiques locales des milieux impactés et donc une **mauvaise appréciation des impacts locaux et régionaux** [Aissani, 2008]. Mais cette exhaustivité de la démarche peut être remise en cause car il est nécessaire de **faire des choix** en tenant compte de certains paramètres (transport, hommes, infrastructures, etc.). Cependant, elle fournit des indications précises quant au produit pendant toute sa vie et donne à l'entreprise des pistes d'améliorations dans la gestion de l'environnement.

Enfin, une dernière limite majeure de l'ACV réside dans les données utilisées qui ne sont pas habituellement celles mesurées par les exploitants [Rousseaux, 2005], mais celles issues de bases de données [Guinée et al., 2002]. Bien que le format de ces données soit standardisé, ces données sont bien souvent issues d'études anciennes (données obsolètes), incomparables de par les méthodes d'acquisition différentes dont elles sont issues et enfin, leur qualité est bien souvent inconnue car les connaissances sur les hypothèses et les limites des systèmes ayant permis leur évaluation ne sont pas systématiquement connues.

Pour conclure, les principales limites identifiées sur ces outils d'évaluation environnementale qui devraient être approfondies sont :

- **Le périmètre d'étude** : il se focalise bien souvent sur une zone géographique (site industriel) ou un produit. Dans le cadre d'une évaluation environnementale globale, il pourrait s'avérer intéressant de considérer le service rendu par ce produit au sein d'une organisation, tout en lui attribuant les impacts liés à l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agirait alors de trouver le moyen de **croiser les informations issues d'une évaluation environnementale avec une approche site avec celles issues d'une approche produit**.
- **La provenance des données** : Plusieurs de ces outils se caractérisent par l'absence de valeurs mesurées sur le système, pourtant ces dernières paraissent importantes pour réaliser une évaluation environnementale fidèle au système étudié. Néanmoins, l'ensemble des données nécessaires ne peuvent être recueillies sur le système. **L'évaluation environnementale devrait donc croiser des données spécifiques du système avec des données génériques issues de base de données afin d'être complète**.
- **Les impacts environnementaux évalués** : Les méthodes identifiées sont généralement spécifiques à une catégorie d'impact environnemental donné ainsi le Bilan Carbone® exprime les émissions de GES (impact planétaire) alors que les études d'impacts sont focalisées sur les impacts environnementaux locaux (nuisances locales provoquées par la modification d'un système). **Il semblerait alors pertinent de conserver l'expression des impacts environnementaux planétaires et de les compléter par l'expression d'impacts environnementaux locaux afin de conserver la spécificité de l'étude (comme pour les données génériques et spécifiques) et de mener ainsi une évaluation environnementale globale**.

2.3.8 Incitations à la mise en œuvre des outils d'évaluation environnementale

Pour conclure sur les différents outils d'évaluation environnementale, nous terminerons cette partie 2.3 par les grandes catégories de démarche qui les caractérisent. Dans ce paragraphe nous présenterons les types de démarches, qu'il ne faut pas confondre avec les méthodes et modes d'application, qui pourraient expliquer le protocole de la méthode pour sa mise en place.

De manière générale, cinq types d'enjeux contribuant à la prise en compte de l'environnement par les entreprises peuvent être observés : les enjeux évènementiels (accidents, par exemple), réglementaires, économiques, stratégiques et managériaux [Gondran, 2001]. Ces cinq types d'enjeux peuvent également être à l'origine, au sein de l'entreprise, de la mise en place d'une démarche d'évaluation environnementale.

De la même façon, la typologie des démarches pouvant être portées par l'Etat pour permettre une meilleure régulation des externalités environnementales peut également s'appliquer aux démarches incitant à la mise en place d'une évaluation environnementale au sein des entreprises.

Les démarches d'ordre **réglementaire**, imposées par des textes législatifs, sont a priori les plus contraignantes. Nous avons vu que l'étude d'impact s'impose aux entreprises soumises à autorisation selon la législatives ICPE, par l'intermédiaire de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) [Journal Officiel de la République Française, 1976]. Néanmoins, le décret n°2011-829 - article 75 de la loi Grenelle 2 - du 11 juillet 2011 impose à certaines catégories d'organismes la réalisation d'un bilan des émissions de gaz

à effet de serre [Journal Officiel de la République Française, 2011]. Cependant, ce nouveau texte n'impose pas un outil particulier même si, à travers ces obligations, les outils BC® et GHG protocol peuvent être directement concernés.

La seconde catégorie concerne les démarches **économiques**. Sont regroupées dans cette catégorie l'ensemble des taxes relatives aux émissions comme la TGAP qui implique l'évaluation des quantités de rejets de polluants.

Enfin, le troisième type de démarche qu'il est possible de trouver pour ces outils concerne les incitations **normalisées**. En effet, les normes imposent des protocoles précis, mais ne sont pas soumises à des contraintes réglementaires : par exemple l'ACV avec les normes de la série ISO 14040 [ISO 14040, 2006], [ISO 14044, 2006]... et l'EPE avec la norme ISO 14031 [ISO 14031, 2000]. Les démarches **volontaires**, sans contraintes et pressions pour leur application représentent la troisième catégorie de démarche. De part leur nature volontaire, ces outils sont une preuve de la motivation interne d'une organisation quand à l'évaluation de ces impacts sur l'environnement. L'empreinte écologique, la MFA, l'outil MIPS sont ainsi répertoriés dans les méthodes volontaires.

Que ce soit à des fins stratégiques, économiques, managériales ou par réel engagement pour l'environnement, la mise en place d'un outil normalisé ou volontaire constitue, pour les organisations, un argument de communication.

Le processus d'évaluation environnementale permet de procéder à un examen coordonné et complet des divers enjeux (environnementaux, stratégiques, managériaux, économiques) associés à un projet. Il permet au décideur d'en tenir compte et ainsi contribuer à réduire au minimum ou éliminer les effets possibles sur l'environnement par l'aide à la décision de mesures complémentaires ou de scénarios moins impactants.

Partie 3 Pertinence de l'évaluation des systèmes informatiques

Le cycle de vie des systèmes informatiques génère une multitude d'impacts. Tous les impacts sont pertinents à étudier et ont leurs conséquences sur l'environnement. Cependant, certains sont plus importants : (1) le secteur des technologies de l'information a un fort enjeu énergétique, (2) la problématique de l'approvisionnement en matières premières dont dépendent de nombreux fournisseurs en équipements électroniques est majeure. Par conséquent, cette partie abordera principalement les impacts liés à ces deux catégories d'impacts : la raréfaction des ressources énergétiques et des matières premières indispensables aux équipements informatiques.

3.1 Changement climatique, consommation énergétique et raréfaction des ressources

3.1.1 La problématique du changement climatique

Phénomène planétaire reconnu scientifiquement, le réchauffement du système climatique est sans équivoque [GIEC, 2008]. Ses conséquences sont perceptibles à l'échelle de la planète comme la hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, la fonte massive de la neige et de la glace ainsi qu'une élévation du niveau moyen de la mer. Sur la base de l'observation de données depuis les années 1970, le GIEC affirme qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures [GIEC, 2008]. De plus, dans son rapport de 2007, le GIEC attribue « très probablement » cette élévation de la température moyenne du globe à la hausse des concentrations de GES anthropiques [GIEC, 2007].

Le sommet mondial de Kyoto en 1997 a permis la mise en œuvre et la concrétisation des engagements et principes signés lors du sommet mondial de Rio de 1992 [Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1997]. Le protocole de Kyoto vise à réduire les émissions des six gaz à effet de serre principaux : le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote, les hydrofluorocarbures, les perfluorocarbures et l'hexafluorure de soufre [Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1997] pour les pays les plus industrialisés. L'objectif de cette diminution est de limiter l'accroissement du phénomène d'effet de serre et ainsi ralentir les changements climatiques à la surface de la Terre.

Les connaissances actuelles sur le fonctionnement du phénomène climatique terrestre permettent de conclure que les émissions mondiales de CO₂ d'origine fossile doivent être divisées par deux à trois d'ici 2050. En France, c'est le scénario du « facteur 4 » qui a été retenu. Apparue au milieu des années 1990, la notion de « facteur 4 » fait tout d'abord référence à la capacité des systèmes techniques de réduire la consommation de ressources naturelles de façon significative soit 75% [Bonduelle et al., 2011]. Progressivement, la notion de « facteur 4 » s'est vue associée à la possibilité de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre. Par conséquent, ce concept est désormais perçu comme la possibilité de répondre aux enjeux du changement climatique et à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles [Villot et al., 2011].

Les consommations d'énergie, peu importe la source d'énergie utilisée, contribuent aux émissions de GES [Villot et al., 2011]. Pour agir contre ce phénomène de changement climatique, il est alors nécessaire d'agir sur les consommations énergétiques à tous les niveaux. Comme démontré dans la première partie de ce chapitre, les consommations énergétiques liées à l'usage des systèmes

informatiques augmentent rapidement, il est alors essentiel d'évaluer les impacts de ce secteur face à une telle problématique. La contribution des activités d'une organisation à l'impact changement climatique doit alors constituer une priorité lors d'une démarche d'évaluation environnementale. Cette dernière peut être, par la suite, complétée par une évaluation environnementale plus complète.

En outre, les connaissances disponibles sur les ressources en hydrocarbures permettent d'affirmer qu'une diminution des consommations risque de se faire volontairement ou non de part la disponibilité des ressources. Ainsi, une réflexion s'engage tant sur le fonctionnement actuel de toute organisation (entreprise ou collectivité) que sur l'évaluation de l'impact « changement climatique », constituant alors une première étape indispensable [ADEME, 2010].

3.1.2 Une raréfaction des ressources énergétiques

Les combustibles fossiles, charbons et hydrocarbures (gaz naturel et pétrole) sont d'origine organique. Ils résultent d'une longue transformation, à savoir la lente décomposition de débris de végétaux pour le charbon, de microorganismes d'origine animale et végétale (plancton) pour les hydrocarbures ou encore de certains minéraux (pour les énergies fissiles avec l'uranium et le plutonium). Ces richesses sont enfouies à des profondeurs variables dans le sol ou en mer et inégalement réparties à la surface de la Terre. Leur localisation dépend de l'origine de leur formation : au fond de l'eau, à l'abri de l'air, ou encore sous l'action combinée de la pression, de la température et de certaines bactéries.

Plus ou moins riches en carbone, les **charbons** se retrouvent dans les régions sédimentaires souvent à proximité des anciennes chaînes hercyniennes (de la fin de l'ère primaire) ou dans des fosses sédimentaires à l'intérieur des montagnes jeunes [Gallimard, 2004].

Mais la localisation actuelle ne reflète pas systématiquement le lieu de formation originale. C'est le cas pour les **hydrocarbures** qui sont fréquemment chassés par les fortes pressions sur la roche mère et qui migrent à travers des roches poreuses vers la surface du sol jusqu'à se trouver bloqués par une couche de terrain imperméable. Ils se conservent dans des poches au sein de roches perméables telles que le grès, les sables et le calcaire [Gallimard, 2004]. Les grands gisements d'hydrocarbures se situent dans les zones de piémont, comme ceux de Californie, du Texas, du Caucase. Mais aussi dans de grands bassins sédimentaires, tels ceux de Libye et d'Arabie. Enfin, d'autres gisements peuvent se retrouver sous des plaques continentales, comme en mer du Nord ou dans le golfe du Mexique (gisement off-shore) [Gallimard, 2004].

Les gisements géologiques constituent des stocks dans lesquels nous avons puisé sans prendre garde au temps nécessaire pour leur renouvellement. Il n'est pas évident de connaître objectivement leurs niveaux, faute d'une pression importante sur ces ressources mais aussi en raison du marché financier généré par leur exploitation.

En 2011, l'humanité puise annuellement l'équivalent de un million d'années de transformations [Drezet, 2010]. La demande augmente en raison des consommations importantes des pays développés, de l'évolution des pays émergents mais aussi avec la démographie croissante. A ce rythme, qui ne cesse de s'accélérer, les stocks s'épuisent rapidement. La consommation intensive

que subissent ces ressources ne peut être envisagée sur du long terme (au-delà de 30 à 100 ans selon les ressources considérées). L'INSEE estime que les consommations mondiales seront doublées dans les 50 prochaines années [Besson, 2008] [MEDDTL, 2011] [Nauroy, 2011] [Service de l'Observation et des Statistiques, 2011]. Excepté la situation du pétrole, cet échéancier de la fin des stocks de ressources fossiles est peu médiatisé. Il nous amène à nous interroger sur le fonctionnement non raisonné de notre civilisation qui s'apprête à transmettre aux générations futures une Terre appauvrie et fortement marquée de l'empreinte humaine.

De nombreuses études [Gordon et al., 2006] paraissent pour essayer de quantifier les stocks restants et ainsi déterminer la durée d'approvisionnement restante. Dans la course à la recherche de nouvelles ressources énergétiques, la France connaît depuis quelques temps une polémique quant aux études exploratoires pour le gaz de schiste. Bien que les ravages d'une telle exploitation soient connus en Amérique du Nord leurs répercussions environnementales n'ont pas encore été considérées dans leur totalité lors des études préliminaires.

3.1.3 Les ressources en matières premières ne sont pas inépuisables !

Comme les énergies fossiles, les ressources naturelles en matières premières ne sont pas inépuisables. De plus, dans le contexte qui nous intéresse précisément dans cette étude, l'industrie électronique est particulièrement gourmande en matières premières (métaux, cristaux, eau, énergie, ...). L'origine des minerais essentiels dans cette industrie réside dans les roches contenant des composés métalliques de fer, de cuivre ou encore de zinc qui, dans certaines conditions, se concentrent et forment des gisements, superposition de couches de minerais et de couches stériles. La minéralisation s'est faite dans les couches profondes de la Terre. A la suite des grands bouleversements géologiques, les strates ont été parfois déformées, cassées, remontées en surface. Géographiquement, ces minerais sont essentiellement localisés dans les vieux socles (boucliers canadien, brésilien, sibérien) et dans les massifs anciens (Oural, Appalaches). Il est également possible de les trouver au niveau des montagnes jeunes (Rocheuses ou Andes), et dans quelques cas au niveau des zones sédimentaires. Les fonds océaniques peuvent être eux aussi une source de minerais où ils sont retrouvés sous forme de boues métallifères, notamment à proximité des dorsales [Gallimard, 2004].

Les terres rares sont extraites à partir de minerais et contrairement à leur dénomination, ces éléments, également connus sous le nom de lanthanides, sont assez répandus. C'est d'ailleurs leur grande dispersion à la surface de la Terre et le fait qu'ils aient été découverts progressivement qu'ils sont désormais appelés les « terres rares ». Le début de leur utilisation dans l'industrie remonte à la fin des années soixante, début des années soixante-dix. Mais l'extraction mondiale reste faible (125 000 tonnes annuelles dont près de 110 000 en Chine) [Gordon et al., 2006] [Drezet, 2010]. Ce contexte des terres rares préoccupe l'ensemble de la filière industrielle électronique, depuis les constructeurs jusqu'aux filières de retraitement qui tentent désormais de se mettre en place pour pallier aux difficultés engendrées par la disponibilité de ces matériaux [Gordon et al., 2006]. La répartition de ces ressources n'est pas homogène à la surface de la planète (Figure 16) et la Chine est en possession de 97 % des stocks connus [Nodé-Langlois, 2011].

L'extraction de ces matières premières est en grande partie effectuée dans les pays émergents, où les conditions sociales du travail sont très loin de celles des pays développés (ex : Asie du Sud-est pour la production d'équipements électroniques) et où les préoccupations environnementales liées

aux exploitations causent de graves dommages à l'environnement et aux populations proches des zones d'exploitation [Drezet, 2010]. C'est notamment le cas en Chine qui concentre une grande part des réserves de minerais à l'échelle mondiale (Figure 16).

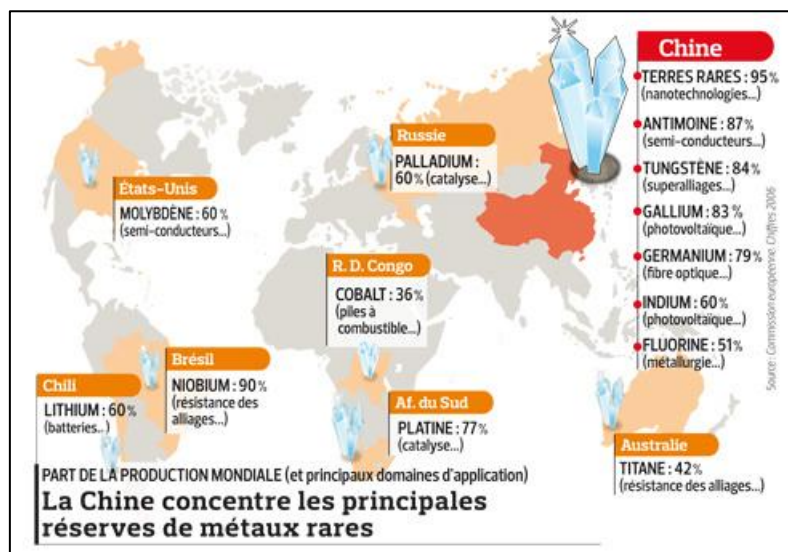


Figure 16: Concentration de la production des matières premières minérales critiques [Nodé-Langlois, 2011]

La problématique générée par l'épuisement des ressources est complexe. La crainte principale réside dans les conflits de toutes sortes qui risquent d'éclater pour l'accaparement des gisements énergétiques et métalliques restants [Dorsouma et Bouchard, 2010].

Nous concluons sur les principaux points de cette problématique, à garder en tête dans un contexte d'évaluation environnementale [Gordon et al., 2006] [OCDE, 2009] [Plançon, 2009] [Drezet, 2011a] :

- les ressources naturelles abiotiques constituent un stock fini et donc **épuisable** ;
- actuellement la société est en train de vivre la fin de l'exploitation des gisements faciles ;
- les gisements futurs seront plus difficiles à exploiter, avec des conséquences non négligeables sur l'environnement ;
- le coût des matières premières va croître avec l'augmentation de la demande et les difficultés inhérentes aux nouvelles extractions (plus profondes).

3.2 De la responsabilité élargie du producteur à la responsabilité sociétale des entreprises

Adoptées par l'Europe, la responsabilité élargie du producteur (REP) et la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) correspondent à des déclinaisons du concept de développement durable dans le monde des entreprises notamment en ce qui concerne leurs responsabilités environnementales pour leurs produits ou la stratégie interne de l'entreprise.

La notion de producteur définit à la fois la personne qui a construit un produit qui deviendra un déchet en fin de vie ainsi que la personne qui, par l'intermédiaire de prétraitement ou autre opérations, aura modifié la composition des déchets [Journal Officiel de l'Union Européenne, 1975]. Initialement proposée par l'OCDE [OCDE, 2001], la REP est quant à elle définie dans l'article L541-10 du code de l'environnement [Code de l'environnement, 2010] comme une forme de suite au **principe du pollueur-payeur** (décrit dans les Principes généraux du Code de l'environnement à l'article L110-

1-II) en mentionnant qu'il « *peut être fait obligation aux producteurs, importateurs et distributeurs de ces produits ou des éléments matériels entrant dans leur fabrication de pourvoir ou de contribuer à l'élimination des déchets qui en proviennent* ». Le **principe de responsabilité environnementale** étant également évoqué concernant la prévention et la réparation des dommages environnementaux [Parlement et Conseil Européen, 2004]. L'idée étant d'inciter les producteurs à intégrer les frais de gestion d'un déchet dans le prix de vente du produit dont il est issu. Ainsi, c'est leur responsabilité économique qui est mise en avant en leur demandant d'assumer la responsabilité de la pollution environnementale de leur produit. L'hypothèse de la mise en place de la REP est qu'un producteur sensibilisé aux coûts liés à la phase de fin de vie de ses produits sera plus enclin à les réduire à la source et donc à développer une stratégie d'éco-conception de ses produits. Il n'est pas tant question d'internaliser complètement les frais de traitement des déchets que d'aider à une prise de conscience. L'objectif étant de réduire la quantité de déchets mais aussi que les déchets produits puissent être recyclés ou biodégradables.

Initialement prévu pour les déchets issus d'un nombre limité d'activité, la REP a été élargie à de nouveaux produits et groupes de produits dont les équipements électriques et électroniques [OCDE, 2001]. La REP a ainsi intégré certaines directives européennes concernant les systèmes informatiques :

- la directive 2006/66/CE relative aux piles et accumulateurs ;
- la directive 94/62/CE relative aux emballages ;
- la directive 2002/96/CE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques.

Dans cette dernière, l'article 4 précise que les producteurs doivent mener des efforts conséquents dans le domaine de l'éco-conception afin « *d'encourager la valorisation des déchets en vue de réduire la quantité de déchets à éliminer et d'économiser les ressources naturelles* ». La réutilisation, le recyclage, le compostage et la valorisation énergétique des déchets doivent être privilégiés en tenant compte des effets environnementaux et économiques [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2003].

La prise de conscience du producteur concernant son rôle à jouer dans la prise en compte de l'environnement dans les produits qu'il fabrique résulte également de la mise en œuvre de la loi sur les nouvelles régulations économiques (loi NRE). Appliquée depuis janvier 2003, dans son article 116, la NRE impose aux sociétés cotées en bourse de rendre compte dans leur rapport annuel de leurs performances environnementales et sociales [Journal Officiel de la République Française, 2001]. Pour cela, elles insèrent dans leurs tableaux de bord financiers et opérationnels des critères environnementaux et sociaux. Ce travail représente un premier pas vers la RSE qui concerne l'intégration des préoccupations environnementales et sociales des organisations au niveau de leurs activités et de leurs relations avec l'ensemble de leurs parties prenantes [Office de la Langue Française, 2011]. Le ministère de l'écologie et du développement durable, du territoire et du logement propose une définition plus générale en mentionnant simplement que la RSE est la retranscription du concept de développement durable à l'échelle des entreprises [MEDDTL, 2011]. Cette définition précise que la RSE doit constituer une démarche aboutissant à la mise en place des meilleures pratiques possibles afin de contribuer à la protection de l'environnement et ainsi à l'amélioration de la société avant de conclure sur le fait que la « *RSE permet d'associer logique économique, responsabilité sociale et éco responsabilité* » [MEDDTL, 2011].

Publiée le 1^{er} novembre 2010, l'ISO 26 000 « encadre » la RSE. Première norme internationale sur le sujet, elle rend le concept de RSE applicable à tout type d'organisation (entreprises, collectivités, associations, fondations...) [Brodhag, 2010] quelles que soit leur taille ou leur localisation par l'énoncé de lignes directrices concernant [ISO 26000, 2010] :

- les concepts, termes et définitions relatifs à la responsabilité sociétale;
- les origines, les orientations et les caractéristiques de la responsabilité sociétale;
- les principes et pratiques en matière de responsabilité sociétale;
- les questions centrales et les domaines d'action de la responsabilité sociétale;
- l'intégration, la concrétisation et la promotion d'un comportement responsable dans l'ensemble de l'organisation, et à travers ses politiques et pratiques, dans sa sphère d'influence;
- l'identification des parties prenantes et le dialogue avec elles;
- la communication sur les engagements, les performances et autres informations concernant la responsabilité sociétale.

La RSE est parfois schématisée sous la forme d'une fleur où chaque pétale symbolise un axe de travail indispensable. Le symbolisme de cette illustration réside dans le fait que la fleur ne serait pas complète sans l'une de ces pétales tout comme la RSE ne serait pas complète sans un de ces axes. Il existe plusieurs versions de cette représentation dont celle de la Figure 17, proposée par la société « Reflex'eco ».

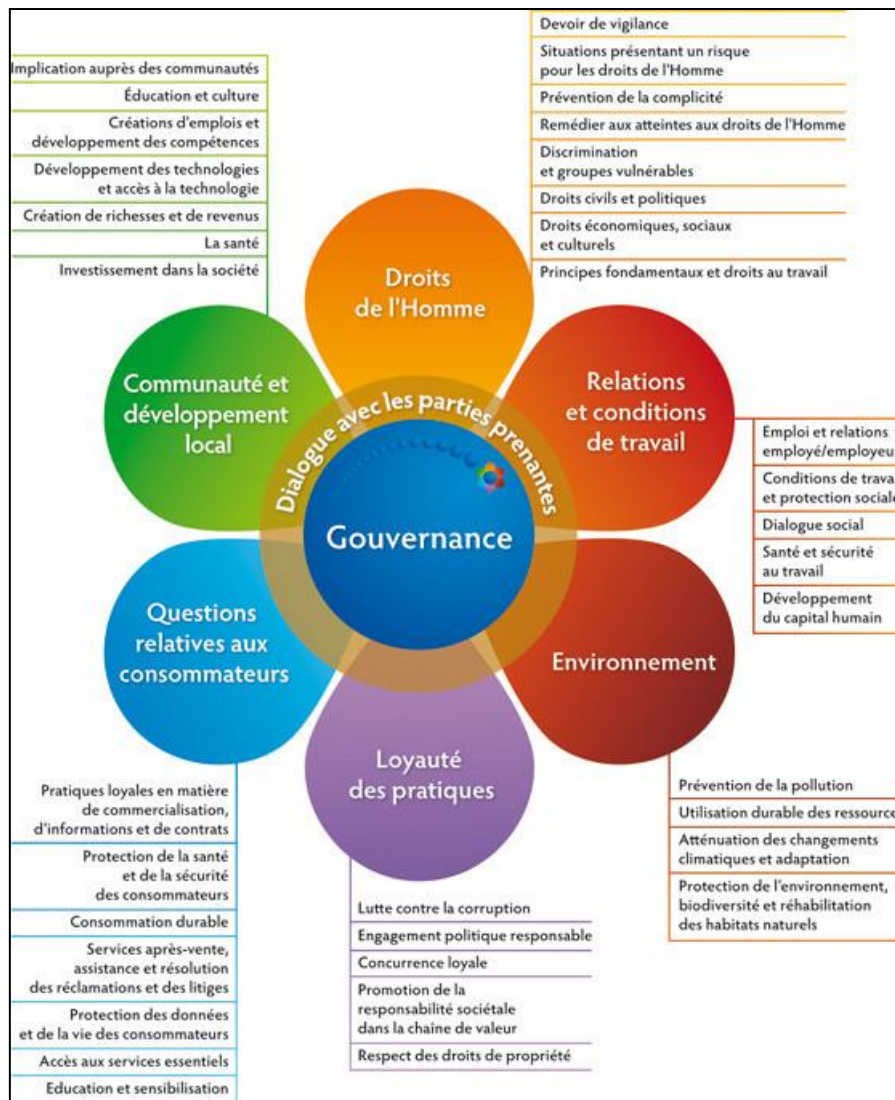


Figure 17: Les 7 questions centrales en approche globale telles que schématisées dans la norme ISO 26000 et leurs domaines d'action [Reflex'eco, 2011]

L'intérêt pour les entreprises de communiquer sur leur démarche de développement durable répond à différentes motivations telles que l'évolution des exigences du client, la modification du rapport hommes-entreprises ou encore l'émergence d'entreprises civiques sans oublier le risque lié à l'image de l'entreprise envers ses différentes parties intéressées. Ces éléments entraînent des ajustements comme notamment la modification en profondeur de la structure traditionnelle de l'organisation en question. Enfin, bien que la RSE rencontre l'adhésion des entreprises, elle génère également des interrogations notamment envers les outils et les méthodes qu'elle établit [Dufourq et Besse, 2004].

Contrairement à la REP qui est obligatoire car définie dans le code de l'environnement, l'ISO 26 000 est une norme, donc basée sur le principe du volontariat [Caron, 2011]. Cette dernière encourage les organisations à aller au-delà de ce qui est exigé par les lois. Sa vocation est de compléter les outils et initiatives éventuellement présentes au sein de l'organisation. Mais sa portée concrète est parfois mise en doute [Capron, 2010] [Brodhag, 2010] quant à sa mise en œuvre authentique [Caron, 2011]. Construite autour de trois rationalités complémentaires : objective, sociale et subjective [Habermas, 1997], la force de cette norme est d'avoir une grande cohérence interne. Cette norme est rendue opérationnelle par le fait qu'elle implique une réelle interaction entre les différents

acteurs pour la mettre en œuvre. De plus, la maîtrise technique de la responsabilité sociale est centrale : l'action est au cœur de la norme qui donne des recommandations invitant l'organisation à « comprendre », « intégrer », « améliorer », « revoir » [Caron, 2011]. Ainsi, la complexité de la situation ne peut servir d'argument pour ne pas agir [Caron, 2011].

Les limites entre le concept de RSE et la REP sont étroites, les deux contribuant à l'amélioration du système sur un volet différent ainsi qu'à des échelles différentes. Il s'agit, pour chaque notion d'amener à une prise de conscience des pressions qu'exerce l'homme sur son environnement. La REP ne s'attachant qu'à l'impact sur l'environnement au sens « environnement naturel », la RSE considérant l'environnement dans la « généralité de ce qui l'entoure », les différents acteurs et périmètres avec lesquels l'organisation est en lien.

La responsabilité des producteurs est étendue à la fin de vie de leurs produits et le rôle clé des consommateurs est reconnu [Steele, 2011]. Et si cette responsabilité s'étend à tous les maillons de la chaîne, depuis les producteurs jusqu'aux consommateurs, alors les impacts environnementaux liés aux équipements informatiques sont la responsabilité de chacun.

Il paraît donc pertinent d'en prendre connaissance, de chercher à les caractériser et, dans une perspective plus globale, de tenter de les diminuer.

3.3 Une demande de reconnaissance de plus en plus forte

3.3.1 Eco-conception

L'objectif de la démarche d'éco-conception est d'améliorer les caractéristiques d'un produit (Design for Environment – DfE) afin de minimiser ses conséquences sur l'environnement. L'éco-conception peut être qualifiée de démarche préventive dans le sens où elle tente d'appliquer des règles de prévention de la pollution en amont de la création du produit afin que celui-ci ait moins d'impacts environnementaux une fois sur le marché [Corne et al., 2009]. La directive Energy Using Products dite « directive EuP » (voir contexte réglementaire paragraphe 1.1.2) établit un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits consommateurs d'énergie. Il s'agit donc d'améliorer l'éco-efficacité des produits. Mais si seule l'éco-efficacité était considérée, les industriels pourraient se contenter de la mise en place de solutions plus efficaces sur le plan énergétique sans remettre en cause les modes de production et de consommation actuels. Pour établir ces améliorations possibles en termes d'éco-efficacité, il est souvent fait appel aux analyses de cycle de vie (Figure 18) où une nouvelle comptabilité se met en place visant à établir le caractère plus ou moins « impactant » des objets mis sur le marché. Il ne s'agit plus de comparer les produits en fonction de leur coût mais selon un panel d'indicateurs environnementaux divers (émissions de CO₂ engendrées, production de déchets nucléaires ou encore utilisation de substances toxiques). Mais les résultats des ACV sont multicritères, déterminer la solution la moins impactante devient alors délicat.

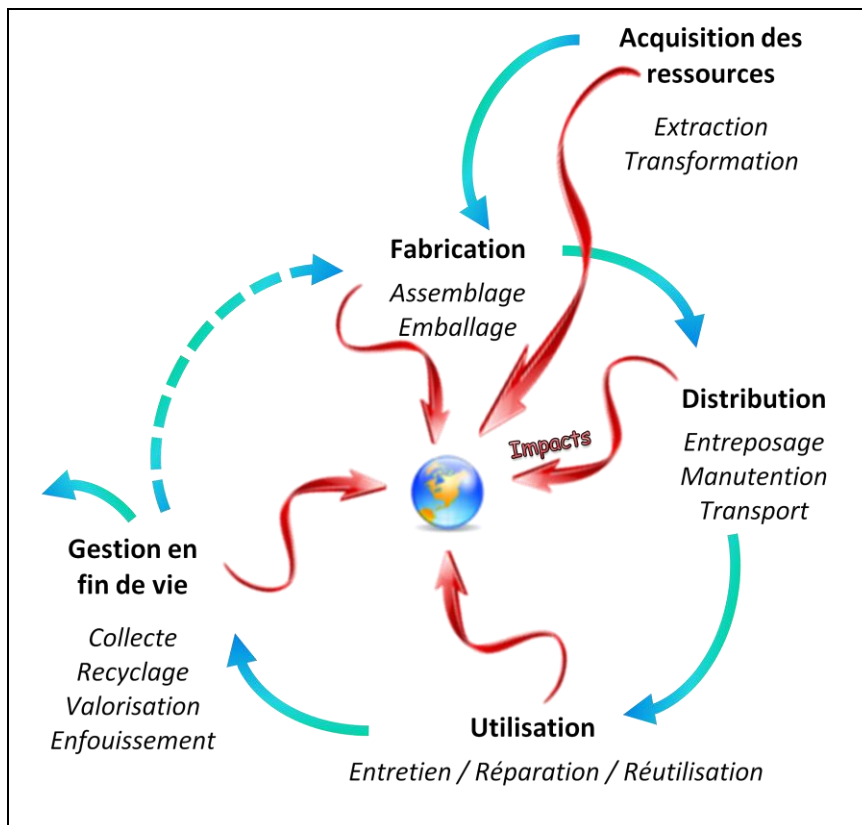


Figure 18: Les phases du cycle de vie d'un produit

L'éco-conception peut permettre une communication et ainsi constitue un élément de différenciation vis-à-vis de la concurrence en valorisant la démarche envers les clients. Néanmoins, dans ce contexte où chacun met en avant cette démarche environnementale, il est nécessaire de prendre du recul et d'analyser les informations présentées. Certaines sociétés peu scrupuleuses peuvent alors axer leur communication sur l'environnement afin de gagner des parts de marché. C'est ainsi qu'est née la notion de « Greenwashing ». Malheureusement, dans le cas de l'informatique, les exemples sont courants. Il est ainsi possible de citer les ordinateurs dont la coque était constituée de bambou (Asus, Dell). Cette nouvelle coque avait comme caractéristique principale d'être recyclable à 90%. Cet effort consenti par l'industriel a reçu un mauvais accueil de la part des acteurs de la protection de l'environnement en agissant uniquement sur les impacts inhérents à la coque, soit 1% des impacts environnementaux de l'équipement [Eugster et Hischier, 2007]. Les pièces les plus impactantes, souvent fondement de la technologie, ne sont pas remises en question et n'évoluent pas ou très peu. Néanmoins, certains modèles ne s'arrêtent pas là et agissent plus concrètement. Ainsi, le constructeur Apple a commercialisé un MacBook en 2009 qui est considéré [Corne et al., 2009] comme « l'ordinateur le plus vert » de l'époque sur le marché. Cet ordinateur ne contient aucune des substances répertoriées dans la directive RoHS, il a été pensé pour économiser de l'énergie avec un module permettant le ralentissement de son disque dur lorsque ce dernier n'est pas utilisé, sa coque est entièrement en aluminium ce qui lui assure une recyclabilité importante (mais une énergie grise de fabrication élevée également) et enfin, sa batterie a une durée de vie de cinq ans (contre un à deux ans pour un ordinateur classique) [Corne et al., 2009]. Greenpeace effectue un classement des 18 principaux constructeurs d'équipements électroniques (ordinateurs, téléphones portables, téléviseurs, consoles de jeux) en analysant leur politique sur les substances dangereuses, le recyclage et l'impact sur le changement climatique. Sur ce classement, ce sont Nokia

et Sony Ericsson qui arrivent en tête des constructeurs avec respectivement une note finale de 7,5 et 6,9 sur 10. Avec une moyenne de 4,9 sur 10, Apple se classe neuvième [Greenpeace, 2010].

Récemment, une société bordelaise (Meta IT) a totalement éco-conçu un ordinateur et un serveur. Lors de la fabrication, l'ordinateur a été conçu en réduisant le nombre de pièces et de matériaux nécessaires à sa conception. Il en va de même lors de sa livraison qui fait appel à des malles qui sont réutilisées pour les différentes livraisons : l'encombrement pendant le transport et le stockage est ainsi réduit. Enfin, le cycle de vie du produit paraît mieux maîtrisé par une production essentiellement en France, une diminution des consommations en fonctionnement et l'allongement de sa durée de vie [Meric, 2009]. Néanmoins, le coût d'achat de cet ordinateur reste supérieur au prix du marché et sa configuration allégée est destinée à une utilisation bureautique : traitement de texte, tableur, présentation, accès internet, courrier électronique et travail collaboratif. Au delà, il permet la lecture de pistes vidéos et musiques, la retouche des images simples [Méta IT SAS, 2011].

Dans le cas des équipements informatiques, la compétitivité et la confidentialité des données ne permettent pas d'obtenir les résultats des ACV réalisées sur les différents produits. Seuls des résultats globaux sont diffusés à des fins marketings. Le consommateur final doit donc se reposer sur d'autres éléments pour connaître les impacts environnementaux des différents produits mis sur le marché. Parmi ces éléments, les labels donnent un cadre plus formel à cette communication car ils comparent les équipements par rapport à une référence, à un autre produit ou dresse un diagnostic du produit avant de lui attribuer une note finale (ou une labellisation).

3.3.2 Les labels

Les labels ont été créés afin d'identifier rapidement et de manière fiable les matériels impactant le moins possible l'environnement au cours de toutes les phases de leur cycle de vie, c'est-à-dire contenant le moins de substances toxiques ou ayant été conçus pour être les plus recyclables et consommant le moins de ressources, en particulier énergétiques.

Parfois créés sur une initiative des pouvoirs publics, les écolabels apportent des informations aux consommateurs concernant la qualité environnementale des produits et/ou services dont il a besoin. Basé sur du volontariat de la part des constructeurs, la présence d'un label peut constituer un signe distinctif vis-à-vis de la concurrence.

Les écolabels ont pour rôle d'identifier les produits qui impactent le moins l'environnement tout au long de leur cycle de vie. Les normes de l'ISO de la série 14 020 et suivantes les ont répertoriés en trois classes. (1) Les **écolabels officiels (type I - ISO 14024:1999)** [ISO 14024, 1999] qui sont délivrés par un organisme tiers et indépendant après avoir contrôlé la conformité du produit par rapport aux critères exigés par la classification ; (2) les **autodéclarations environnementales (type II - ISO 14021:1999)** [ISO 14021, 1999] qui concernent les informations environnementales délivrées par le fabricant ou le distributeur, sans aucun contrôle indépendant et les (3) **écoprofils (type III - ISO 14025:2006)** [ISO 14025, 2006] dont les données sont standardisées sur un produit par rapport à une référence, notamment sur l'analyse de son cycle de vie.

Il est important de noter que les écolabels de type I ont un caractère **officiel** ce qui leur attribue davantage de crédit, notamment face au processus indépendant de la certification. Cependant, les produits labellisés avec des labels de type I sont moins nombreux que les produits labellisés avec des labels de type II et III [Dee, 2006]. D'un point de vue plus pratique, il est également possible de

répertorier les labels en fonction des critères qu'ils considèrent. Pour le secteur des équipements informatiques, 17 labels ont été identifiés et classés en quatre catégories principales (Tableau 19).

Tableau 19: Liste des principaux labels concernant les équipements informatiques de la fabrication à l'utilisation

Catégorie	Cible du label	Labels existants
Labels sur les équipements	ensemble du cycle de vie d'un matériel informatique, de sa conception à son recyclage	<ul style="list-style-type: none"> - Blue Angel (type I) - Epeat (type II) - TCO (type I) - Ecolabel européen (type I) - Ecma International (type II)
Labels concernant les économies d'énergie	consommation énergétique des appareils	<ul style="list-style-type: none"> - Energy Star (type II) - 80plus
Labels éco-conception	problématique environnementale en encourageant les démarches d'éco-conception ou de recyclage	<ul style="list-style-type: none"> - Choix Environnemental - Greenguard (type I) - PC 3R - CECP - Cygne Blanc (type I) - NF Environnement (type I)
Labels liés au papier	gestion de la fabrication du papier (filrière bois et recyclage)	<ul style="list-style-type: none"> - Pour les forêts : FSC (type II) et PEFC (type II) - Pour le papier recyclé: Blue Angel (type I) et Apur (type II)

Une analyse des différents labels (présentée en Annexe 2) [Bohas, 2011] semble conclure sur le fait que l'écolabel Epeat puisse être le plus complet en matière de diminution de l'impact environnemental.

La multiplication des labels existants dans le domaine des TICs montre que la question de l'impact environnemental des équipements est un sujet préoccupant les acteurs du domaine.

En résumé, les écolabels permettent d'obtenir une garantie sur la qualité de l'usage du produit ou service de part leur conformité aux exigences de qualité et d'aptitude à l'usage. De même, ils assurent la prise en compte des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie des produits ou des services, selon une approche multi-étapes et multicritères.

3.4 Nécessité de mise au point d'une méthodologie d'évaluation environnementale spécifique à l'informatique

L'évaluation environnementale, de manière générale, vise essentiellement à identifier et évaluer les impacts environnementaux issus d'une activité, d'un produit ou d'un service. Or, dans le cas des systèmes informatiques, en appliquant les méthodes disponibles, il paraît difficile d'établir une évaluation complète de ces impacts environnementaux. En effet, certaines méthodes disponibles permettent l'évaluation environnementale de plusieurs impacts environnementaux mais se focalisent sur un produit spécifique, sans prendre en compte l'organisation dans laquelle il se situe. C'est notamment le cas de l'ACV. D'autres méthodes en revanche, se focalisent sur l'organisation mais expriment leur résultat final sous la forme d'un indicateur environnemental unique comme le Bilan Carbone® par exemple. De ce fait, de nombreuses informations ne sont pas disponibles. **Ainsi, parmi les méthodes étudiées, il n'a pas été identifié de méthodes permettant une évaluation**

environnementale multi-impacts des systèmes informatiques et considérant l'organisation dans sa totalité.

Afin d'obtenir des résultats cohérents avec cet objectif, la méthodologie que nous proposons est basée sur une approche combinée **générale** au secteur d'application et **spécifique** à l'organisation étudiée. L'approche générale comprend les résultats d'études ACV portant sur les produits utilisés dans le périmètre de l'évaluation. Par conséquent, les résultats des ACV présentes dans la base de données Ecoinvent ont été extraits et apporteront des informations relatives aux phases de fabrication de ces équipements. L'approche spécifique réside dans l'évaluation des impacts ayant lieu sur le site d'étude (interne au périmètre d'étude). Cette deuxième partie de l'évaluation tient compte notamment des comportements des utilisateurs, des consignes d'utilisation ou encore des puissances électriques installées sur le site d'étude. Ainsi, l'ensemble des paramètres propres à l'organisation est alors considérée et doit entrer en considération dans le second volet de l'évaluation.

De plus, pour savoir quels équipements et quelle gestion il faut adopter pour minimiser les impacts sur l'environnement, il importe d'intégrer les considérations environnementales en amont du processus décisionnel, c'est-à-dire au moment d'élaborer le système informatique d'une organisation. Lorsque ce dernier est déjà en place, une évaluation du système actuel est nécessaire pour en connaître les atouts et les faiblesses et ainsi l'améliorer. **La méthodologie d'évaluation environnementale doit donc être spécifique à l'organisation en question, de manière à proposer des solutions d'améliorations réellement efficaces et adaptées à la situation.**

Par conséquent, il est nécessaire d'établir une méthodologie d'évaluation environnementale spécifique aux systèmes informatiques mais aussi spécifique à l'organisation dans laquelle cette évaluation est menée.

Partie 4 Conclusion de chapitre

4.1 Conclusions sur les enjeux relatifs aux différentes étapes du cycle de vie :

La revue des différentes étapes du cycle de vie des équipements nous permet d'en déduire l'hypothèse ci-après :

Hypothèse 1 : Les impacts environnementaux des TIC sont principalement « **délocalisés** » et « **invisibles** » par rapport à l'utilisateur final.

a. Impacts « locaux délocalisés »

Avec le « quasi-monopole » de l'Asie dans la production d'équipements informatiques, la planète se trouve confrontée à deux problématiques principales :

- Tout d'abord les conditions de production peu respectueuses, d'une part des conditions de travail sur le plan de l'hygiène et de la sécurité des travailleurs et d'autre part de l'environnement, engendrent des impacts sur la santé et les milieux naturels. Ces impacts locaux ont notamment été étudiés dans le cadre de l'analyse de la qualité de l'eau des rivières des pays producteurs. L'étude de Zhu et Al. (1997), portant sur la composition de 59 échantillons de sédiments provenant des principales rivières de Chine a réussi à dissocier les sources de contamination (naturelles ou anthropiques) de ces rivières selon leur teneur en éléments rares (particulièrement utilisés dans la production d'équipements électroniques) [Zhu et al., 1997]. Plusieurs études concluent qu'un changement de composition des sédiments aquatiques des rivières en Chine (notamment le Yangtse) est visible depuis deux décennies [Huh, Chen, 1999] [Ma et al., 2009] [Su et al., 2011].

Les conclusions de ces études montrent des pollutions à l'échelle locale, mais pouvant avoir des répercussions à plus grande échelle : la contamination des rivières entraînant une pollution des sédiments ainsi qu'une contamination des eaux marines. Les conséquences sur l'écosystème marin sont importantes.

- La délocalisation de cette production hors du territoire d'utilisation finale des biens produits contribue à la pollution sur un autre territoire. Les impacts locaux sont alors déplacés mais leur répercussion au niveau planétaire reste entière [Moreau et al., 2009]. Ce phénomène de délocalisation des entreprises contribue fortement au déplacement de la pollution. L'hypothèse du havre de pollution argumente cette idée en mentionnant le fait que les industries les plus polluantes ont migré depuis les pays développés vers les pays en développement [Akbofanci et Türüt-Asik, 2004] pour des raisons notamment économiques comme le coût de la main d'œuvre.

Le terme **d'impacts « locaux délocalisés »** retranscrit alors cette idée de déplacement géographique des impacts locaux générés par une activité.

b. Impacts « invisibles » aux yeux de l'utilisateur final

L'hypothèse du havre de pollution concerne la délocalisation des impacts. Par conséquent, les utilisateurs finaux des produits ne sont pas forcément conscients des conséquences de la production de ces équipements. En effet, les impacts n'ayant plus lieu sur le territoire d'utilisation, ils sont de ce fait invisibles aux yeux de l'utilisateur.

De plus, l'utilisateur final n'a généralement pas conscience des impacts générés lors des phases de fabrication et de retraitement des équipements. Le seul impact qu'il perçoit concerne son usage directement et par conséquent la consommation électrique qui en résulte. En effet, les moyens de production de l'électricité, bien que situés sur le territoire national, ne sont pas directement visibles par l'utilisateur. Par conséquent, l'électricité est souvent perçue comme une énergie propre. En 2011, 17% des français se déclare en faveur de l'énergie nucléaire et avance l'argument de l'absence d'émission de gaz carbonique pour justifier leur choix [Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire, 2012]. Ainsi, la perception des utilisateurs est faussée et la perception des impacts liés à la production d'électricité est faible. Ce dernier point est particulièrement vrai en France où le mix énergétique est composé à 74 % d'énergie nucléaire [Commission de Régulation de l'Energie, 2012].

Ces deux éléments (délocalisation des usines et perception d'un impact unique concernant la consommation électrique) font de l'informatique un secteur dont **les impacts sont « invisibles » aux yeux des utilisateurs**. Le WWF ajoute à ces deux éléments le fait que ces équipements « *sont souvent considérées comme « immatériels »*, [par conséquent] leurs impacts environnementaux sont souvent négligés » [WWF, 2011].

Cette hypothèse nous permet d'aboutir à notre première question de recherche : *Les différentes étapes du cycle de vie de ces équipements n'ayant pas lieu au même endroit, quels impacts environnementaux doivent être évalués : les impacts locaux et/ou planétaires ? Comment ?*

4.2 Synthèse sur les enjeux de l'évaluation environnementale

L'analyse des différents outils présentés précédemment et de leurs caractéristiques permettent de les positionner sur un schéma selon l'objet d'étude qu'ils considèrent ou l'échelle d'impact évaluée. Les descriptions méthodologiques disponibles dans la littérature scientifique permettent d'en connaître les principales caractéristiques, les impacts environnementaux qu'ils considèrent ou encore l'approche utilisée.

Sur la base des travaux de Gaëlle Raymond [Raymond, 2009], l'analyse des méthodes d'évaluation environnementales a été approfondie et la Figure 19 peut être dressée. Ainsi, sont mis en avant, pour chacun de ces outils :

- **l'objet étudié** : le site ou le produit
- **l'échelle d'impacts considérés** : locaux ou planétaires
- **l'approche méthodologique utilisée** : spécifique ou générique

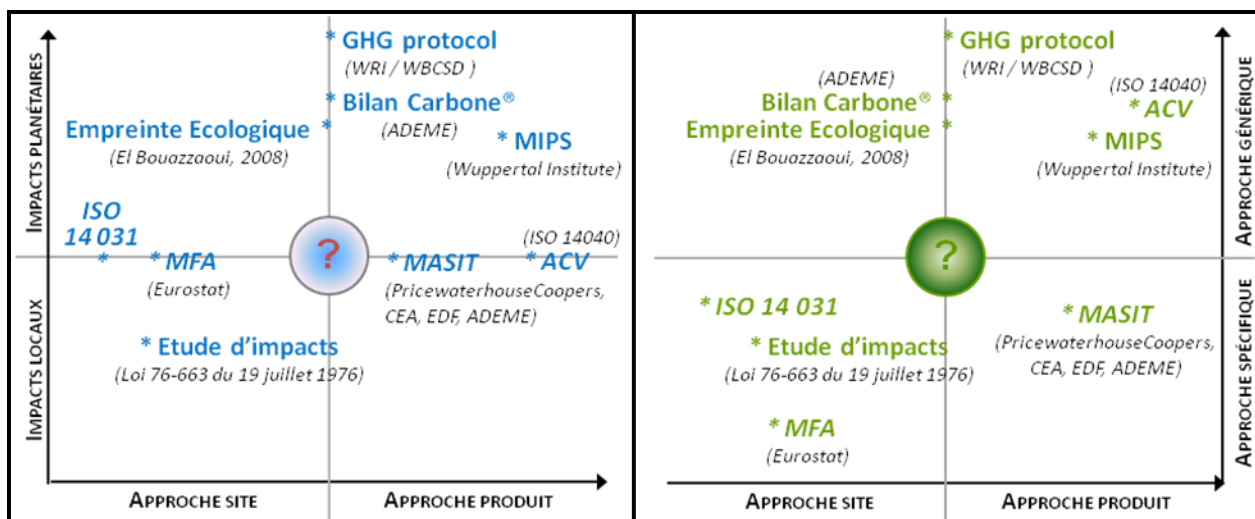


Figure 19 : Positionnement de 9 outils d'évaluation environnementale selon les approches et impacts considérés dans chacun d'entre eux.

Le positionnement des outils selon les axes précités, montre qu'aucun outil n'a été identifié à leurs intersections. Ainsi, nos travaux concernent l'approche couplée site / produit et impacts locaux / planétaires. Le GHG protocol et l'outil Bilan Carbone® sont situés à l'intersection site / produit mais les résultats obtenus sont mono-impact (impact sur le changement climatique). De même, aucune méthode étudiée n'a mis en évidence la possibilité de combiner une approche spécifique avec une approche générique.

Hypothèse 2 : Les méthodes d'évaluation environnementale actuelles ne se situent pas au croisement des approches sites et produit et ne permettent pas d'exprimer plusieurs impacts environnementaux.

Notre seconde question de recherche : *Une méthodologie d'évaluation environnementale peut-elle combiner l'inventaire de données spécifiques à un site avec une approche produit de type ACV ?*

4.3 Bilan du chapitre

Ce premier chapitre a permis d'identifier les enjeux relatifs aux systèmes informatiques et ceci notamment dans le contexte actuel de forte augmentation de la demande et des services proposés. Dans un second temps, les enjeux relatifs à l'évaluation environnementale de manière générale ont été présentés. Puis l'intérêt de réaliser une évaluation environnementale des systèmes informatiques a été mis en évidence. Cette évaluation environnementale paraît pertinente à la vue du contexte actuel et doit permettre aux différents utilisateurs que nous sommes de nous rendre compte des impacts que nos activités quotidiennes peuvent avoir sur l'environnement.

De même, il est important que cette évaluation ait lieu également à l'échelle de chaque organisation. En effet, les marges de manœuvre peuvent parfois paraître dérisoires à l'échelle d'une unité ou d'un foyer moyen mais l'estimation des gains potentiels à l'échelle d'une organisation devient pertinente.

En se focalisant sur la quantification de l'impact des systèmes informatiques, plusieurs conclusions peuvent apparaître :

- La majorité des études portent sur l'évaluation environnementale d'un produit (par exemple, un équipement informatique).
- Les études qui paraissent sur les équipements informatiques prennent en compte des données génériques concernant les phases d'utilisation des équipements. De fait, les organisations cherchant à établir un diagnostic de leurs infrastructures se trouvent confrontées à des outils peu adaptés à leur périmètre d'étude.
- Une des principales difficultés dans l'évaluation et la comparaison des impacts environnementaux des équipements informatiques résulte du fait que la technologie évolue très rapidement. Le paramètre relatif à l'ancienneté de l'étude devient donc non négligeable pour réaliser une évaluation environnementale pertinente.
- Enfin, en comparant le secteur informatique aux autres secteurs, il n'existe que peu de chiffres concernant l'évaluation environnementale d'une organisation. La confidentialité des informations dans le domaine jouant un rôle primordial dans cette problématique.

De plus, hormis certaines ACV qui sont réalisées pour des équipements informatiques comme les ordinateurs, les écrans et les imprimantes, les outils d'évaluation environnementale semblent peu souvent appliqués dans le secteur informatique. De même, certaines organisations réalisent leur BC®, mais le périmètre concerne l'ensemble de l'organisation et non uniquement le volet informatique de leur structure. D'où la troisième hypothèse de notre étude et la question de recherche qui lui est associée :

Hypothèse 3 : Les méthodes d'évaluation environnementale actuelles ne permettent pas une évaluation environnementale spécifique des systèmes informatiques d'une organisation.

Question de recherche : *Une organisation est-elle en mesure d'évaluer l'impact environnemental lié à cette partie de son activité ?*

Ainsi, afin de contribuer à la connaissance et à la maîtrise des impacts environnementaux, il paraît pertinent de développer une méthodologie permettant d'évaluer les impacts environnementaux relatifs aux systèmes informatiques présents au sein d'une organisation.

Le chapitre 2 présentera la méthodologie que nous avons développée afin de répondre aux objectifs définis dans ce premier chapitre, à savoir qu'il devient primordial de réaliser une évaluation environnementale des systèmes informatiques adaptée à l'échelle d'une organisation dans le but d'identifier des points faibles afin de proposer des solutions d'optimisation.

Les résultats obtenus dans le cadre de l'application de cette méthodologie seront développés au travers de deux cas d'étude dans le chapitre 3 avant d'aborder dans un dernier chapitre une discussion concernant cette méthodologie et les résultats d'évaluation obtenus puis les perspectives de ce travail.

L'organisation des hypothèses et des questions de recherche est schématisée et présentée en Figure 20.

Chapitre 1: Impact sur l'environnement des technologies de l'information et de la communication et outils d'évaluation environnemental

1^{ère} partie:

Les enjeux des technologies de l'information



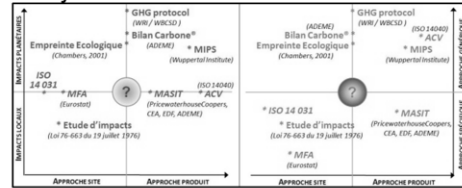
Hypothèse 1:

Les impacts environnementaux des TIC sont principalement « **délocalisés** » et « **invisibles** » par rapport à l'utilisateur final.

1. *Les différentes étapes du cycle de vie de ces équipements n'ayant pas lieu au même endroit, quels impacts environnementaux doivent être évalués: locaux et/ou planétaires ? Comment ?*

2^{ème} partie:

Les enjeux de l'évaluation environnementale



Hypothèse 2:

Les méthodes d'évaluation environnementale actuelles ne se situent pas au croisement des approches sites et produit et ne permettent pas d'exprimer plusieurs impacts environnementaux.

2. *Une méthodologie d'évaluation environnementale peut-elle combiner l'inventaire de données spécifiques à un site avec une approche produit de type ACV ?*

3^{ème} partie:

Les enjeux de l'évaluation environnementale dans le secteur des technologies de l'information

Hypothèse 3:

Les méthodes d'évaluation environnementale actuelles ne permettent pas une évaluation spécifique des systèmes informatiques d'une organisation

3. *Une organisation est-elle en mesure d'évaluer l'impact environnemental lié à cette partie de son activité ?*

Figure 20: Synthèse des 3 hypothèses de recherche issues du chapitre 1

Chapitre 2 Elaboration d'une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux des services proposés par les technologies de l'information

Le premier chapitre a présenté les enjeux liés à l'utilisation et la fabrication des systèmes informatiques. Il a permis de mettre en évidence les connaissances nécessaires à l'élaboration d'une méthodologie pour l'évaluation des impacts environnementaux locaux et globaux liés à la fabrication et à l'utilisation des équipements des technologies de l'information.

Les objectifs de la méthodologie qui sera proposée dans ce chapitre sont d'une part de pouvoir connaître et maîtriser les impacts environnementaux et, d'autre part, de proposer des solutions d'optimisation du système d'information. Ils seront abordés dans la première partie de ce second chapitre.

La deuxième partie présentera la démarche méthodologique proposée depuis le recueil des données jusqu'à l'évaluation des gains liés aux propositions d'amélioration. Les méthodes de calculs et les hypothèses pouvant être posées seront également explicitées.

Enfin, la troisième partie propose une synthèse et une conclusion de ce travail de recherche ayant abouti à la proposition d'une méthodologie d'évaluation environnementale d'un système d'information structurée en cinq étapes, présentées dans la Figure 21.

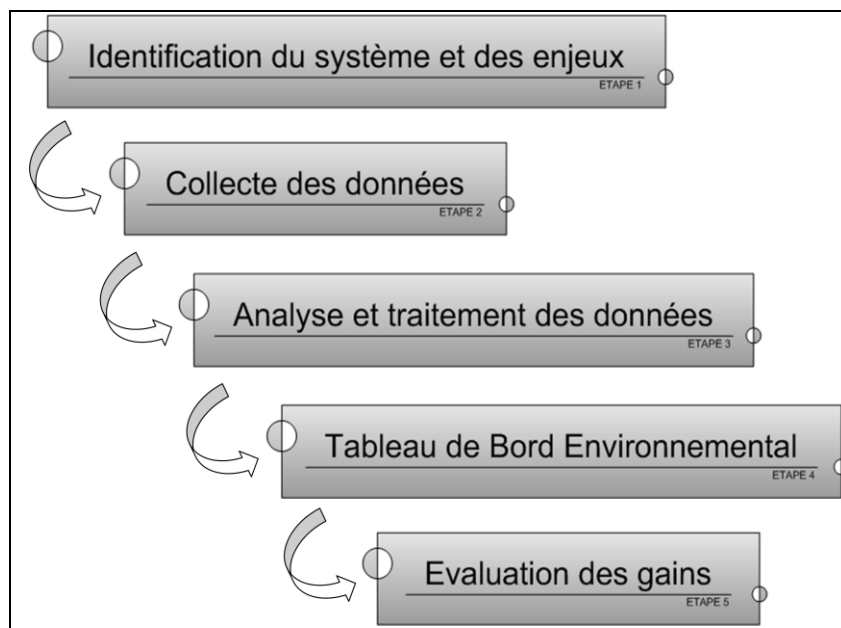


Figure 21: Schéma de présentation des 5 étapes de la méthodologie

Partie 1 Objectifs de la méthodologie

L'intérêt pour une organisation de mettre en œuvre une démarche d'évaluation environnementale est de connaître ses impacts environnementaux qui résident notamment dans une meilleure connaissance de sa structure afin de pouvoir anticiper les changements futurs. Les impacts environnementaux peuvent être de différentes natures tels que la contribution au changement climatique, l'acidification, la déplétion des ressources ou encore la contribution au phénomène d'ozone stratosphérique. De plus, une meilleure connaissance des impacts environnementaux peut permettre de mieux anticiper les changements comme l'augmentation du coût des énergies ou encore les évolutions réglementaires ou fiscales. La méthodologie proposée a pour premier objectif de **caractériser les conséquences sur l'environnement d'un service**. De plus, dans le cas des systèmes informatiques, les impacts environnementaux sont généralement peu connus voire invisibles pour les utilisateurs finaux. En effet, les impacts environnementaux les plus importants ont principalement lieu lors de la phase de fabrication [Choi et al., 2006], phase dont l'utilisateur ne perçoit pas les impacts environnementaux. **La caractérisation des impacts environnementaux « invisibles » aux yeux des utilisateurs constitue donc un des objectifs de cette méthodologie.**

La connaissance des impacts environnementaux permet à l'organisation d'identifier les points forts du service étudié ainsi que les points sensibles. Ceci a pour principal intérêt d'agir en anticipant les évolutions possibles au niveau des exigences réglementaires mais aussi des diverses parties prenantes. Plusieurs études [Gilet, 2000] [Guinée et al., 2002] [Ruediger et Williams, 2003] [Wiedmann et al., 2006] [Dao et al., 2011] se sont consacrées à la présentation des impacts environnementaux, prenant généralement en compte des données génériques (base de données). Pour cette raison, dans le cadre de la méthodologie proposée, un protocole de collecte de données a été établi spécifiquement pour l'organisation étudiée. Ainsi, les impacts environnementaux évalués sont propres à l'entité étudiée avec l'emploi dès que possible de données spécifiques à l'organisation. Les bases de données génériques sont utilisées lorsque les données ne sont pas accessibles au niveau spécifique.

Une évaluation spécifique combinée à une approche générique semble donc pertinente pour mettre en évidence les atouts et les faiblesses d'une organisation afin d'agir dans un but **de réduction de ses impacts environnementaux**.

Ainsi, cette action sur les points forts et points sensibles est renforcée par l'approche spécifique menée dans le cadre de l'étude. **L'originalité de l'étude repose sur le croisement de données génériques (tirées de bases de données) et spécifiques (obtenues par des enquêtes de terrain).**

Ainsi, la méthodologie développée se veut être un outil d'aide à la décision reposant sur des données réelles autant que possible, via une approche multicritère. La prise de décision finale concernant les solutions de réduction des impacts étant basée sur le principe d'éco-efficience alliant aussi bien des aspects environnementaux qu'économiques.

Partie 2 Démarche de développement de la méthodologie

La méthodologie d'évaluation environnementale développée se base sur une démarche en cinq étapes (Figure 21) permettant d'exprimer les impacts environnementaux des systèmes informatiques d'une organisation afin d'identifier des points forts et des points sensibles. Pour répondre aux objectifs de la méthodologie, il est nécessaire de se baser sur les résultats des impacts environnementaux obtenus dans le tableau de bord environnemental ainsi que sur l'évaluation des gains potentiellement réalisables et donc des choix d'amélioration possibles.

2.1 Etape 1 : Identification du système et des enjeux

2.1.1 Le système étudié

La méthodologie permet l'expression des impacts environnementaux des systèmes informatiques d'une organisation. Par conséquent, avant d'entamer l'étude, il est nécessaire de définir le système qui sera évalué et d'en identifier les limites.

Dans le cadre de notre étude, nous cherchons à exprimer les impacts environnementaux liés à la fabrication et à l'utilisation des équipements informatiques au sein d'une organisation. Le système étudié a été représenté sous la forme d'une représentation SADT (*Structured Analyses and Design Technique*) [Vernadat, 1996] et est présentée dans la Figure 22.

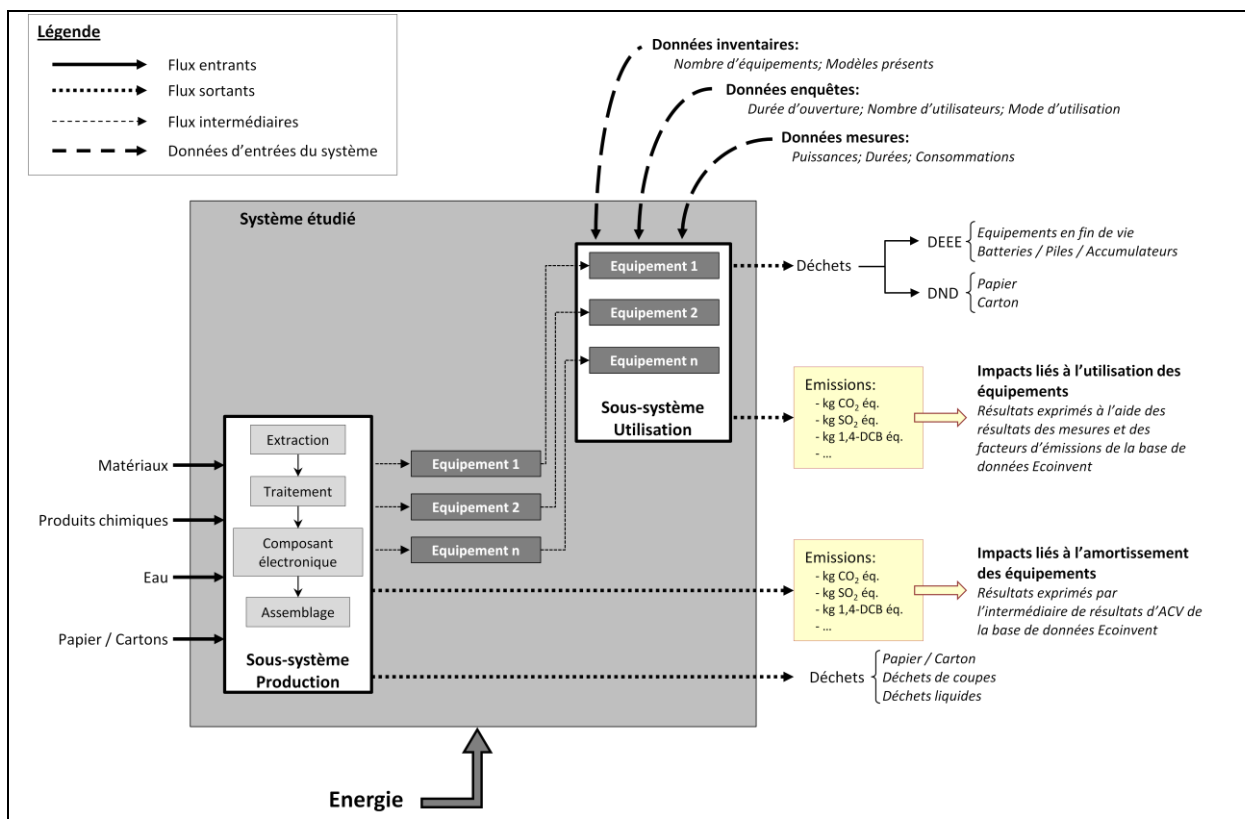


Figure 22: Représentation du système étudié

2.1.2 Les enjeux

Les enjeux peuvent être classés en quatre catégories : les enjeux réglementaires, économiques, stratégiques et managériaux [Gondran, 2001].

- **Les enjeux réglementaires**

Le nombre de textes réglementaires relatifs à l'environnement n'a cessé de croître ces dernières années, engendrant des exigences de plus en plus strictes. De plus, trois ans après le lancement du Grenelle de l'environnement, la loi Grenelle II a été publiée en 2010. Les objectifs entérinés par la loi Grenelle I sont déclinés dans cette loi qui se compose de 257 articles. Selon le ministère chargé de l'environnement, environ 200 décrets seront adoptés entre 2011 et 2013 afin de mettre en œuvre cette loi. De nombreuses dispositions concerneront les PME, notamment dans le domaine de l'énergie, des bâtiments, des déchets, et de la fiscalité (par exemple la possibilité pour les collectivités de mettre en place une taxe sur les eaux pluviales).

La description du contexte réglementaire relatif aux équipements électriques et électroniques a été présentée dans le Chapitre 1 et doit également être mise en perspectives des obligations applicables à l'organisation étudiée. De plus, en 2009, la contribution climat-énergie était en cours de réflexion et de nombreuses études ont été réalisées afin de quantifier les impacts environnementaux et ainsi estimer quel serait le coût lié à la mise en place de cette contribution au niveau national. Des discussions politiques ont finalement amené à son élimination. En 2011, un décret impose la réalisation d'un bilan des émissions de GES [Journal Officiel de la République Française, 2011]. Par l'application d'une méthode d'évaluation environnementale permettant l'expression des impacts environnementaux, il sera alors possible de répondre aux exigences de ce décret.

Il est désormais crucial pour les entreprises d'anticiper l'évolution de la législation en évaluant leurs impacts environnementaux et en mettant en place des solutions afin de les réduire. En effet, l'entreprise proactive peut s'adapter à son rythme. A contrario, lorsque qu'une nouvelle loi est votée, la mise en conformité se fait à marche forcée et les délais souvent courts peuvent mettre l'entreprise en difficulté.

- **Les enjeux économiques**

Les enjeux économiques répondent à l'objectif principal de maîtrise et de réduction des coûts liés au fonctionnement d'une organisation comme par exemple les consommations en eau, énergie, matières premières ou consommables. La réalisation d'une évaluation environnementale permet d'identifier les postes les plus consommateurs afin d'agir de manière adaptée sur ceux où des économies sont potentiellement réalisables. De plus, le contexte réglementaire actuel impose différentes taxes (fiscalité environnementale comme la Taxe Générale sur les Activités Polluantes - TGAP) dont le montant peut dépendre des consommations précédentes. L'atteinte de l'objectif va donc de pair avec le respect de la réglementation en vigueur.

- **Les enjeux stratégiques**

Les principaux enjeux stratégiques relatifs à l'environnement résident dans l'anticipation des demandes des clients qui recherchent des produits de plus en plus éco-responsables. De plus, la préoccupation de l'environnement permet à une organisation d'améliorer son image de marque et ainsi profiter de nouvelles opportunités de marché. Enfin, les enjeux stratégiques sont associés aux pressions exercées par les diverses parties intéressées comme les prestataires, les clients, les actionnaires, les associations, ...

- **Les enjeux managériaux**

Les enjeux managériaux identifiés résident essentiellement dans l'instauration d'une démarche environnementale comme un système de management environnemental (SME). Ce dernier permet de motiver le personnel à agir en ce sens et a un effet fédérateur du projet et de satisfaction de ses convictions éthiques.

Fréquemment issue d'un engagement de la part d'un responsable, un SME permet de minimiser les risques de non respect de la réglementation mais aussi d'éviter de perdre des parts de marchés face à un concurrent prenant en considération l'environnement. Enfin, une démarche environnementale engendre une diminution des risques d'accident ou de pollution et les suites liées à la responsabilité civile et pénale des dirigeants

2.2 Etape 2 : Collecte des données

2.2.1 L'échantillonnage

Le premier principe de l'échantillonnage concerne le choix des équipements qui feront l'objet de mesures. Ce choix ne peut se faire de manière arbitraire, ainsi **les mesures doivent être réalisées sur un échantillon représentatif des équipements de l'entité étudiée.**

Un échantillon représentatif est défini en statistique comme un « *sous-ensemble, choisi sur la base de critères standards, de telle façon à ce que l'échantillon représente fidèlement l'ensemble (c'est à dire la population) dont il est extrait* » [Bénazeth et al., 2004]. Dans notre cas, l'échantillon représentatif sera celui permettant d'être le plus proche de la réalité. Pour cela, au moins un exemplaire de chaque équipement présent dans l'organisation étudiée doit faire l'objet de mesures. Dans le cas d'une très grande diversité du nombre d'équipements, des regroupements seront alors réalisés. Au minimum, un équipement de chaque catégorie fera alors l'objet de mesures.

La détermination des catégories d'équipement se fera dans un premier temps en fonction de la nature des équipements : ordinateur de bureau, ordinateur portable, imprimante laser, imprimante multifonction, ... Mais il peut exister des sous-catégories au sein même de ces catégories. Ces sous-catégories étant alors déterminées par rapport aux logiciels utilisés ou encore au type d'utilisation qui est faite de l'équipement. Ces critères pouvant être multiples, il est difficile d'établir des regroupements sans connaître plus en détail les équipements présents (détaillés lors des applications dans le chapitre 3 de ce manuscrit).

Dans cette optique, une coopération avec le service informatique de l'organisation étudiée est indispensable. Les connaissances des personnels du service informatique permettent dans un premier temps de déterminer les regroupements d'équipements logiques et cohérents. Dans un second temps, leur regard sur l'organisation du système informatique et les différents utilisateurs permettent l'identification de l'équipement ou des équipements qui feront l'objet de mesures. Ainsi, le second principe qui doit être appliqué lors de la collecte des données résulte de la détermination de l'échantillon représentatif : **Sa constitution sera réalisée en coopération étroite avec le service informatique de l'organisation étudiée.**

L'ensemble des établissements et des équipements présents dans le périmètre étudié ne peuvent généralement pas faire l'objet de mesures. Par conséquent, il est souvent nécessaire de réaliser un

échantillon représentatif. Cet échantillon peut être réalisé à deux niveaux. Dans un premier temps, ce sont les sites d'études qui doivent être sélectionnés avant que, dans un second temps, les équipements ne soient choisis. La Figure 23 illustre un exemple d'échantillonnage pour un groupe composé de plusieurs catégories d'établissements (Business Units composées d'établissements relativement homogènes, par exemple).

- La première étape consiste à **identifier les différentes catégories d'établissements** en rassemblant des établissements dont les équipements informatiques présents et leur usage soient relativement homogènes.
- **Choix des sites de mesures** : si l'organisation étudiée comporte plusieurs catégories d'établissements elles-mêmes composées de plusieurs sites, alors le choix du site de mesures devra être réalisé en accord avec la direction (ou les services techniques) de l'organisation. Par conséquent, le site retenu pour chaque catégorie devra être représentatif de l'ensemble des autres sites. Pour cela, des informations précises devront être recueillies auprès des services généraux comme la taille de l'établissement, le nombre d'employés, le type d'activité, etc. Enfin, l'inventaire de l'établissement retenu devra être proche de l'inventaire de la moyenne obtenue pour l'ensemble des sites d'une même catégorie. Pour finir, le choix du site retenu comme site expérimental devra obtenir l'accord à la fois de l'organisation étudiée par l'intermédiaire du responsable d'établissement et des services techniques ainsi que de l'équipe réalisant l'évaluation environnementale.
- Après le choix concernant les sites, le **choix des appareils mesurés** et des **personnes interrogées** doit être réalisé dans le même objectif. L'inventaire a permis d'établir la liste des équipements présents sur les différents sites. Le(s) site(s) retenu(s) comporte(nt) donc un panel d'équipements représentatifs de ceux présents dans les autres établissements. Les mesures seront réalisées en priorité sur, au minimum, un équipement de chaque catégorie d'équipements représentées.

L'ensemble des responsables d'établissement retenus comme sites de mesures sera consulté afin d'identifier les différences pouvant exister sur le site ainsi que les personnes pouvant être interrogées pour l'enquête.

- Enfin, le **choix des durées de mesures** doit être cohérent avec le type d'équipement, l'utilisation qui en est faite et la précision de l'information voulue.

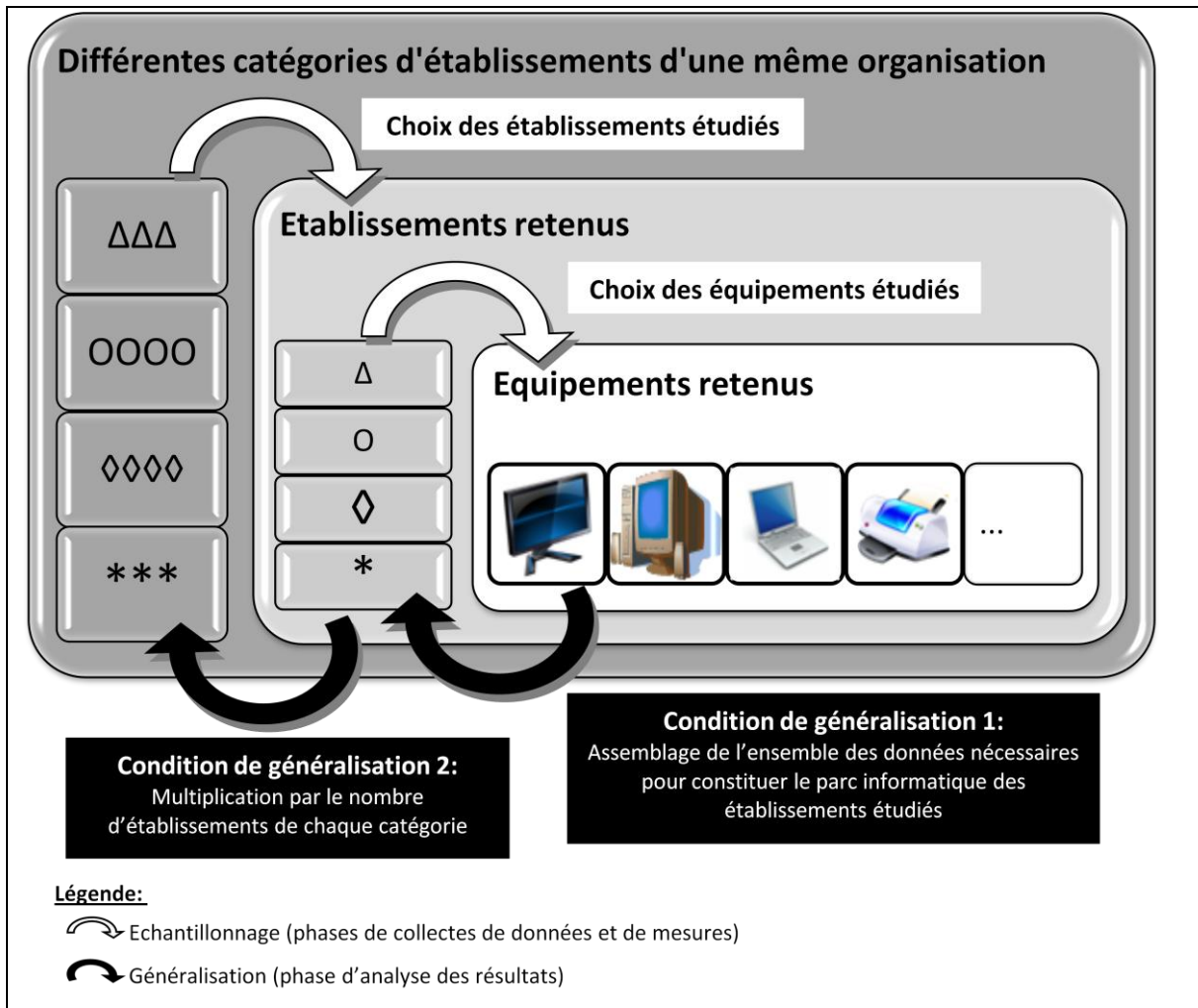


Figure 23: Schéma de principe de l'échantillonnage

Ainsi, les mesures de l'ensemble des équipements n'étant pas réalisables, elles ont été menées sur un échantillon considéré comme représentatif de l'ensemble des équipements présents sur le périmètre de l'étude. Par conséquent, des hypothèses ont été nécessaires de manière à permettre la réalisation de l'ensemble des calculs.

- **Hypothèse d'équivalence :**

Une **hypothèse d'équivalence** entre deux équipements a été établie lorsque pour la même catégorie d'équipements, plusieurs modèles étaient présents mais seul un ou deux ont pu faire l'objet de mesures. Dans ce cas, les équipements qui n'ont pas fait l'objet de mesures ont été considérés comme étant équivalents à l'équipement pour lequel des résultats de mesures sont disponibles. Si plusieurs équipements d'une même catégorie ont été mesurés, alors les valeurs pour les équipements de la même catégorie seront estimées à la moyenne des valeurs mesurées. L'écart-type sera également calculé afin de connaître la représentativité de la moyenne calculée.

- **Hypothèse de rythme de fonctionnement :**

Des hypothèses doivent également être menées quant à la représentativité de la mesure (réalisée sur une durée de temps limitée) dans le temps. Ainsi, pour certains équipements utilisés de façon non homogène au cours de l'année (les traceurs par exemple), une hypothèse concernant leur rythme de fonctionnement a été établie en se basant sur des tendances annuelles d'utilisation au

sein de l'organisation. Pour cela, d'autres indicateurs peuvent être recherchés pour estimer la représentativité sur l'année de la mesure effectuée sur une durée réduite. Ainsi, par exemple, les consommations annuelles de papier ont été recherchées et mises en perspectives de l'utilisation faite durant la période de mesures du traceur afin d'en déduire son rythme d'utilisation.

- **Hypothèse relative aux poids des équipements :**

Lorsque la fiche constructeur ne permet pas d'obtenir l'information concernant le poids de l'équipement, des pesées à l'aide d'une balance ont été réalisées afin de les obtenir.

De même, certains équipements dont la donnée était disponible dans la fiche constructeur ont également fait l'objet d'une pesée afin de vérifier sa validité.

Enfin si, pour des raisons quelconques, le poids des équipements n'a pu être obtenu, des modèles voisins à l'équipement présent ont été recherchés et le poids a été calculé en réalisant une moyenne des poids de ces équipements.

2.2.2 Collecte des données

L'identification des données nécessaires constitue la base de la réussite d'une évaluation. Il est donc important d'accorder une attention particulière aux critères (de qualité et de fiabilité) que doivent respecter ces données : l'accessibilité, la pertinence, la durabilité, l'utilité, l'efficacité et l'efficience [Victor, 2007].

Ces données peuvent être des informations recueillies auprès des différents acteurs concernant la structure générale de l'organisation ou des données plus spécifiques relatives aux équipements présents. Les personnes susceptibles de fournir ces données devront être identifiées dans un premier temps avant de commencer la collecte.

Le choix des données nécessaires se base sur les indicateurs d'évaluation environnementale sélectionnés. Ainsi, seules les données réellement indispensables, c'est-à-dire les données permettant de constituer le tableau de bord environnemental (TBE), seront recherchées. Ce TBE doit donc être établi préalablement à la réalisation de cette phase de collecte de données. Ces dernières venant le compléter au fil de l'avancée de la collecte.

Les données nécessaires dans cette méthodologie sont hétérogènes (consommations électriques annuelles en kWh, durées d'utilisation des équipements en heures par semaine, nombre de pages imprimées par an, etc.) et seront obtenues par l'intermédiaire de trois étapes différentes. Ces étapes de collecte des données sont réalisées de manière itérative afin de compléter et d'enrichir la collecte d'information. Ainsi, il s'agit :

- De données issues **d'inventaires** pour connaître la quantité et la nature des équipements présents (ordinateurs fixes, portables, imprimantes, ...) ;
- De bilans annuels de consommations électriques (des différents équipements présents mais aussi des locaux pour estimer la part de consommation attribuée à l'informatique et ainsi connaître quel est le périmètre engagé dans l'étude) ;
- De **mesures** réalisées *in-situ* sur les équipements faisant l'objet de l'évaluation.

A cela s'ajouteront les résultats des **enquêtes** menées auprès des différents utilisateurs des équipements et responsables d'équipe pour connaître plus précisément les comportements et les consignes en vigueur.

- **Inventaire**

L'**inventaire** du matériel informatique consiste à récupérer les références exactes et les quantités précises de chaque équipement présent dans les établissements de l'organisation. Ces inventaires peuvent généralement être obtenus au sein de la division informatique de l'organisation ou des responsables de site. Ces données, bien que fiables, sont recueillies au niveau de la gestion centrale de l'organisation et devront être confirmées et/ou complétées lors des visites à l'occasion de la phase de mesures. Un exemple de fichier d'inventaire transmis par le service informatique d'une entité sur laquelle nous avons expérimenté notre méthodologie est présenté en Annexe 3 à titre d'exemple.

- **Enquêtes**

Les **enquêtes** auprès des utilisateurs des équipements informatiques ont pour objectif de connaître plus en détail les modalités d'utilisation de ce matériel. Pour obtenir des informations auprès des différents acteurs concernés, plusieurs méthodes existent comme des entretiens, des questionnaires ou encore des groupes de discussion. Dans notre cas, nous avons opté pour un questionnaire administré en face à face. Ce dernier, réalisé spécifiquement pour les besoins de l'étude, prendra en considération à la fois l'entité ou le site d'étude auquel il se réfère ainsi que le statut de la personne qui le remplit (utilisateur, responsable d'équipe, services généraux...).

L'obtention des données nécessaires pour établir et quantifier l'ensemble des impacts environnementaux liés à l'utilisation des systèmes informatiques peut s'avérer fastidieuse. En effet, le nombre d'interlocuteurs éventuels pour obtenir une information peut être important. Il s'agit alors d'identifier la personne susceptible de posséder l'information recherchée. Une autre difficulté rencontrée pour effectuer ce travail de collecte de données est d'obtenir des données précises et complètes. Ainsi, cette étape de collecte implique régulièrement la réalisation d'hypothèses et d'approximations pour compenser les données manquantes. Pour palier à l'ensemble de ces difficultés, un système d'information doit être établi afin de permettre la conservation des informations de manière détaillée mais aussi de les rendre facilement accessibles et utilisables. Néanmoins, un système d'information très complet encourt le risque d'être complexe et non tenu à jour. En revanche, un système d'information plus simple risque au contraire de ne pas pouvoir fournir un certain nombre d'informations utiles.

Les données et informations recueillies sont nécessaires à plusieurs niveaux :

- pour un benchmark et la comparaison des différents types d'utilisation de l'informatique ;
- pour l'identification de problèmes potentiels au sein d'une organisation comme par exemple une consommation d'électricité trop importante par rapport aux équipements présents ou encore le fait que certains équipements ne soient jamais mis hors tension ;
- dans l'aide à la formulation de solutions aux problèmes identifiés et pour la détermination de mesures d'optimisation de la situation.

Ces trois niveaux interagissent entre eux tout en restant indépendants : échelles de temps distinctes, informations nécessaires et niveaux de détails différents.

L'essentiel du questionnaire porte sur les pratiques d'utilisation, les durées d'utilisation, les modalités de mise en veille des différents équipements ainsi que des informations relatives à la gestion des consommables et des déchets ont été recueillies. Le questionnaire est présenté en Annexe 4.

- **Mesures**

Les **mesures** sur le terrain ont été réalisées grâce à des boîtiers de mesures de type « économètres » (économètre avec interface USB, Standby-Energy-Monitor Log 16, NZR) (Figure 24).



Figure 24: Photo d'un économètre

Ces boîtiers permettent d'obtenir plusieurs informations comme la puissance, l'intensité ou encore le voltage.

Ainsi, les consommations effectives des différents équipements sont connues pour une semaine d'utilisation puis, en prenant l'hypothèse de la représentativité de cette semaine, estimées sur l'année complète. Ces consommations variant au cours de la journée et en fonction de l'utilisation qui en est faite, les mesures permettent de mieux comprendre le fonctionnement de chaque équipement. Pour réaliser ces mesures, nous disposons de dix économètres. Les données sont recueillies par l'intermédiaire d'un port USB et d'un logiciel fourni par le constructeur (logiciel *Vaddev® Distant meter reading system Version 1.0.1*). Lors de la mise en place des boîtiers, il est indispensable de bien identifier le numéro du boîtier (numéro de référence dans le logiciel) afin d'attribuer par la suite les bonnes mesures au bon équipement. Pour cela une fiche de suivi présentée dans le Tableau 20 a été élaborée. La colonne COM permettant l'identification du boîtier dans le logiciel.

Tableau 20: Exemple de fiche de suivi pour la prise de mesures

Etablissement:										
Date du relevé:										
COM	Appareil mesuré	Date d'installation de l'appareil	Date de relevé du boîtier	Durée de la mesure	W (puissance instantanée)	kWh (cumul depuis que l'appareil est branché)	W Lo (valeur la plus basse)	W Hi (valeur la plus haute)	Intensité (valeur instantanée)	Voltage (instantané)
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										

Ces trois phases sont réalisées en parallèle et un feed-back entre-elles paraît incontournable de manière à valider et compléter les informations.

Les raisons d'un feed-back entre les différentes phases sont multiples. La plus importante concerne la fiabilité et la justesse des données. En effet, un inventaire peut ne pas être à jour. Par conséquent, les derniers changements d'équipements peuvent ne pas être mentionnés. Les visites sur le terrain pour les mesures permettront alors de valider ou modifier l'inventaire. Des étapes ultérieures relatives aux calculs des puissances et consommations tiennent compte de l'inventaire, ce dernier devra donc être le plus fidèle possible à la réalité. Les compléments et/ou rectifications apportés seront donc essentiels pour la réalisation de la suite des étapes. De même, lors de la phase d'enquête, des précisions sur les équipements peuvent être apportées, notamment concernant leur utilisation. Ces éléments, indispensables à la compréhension du rythme d'utilisation renforceront les données recueillies lors de la phase de mesures.

La Figure 25 schématise cette étape de collecte de données.

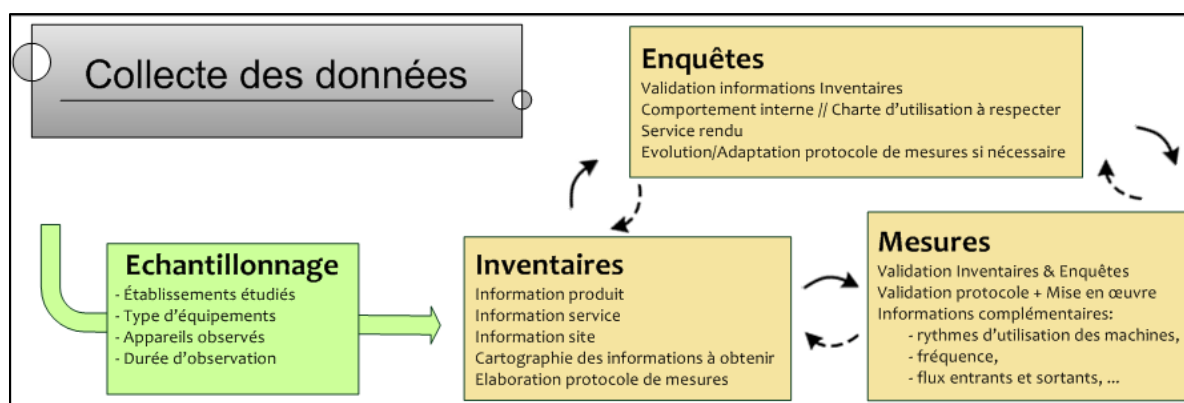


Figure 25: Détail de l'étape de collecte des données

2.2.3 Equipements (Modèles, nombres, ...)

L'étude portant sur le système informatique (centralisé ou distribué) d'une organisation, la description des équipements informatiques présents tient une place importante dans cette méthodologie. Ainsi, il a été décidé de suivre l'évolution du parc informatique, en regroupant les différents types d'équipements en plusieurs catégories. Ces catégories peuvent évoluer en fonction du service étudié. De manière générale, les catégories retenues sont les suivantes :

- les ordinateurs fixes,
- les ordinateurs portables,
- les ultra-portables,
- les serveurs,
- les imprimantes (petits modèles),
- les imprimantes (grands modèles : Multi Function Printer – MFP),
- les écrans,
- les appareils spécifiques métiers.

De manière à s'assurer de l'homogénéité des catégories ainsi constituées ou de la nécessité de les diviser en sous catégories, les éléments suivants sont détaillés :

- la quantité d'équipements (nombre) ;
- les modèles (marque) ;
- l'année de mise en service.

Enfin, le comportement des utilisateurs ayant un rôle fondamental dans l'utilisation des équipements, il est relevé à partir d'enquêtes auprès d'un échantillon d'utilisateurs de l'organisation. Ces enquêtes permettent dans un premier temps de connaître le comportement de l'utilisateur dont les équipements ont fait l'objet de mesures. Dans un second temps, en réalisant des enquêtes auprès d'autres utilisateurs il est possible d'en déduire dans quel cadre les résultats des mesures peuvent être généralisés à l'ensemble des équipements. Des hypothèses de comportements sont alors établies pour obtenir un scénario type pour chaque catégorie (voir sous-catégorie) d'équipements.

2.2.4 Rythme d'utilisation

Comme évoqué précédemment, des mesures seront réalisées sur divers équipements. Ces mesures *in situ* serviront à établir des profils d'utilisateurs ainsi qu'à calculer les rythmes d'utilisation.

Les rythmes d'utilisation permettront ainsi d'obtenir :

- l'estimation de la durée de fonctionnement ;
- l'estimation de la durée de mise en veille de l'équipement ;
- l'estimation de la durée d'arrêt de l'équipement.

Ces rythmes d'utilisation permettront également d'établir des ratios d'utilisation des différents équipements, à savoir :

- % d'utilisation de l'équipement dans l'année ;
- % d'utilisation de l'équipement par rapport à la durée d'ouverture du site. Dans ce ratio, les équipements fonctionnant en permanence tels que les serveurs pourront avoir des valeurs supérieures à 100%.

2.2.5 Puissances et Consommations (selon les différents modes : arrêt, veille, activité)

La puissance est classiquement définie en électricité comme « le produit de valeurs efficaces du courant et de la tension dans un circuit électrique » [Le Petit Robert, 2001]. Il s'agit donc d'une quantité d'énergie fournie. En multipliant cette puissance par une unité de temps, la consommation d'un équipement quelconque peut être obtenue [Evan, 2003].

Ainsi, la puissance P est égale au produit de la tension U par l'intensité I du courant soit l'Équation 18 :

$$P = U \times I \times \cos \varphi \quad \text{Équation 18}$$

Avec :

- U : tension exprimée en volts (V)
- I : intensité du courant continu exprimée en ampères (A)
- P : puissance consommée exprimée en watts (W)
- $\cos \varphi$: facteur de puissance en courant alternatif.

Encart n° 2 : Puissance électrique et facteur de puissance

Le facteur de puissance est une grandeur qui apparaît en courant alternatif. Il est noté $\cos \varphi$. Ce facteur est lié au déphasage φ existant entre l'intensité (I) et la tension (U) du courant alternatif. Le déphasage φ dépend directement des caractéristiques des appareils utilisant le courant.

Ainsi, en courant alternatif, la tension et l'intensité sont variables et de la forme

$$u(t) = \sqrt{2} \times U \times \cos(\omega t)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \times I \times \cos(\omega t + \varphi)$$

Avec les valeurs efficaces d'intensité et de tension I et U .

De plus, $p(t) = u(t) \cdot i(t) = 2 \times I \times U \times \cos(\omega t) \times \cos(\omega t + \varphi)$

Soit

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = 2 \times I \times U \times [\cos(\omega t)^2 \times \cos(\varphi) - \frac{\sin(2\omega t)}{2} \times \sin(\varphi)]$$

Or

$$\langle \cos(\omega t)^2 \rangle = \frac{1}{2}$$

Et $\langle \sin(2\omega t) \rangle = 0$

Par conséquent, la puissance moyenne de $P = \langle p(t) \rangle = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$

Quand $\varphi = 0$, c'est à dire quand l'intensité et la tension sont en phase, $\cos(\varphi) = 1$ et $P = UI$

La puissance moyenne est alors maximale.

Dans le cadre de notre étude, les calculs sont réalisés sur la base des résultats des mesures *in situ*. Avant de détailler les puissances pour chaque catégorie d'équipements, la **puissance maximale totale** sera calculée. Cette donnée permettra de connaître la puissance maximale que le réseau doit supporter.

Les puissances pouvant varier d'une catégorie d'équipements à l'autre et d'un modèle à l'autre, des moyennes seront établies.

- la **puissance moyenne en activité**, estimée lors de l'activité de l'ensemble des postes
- la **puissance moyenne en veille**, estimée pour l'ensemble des postes
- la **puissance moyenne à l'arrêt**, estimée pour l'ensemble des postes

2.2.6 Durée de vie

La durée de vie des équipements donnera une indication sur la politique de gestion des équipements de l'organisation ainsi qu'une estimation des déchets informatiques produits chaque année. La durée de vie d'un équipement permet de calculer son « amortissement environnemental » afin d'avoir une donnée d'impact environnemental alloué à un an d'utilisation de l'équipement. Ce calcul est détaillé dans l'Équation 19 :

$A_e = \frac{I_e}{d}$	Équation 19
-----------------------	--------------------

Avec :

- A_e = Amortissement environnemental
- I_e = Impact environnemental
- d = durée de vie de l'équipement (en année)

Ainsi, pour le calcul des impacts environnementaux liés à la fabrication et à la phase de fin de vie, la durée de vie est un paramètre important.

La volonté et la possibilité pour une organisation d'allonger la durée de vie de ces équipements peut être un axe d'action pour réduire les impacts environnementaux liés à son activité.

2.3 Etape 3 : Traitement des données

2.3.1 Elaboration d'indicateurs opérationnels

Les différentes données obtenues sur les équipements informatiques de l'organisation étudiée permettront d'obtenir des informations directes (à partir des méthodes de collecte d'information indiquées précédemment) ou calculées à partir des données mesurées.

Les calculs réalisés sur les données obtenues par des mesures peuvent concerner les puissances, les durées hebdomadaires ou encore les consommations :

- Puissances moyennes : (valable pour les différents modes : activité, veille, arrêt)

$P_{ma} = \frac{\Sigma(\text{valeurs} > \text{Valeur en veille définie})}{\text{Nombre Valeurs} > \text{Valeur en veille définie}}$	Équation 20
---	--------------------

Avec :

- P_{ma} = Puissance moyenne (en kW) des équipements en mode activité

- Durée hebdomadaire d'utilisation : (valable pour les différents modes)

$$T_{a(hebdo)} = \frac{\text{Nombre Valeurs} > \text{Valeur en veille définie}}{\text{Nombre de valeurs de la semaine}} * 168 \quad \text{Équation 21}$$

Avec :

- $T_{a(hebdo)}$ = Temps moyen hebdomadaire (en heure) que les équipements ont passé en mode activité
- Consommations (plusieurs calculs possibles) :

Sur la base des calculs précédents, il est alors possible de réaliser une série de calculs permettant d'aboutir à la consommation moyenne hebdomadaire selon les différents modes et par conséquent à la consommation hebdomadaire moyenne tenant compte des différents états au cours de la semaine : consommation hebdomadaire en mode arrêt, consommation hebdomadaire en mode activité et consommation hebdomadaire en mode veille. Pour cela, les deux résultats précédents sont exploités :

Exemple : Consommation électrique hebdomadaire en activité :

$$C_{Ea(hebdo)} = P_{ma} \times T_{a(hebdo)} \quad \text{Équation 22}$$

Avec :

- $C_{Ea(hebdo)}$ = Consommation électrique hebdomadaire (en kWh) des équipements en mode activité
- P_{ma} = Puissance moyenne (en kW) des équipements en mode activité
- $T_{a(hebdo)}$ = Temps moyen hebdomadaire (en heure) que les équipements ont passé en mode activité

Cette consommation sera par la suite convertie en consommation annuelle en multipliant la consommation hebdomadaire par le nombre de semaines comprises dans l'année d'étude.

Dans le cadre de l'étude, il n'a pas été possible de réaliser des mesures sur une période de temps supérieure à une semaine bien qu'il soit préférable d'obtenir des mesures sur une période de temps plus longue. En effet, la fiabilité des résultats augmente avec la durée de réalisation des mesures. Néanmoins, selon les résultats des études menées par Guy R. Newsham en 1992 et 1994 [Newsham et Tiller, 1992], [Newsham et Tiller, 1994], une période de mesures pendant une semaine permet d'obtenir des résultats avec une marge d'erreur de 20% par rapport aux consommations électriques mesurées sur un an.

2.3.2 Principe du traitement des données

Après avoir collecté les différentes données nécessaires, la phase de traitement des données doit être réalisée avec rigueur de manière à exploiter ces données de la meilleure manière qu'il soit.

Le terme « **traitement de données** » renvoie à un ensemble de processus qui permet l'extraction de l'information ou la production de savoir à partir de données brutes. Le traitement des données a pour objectif de transformer une donnée brute (quantitative ou qualitative) en information (quantitative ou qualitative).

L'intérêt du traitement de données est principalement d'élever le niveau ou la qualité de l'information. « *Ce traitement de l'information peut alors relever de la **fusion** de données, de l'**extraction** d'information ou de la **transformation** de la représentation* » [Bourque et Clark, 1999].

Dans le cas de notre étude, le traitement des données a consisté en une synthèse des informations recueillies lors de la phase précédente mais aussi en une transformation des données qualitatives en données quantitatives. Ainsi, les réponses aux questionnaires ont été analysées et mise en corrélation avec les résultats des mesures. Par conséquent, les données relatives à la puissance des équipements en veille, en mode éteint ou en mode activité ont été transcrites en valeur et ont été incorporées au tableau de synthèse des données.

De même, selon les cas, des hypothèses ont été établies pour la généralisation des résultats. Ces hypothèses permettent d'obtenir des informations sur un périmètre plus important. Elles devront avoir été validées par le service informatique de l'organisation étudiée afin d'assurer une meilleure cohérence et une bonne interprétation des conclusions sur le premier jeu de données.

2.4 Etape 4 : Tableau de Bord Environnemental (TBE)

Les indicateurs environnementaux sélectionnés *a priori* et dont on suit l'évolution au fil du temps seront présentés sous la forme d'un tableau de bord environnemental (TBE). Il s'agit d'indicateurs de **pression environnementale** comme les consommations d'électricité (kWh), de ressources naturelles (m³ d'eau, par exemple), de matières premières, de ressources fossiles ou de produits auxiliaires (kilogramme ou litre), quantité et toxicité de déchets et rejets générés ... [André et al., 1999].

Le tableau de bord peut se présenter sous forme d'un tableur Excel® dans lequel sont mentionnés les indicateurs utilisés et les unités dans lesquelles ils s'expriment. En outre, les résultats seront présentés sous forme graphique afin d'en donner un aperçu visuel.

2.4.1 Objectifs d'un TBE

Un tableau de bord est un outil de gestion, au croisement d'un système d'information et d'un système de décision [Saulou, 2006]. Il permet d'agrèger et de synthétiser différentes informations tout en reflétant les décisions prises et l'évolution de la situation résultant de ces décisions. Il peut servir à la fois à la réalisation d'un état des lieux d'une situation initiale et par la suite, s'il est tenu à jour régulièrement, permettre de suivre l'évolution de cette situation [Prats, 2011]. Par conséquent, les objectifs d'un tableau de bord de gestion environnementale peuvent être multiples : faciliter la compréhension d'enjeux environnementaux, comparer différents sites ou activités entre eux, suivre l'évolution dans le temps d'impacts environnementaux, etc.

Ainsi le TBE peut être constitué d'une part d'une série d'éléments, pouvant représenter différentes activités, différents sites ou différentes années et, d'autre part, de l'expression en termes d'impact environnemental de chacun des postes étudiés : les indicateurs, généralement quantitatifs.

2.4.2 Principes du TBE

L'étape relative à la constitution du tableau de bord environnemental doit être réalisée avec beaucoup de précaution afin que l'évaluation environnementale qui en résulte soit de bonne qualité. Pour atteindre cet objectif, trois principes ont été établis lors du déroulement de la méthodologie.

Un des principes concerne la complétude de l'évaluation environnementale réalisée. Comme il a été défini précédemment (Chapitre 1, Partie 3), les impacts des technologies de l'information sont multiples : ils interviennent à plusieurs échelles de temps et d'espace. Afin d'établir une cartographie des impacts environnementaux la plus complète possible, plusieurs indicateurs environnementaux devront être utilisés. De plus, les variations et proportions des impacts les uns par rapport aux autres peuvent varier selon l'étape du cycle de vie considérée. Il faudra donc veiller à ce que différentes étapes de ce cycle de vie soient prises en compte dans l'évaluation.

Ainsi, le premier principe peut être formulé de la manière suivante : **l'évaluation devra être multi-impacts et tenir compte de plusieurs phases du cycle de vie des produits.**

Il a été abordé précédemment que l'évaluation serait spécifique à l'organisation étudiée. Pour cela, des inventaires, des enquêtes et des mesures seront réalisées *in situ* afin d'obtenir des informations spécifiques au terrain d'étude. Ces données seront complétées par la suite par des données génériques issues de base de données telles qu'Ecoinvent. **L'évaluation ainsi réalisée tiendra compte des caractéristiques de l'organisation étudiée**, principe essentiel de cette méthodologie. Ainsi, deux types de données se distinguent :

- les données d'inventaires **spécifiques** au service étudié ;
- les facteurs de caractérisation d'impacts **génériques** obtenus dans Ecoinvent® par exemple.

Le principe suivant résulte de l'application du principe précédent et s'intéresse à la validité de l'évaluation réalisée dans le cadre de l'application de la méthodologie. En effet, l'évaluation étant basée sur les caractéristiques propres à l'organisation, l'application a lieu dans les conditions spécifiques au moment de l'étude : consignes d'utilisation existantes ou non, équipements présents, comportement des utilisateurs,... Par conséquent, **l'évaluation environnementale réalisée est valable à un instant donné (paramètres liés à l'utilisateur, aux équipements présents, aux conditions – ou l'absence – de consignes d'utilisation, ...)**. Les paramètres du tableau de bord devront faire l'objet d'un suivi attentif pour permettre une évolution en temps réel de l'évaluation réalisée.

2.4.3 Indicateurs utilisés

L'ordination d'un panel d'indicateurs permet de centraliser l'information de l'activité étudiée et ainsi donner les éléments de choix dans le but d'une aide à la décision. Comme les indicateurs fournissent une vision simplifiée de la réalité permettant une représentation de phénomènes complexes [Tyteca, 2002], leur sélection est une étape clef dans la réalisation du tableau de bord.

Classiquement, les méthodes d'évaluation environnementale (ACV, Bilan Carbone®, ...) se basent sur différents indicateurs pour réaliser l'évaluation. Ces derniers pouvant varier selon les objectifs de chaque outil, leur application doit prendre en compte les spécificités de l'étude considérée (objectifs, contraintes et limites). L'application des méthodes d'évaluation existantes nécessite une adaptation qui se retranscrit généralement par la conservation des caractéristiques propres à (aux) l'outil(s) choisi(s) et par la création d'un nouveau panel d'indicateurs permettant de répondre aux particularités de l'étude.

La méthodologie proposée a pour objectif principal de répondre au croisement des différentes approches (approche site et produit ; approche générique et spécifique au périmètre étudié) en sélectionnant certains indicateurs présents dans les divers outils identifiés. Dans notre étude, nous avons classé les indicateurs en deux grandes catégories : les indicateurs opérationnels de suivi (ou de fonctionnement de l'organisation étudiée) et les indicateurs environnementaux.

- **Les indicateurs de suivi :**

Les indicateurs de suivi sont des outils destinés à mesurer l'avancement d'un projet ou d'un programme et d'évaluer la qualité en termes de résultats pouvant être attribués à la mise en œuvre du projet ou programme. Ils assurent une évaluation quantitative, se concentrant ainsi sur l'efficacité de l'exécution du projet, sans nécessairement fournir des informations sur la qualité des activités. [Union Européenne, 2011].

- **Les consommations électriques :**

Les mesures des consommations électriques des technologies de l'information mais aussi de l'ensemble de l'organisation sont réalisées. Le rapport entre ces deux consommations (consommation électrique de l'informatique divisée par la consommation électrique totale) permet de connaître la part que représente l'informatique dans la consommation électrique totale. Ces indicateurs sont détaillés dans le Tableau 21.

Les consommations pour chaque catégorie d'équipements se calculent via les données de puissances avec les données des rythmes d'utilisation (durée d'utilisation de chaque catégorie d'équipement selon les différents modes). Les résultats de consommation concernent l'estimation de la consommation moyenne de chaque catégorie d'équipement :

- en mode activité ;
- en mode veille ;
- en mode veille prolongée (ce mode n'est pas présent chez tous les équipements) ;
- en mode arrêt.

Enfin, ces consommations pourront alors renseigner différents **ratios**, intéressants à suivre dans un outil de management :

- % de la consommation de chaque catégorie d'équipements par rapport à la consommation informatique totale ;
- % de la consommation de chaque catégorie d'équipements par rapport à la consommation totale (Pour obtenir ce ratio, la consommation électrique totale, toutes activités confondues, devra impérativement être obtenue).

Le détail des calculs permettant l'obtention de ces données sera explicité dans le paragraphe 2.3 (Etape 3 : Traitement des données).

- **Les consommables :**

L'utilisation de consommables est inéluctable pour toute activité. Faire un suivi de ces consommations permettra de représenter les impacts environnementaux qui leurs sont liés. Il sera alors possible de calculer l'évolution de l'impact de ces consommables en fonction de différents critères.

Les consommables peuvent être classés en deux catégories : d'une part les consommables papiers liés à l'impression des documents électroniques (correspondant à des déchets non dangereux), et d'autre part, l'ensemble des consommables liés à l'utilisation des équipements informatiques (classés en déchets dangereux) soit : les cartouches d'encre, les piles, les chargeurs, ...

L'évolution de ces impacts en fonction des quantités permettra de mettre en avant, à long terme, les gains possibles suite à une action visant à réduire les consommations ou un changement de consommables (utilisation de papier recyclé, par exemple).

Tableau 21: Liste des indicateurs de fonctionnement retenus

Nom de l'indicateur	Définition	Unité
Consommation électrique totale	Cette consommation correspond au total annuel des consommations électriques de l'organisation étudiée (tout postes confondus). Cette consommation électrique totale peut être donnée au niveau général d'une organisation mais aussi, pour plus d'information, au niveau de chaque établissement. Dans ce cas, l'information sera présente au niveau du TBE de l'établissement avant d'être agrégée dans le TBE de synthèse de l'organisation.	kWh
Consommation électrique de l'informatique	Consommation électrique utilisée par les équipements informatiques. Cette consommation peut être obtenue par les services généraux de l'organisation si des compteurs séparés sont présents sur le site. En l'absence de ces compteurs, les estimations sont à établir sur la base des données obtenues sur les puissances informatiques (en activité, en veille et à l'arrêt), les estimations de durées d'activité, de veille et d'arrêt ainsi que les mesures <i>in-situ</i> . Cette valeur sert de référence pour le calcul des gains liés aux évolutions du parc informatique (Evaluation des gains).	kWh
Consommation électrique par m²	Cet indicateur permet de ramener la consommation électrique d'une organisation à la surface. Cet indicateur peut permettre de comparer plusieurs établissements d'une même organisation.	kWh/m ²
Consommation électrique informatique / Consommation totale (%)	Ce ratio permet de représenter la part que constituent les consommations électriques dédiées à l'informatique par rapport à la consommation électrique totale. Ce ratio sera voisin de 100% lorsque les consommations électriques de l'informatique représentent la quasi-totalité des consommations électriques d'une organisation. En revanche, il tendra vers 0 lorsque l'informatique ne représentera qu'une faible part dans les consommations électriques.	-
Puissance informatique totale	La puissance informatique totale correspond à la somme des puissances maximales totales mesurées pour les équipements informatiques considérés dans le périmètre de l'étude. Cette puissance permet de donner une indication concernant la puissance supportée par le réseau.	kW
Puissance informatique par m²	Cet indicateur permet de ramener la puissance informatique d'une organisation à la surface. Cet indicateur peut permettre de comparer plusieurs établissements d'une même organisation.	kW/m ²

Note : nous avons initialement envisagé ramener la puissance informatique à la valeur ajoutée générée par l'établissement mais il s'est avéré que cet indicateur n'était pas pertinent car la valeur ajoutée de chaque établissement est une valeur difficilement accessible :

- soit il s'agit d'une donnée considérée comme confidentielle ;
- soit la donnée n'existe pas (établissement support ne générant pas directement de valeur ajoutée ou établissement public).

- Les **déchets** :

Deux paramètres importants sont à considérer lorsque les déchets des équipements informatiques sont étudiés. D'une part l'usage de matériel informatique implique nécessairement un renouvellement de ce matériel et donc une gestion du matériel remplacé. D'autre part, des déchets liés à l'usage du matériel doivent être pris en considération.

Les déchets de renouvellement sont généralement des DEEE composés de matériels informatiques : composants, unités centrales, écrans, imprimantes, ...

Les déchets d'usage peuvent être des consommables tels que les cartouches d'encre, les piles, les accumulateurs, le papier, les cartons. Selon l'article 541-8 du code de l'environnement, ces déchets se classent en deux catégories [Code de l'environnement, 2010] : d'une part les déchets industriels dangereux et d'autre part les déchets non dangereux.

Le Tableau 22 classe les déchets par catégorie.

Tableau 22 : Catégories de déchets présentes dans notre étude

	Déchets industriels dangereux	Déchets non dangereux
Déchets de renouvellement <i>Exemples :</i>	DEEE <i>unité centrale, ordinateurs portables, écrans, imprimantes</i>	
Déchets d'usage <i>Exemples :</i>	DEEE <i>piles et accumulateurs et des cartouches d'impression</i>	papiers et cartons

• **Les indicateurs environnementaux**

Les indicateurs environnementaux retenus dans l'étude sont des indicateurs agrégés. Ils sont couramment utilisés dans les méthodes d'évaluation environnementale telles que l'ACV. Ils sont calculés à partir d'hypothèses et de conventions disponibles dans des bases de données telles qu'Ecoinvent [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010].

Les différents indicateurs environnementaux agrégés que nous avons choisis sont ceux présentés au paragraphe 2.3.2 du Chapitre 1 :

- Emissions de gaz à effet de serre
- Epuisement de l'ozone stratosphérique
- Epuisement des ressources
- Acidification
- Ecotoxicité :
 - o écotoxicité d'eau douce
 - o écotoxicité d'eau marine
 - o écotoxicité des sédiments d'eau douce
 - o écotoxicité des sédiments d'eau marine

- écotoxicité terrestre
- Toxicité humaine
- Radiation ionisante

Les impacts environnementaux liés à l'amortissement de l'ensemble du matériel présent sur un ou plusieurs sites donnés (impacts environnementaux liés à la fabrication du matériel, qui se répercutent tout au long de sa durée de vie) se calculent par l'Équation 23 :

$$I_{Aa} = \frac{(n_{E1} * FC_{E1Ia})}{T_{E1}} + \frac{(n_{E2} * FC_{E2Ia})}{T_{E2}} + \dots + \frac{(n_{En} * FC_{EnIa})}{T_{En}} \quad \text{Équation 23}$$

Avec :

- I_{Aa} = Impact de l'amortissement pour l'impact a
- n_{E1} = Nombre d'équipement de catégorie 1
- FC_{E1Ia} = Facteur de caractérisation de l'équipement 1 pour l'impact environnemental a
- T_{E1} = Durée de vie de l'équipement 1

Ces indicateurs étant exprimés dans des unités différentes (par exemple en kg CO₂ éq. ou en kg 1,4-DCB éq.), il ne peut être calculé un indicateur global pour tous les impacts qu'en utilisant une méthode avec normalisation et agrégation des différents indicateurs. En revanche, les impacts liés à l'amortissement de plusieurs catégories d'équipements peuvent être sommés pour le même impact (quelle que soit la méthode utilisée).

De manière similaire, nous pouvons modéliser les impacts environnementaux liés à l'utilisation du matériel (impacts liés à la consommation d'électricité durant le fonctionnement des équipements en grande majorité) par l'Équation 24 :

$$I_{Ua} = [C_{E1} + C_{E2} + \dots + C_{En}] \times FC_{UIa} \quad \text{Équation 24}$$

Avec :

- I_{Ua} = Impact de l'utilisation des équipements pour l'impact a
- C_{E1} = Consommation électrique annuelle (en kWh) des équipements de catégorie 1
- C_{E2} = Consommation électrique annuelle (en kWh) des équipements de catégorie 2
- FC_{UIa} = Facteur de caractérisation du kWh d'électricité du mix utilisé par rapport à l'impact environnemental a

Comme précédemment, la même équation peut être appliquée pour l'ensemble des indicateurs environnementaux agrégés (a, b, c, ...) que l'on cherche à calculer.

Ainsi le calcul de l'impact environnemental lié à l'amortissement et à l'utilisation des équipements correspond à la somme des deux indicateurs précédents (Équation 25).

$$I_a = I_{Aa} + I_{Ua}$$

Équation 25

Avec :

- I_a = Impact environnemental a
- I_{Aa} = Impact de l'amortissement pour l'impact a
- I_{Ua} = Impact de l'utilisation des équipements pour l'impact a

2.4.4 Développement informatique du Tableau de Bord Environnemental

Le TBE se présente sous la forme d'un classeur Excel®. Ce classeur comporte plusieurs feuilles, chacune ayant des objectifs bien identifiés. L'organisation étudiée pouvant être constituée de plusieurs établissements, le nombre de feuilles composant le TBE peut varier. De manière générale, il se constituera des feuilles suivantes :

- une feuille (onglet «établissement»), nommée avec le nom ou le numéro attribué à l'établissement de l'organisation étudiée ; *dans notre exemple : [Etb_1]*) présente l'inventaire du matériel informatique de l'établissement et les valeurs récupérées lors des campagnes de terrain.

Les données peuvent être extrapolées à partir de l'analyse réalisée sur une partie de l'établissement étudié et des données d'inventaire des équipements informatiques, présents sur l'ensemble de l'établissement étudié.

- une feuille (onglet «TBE Etablissement» *exemple : [TBE_Etb_1]*) constitue un tableau de bord de l'établissement en question ;
- une feuille de graphiques (onglet «Graph TBE établissement» *exemple : [Graph_TBE_Etb_1]*) représente de manière visuelle les résultats obtenus dans le tableau de bord de l'établissement (onglet précédent).

Ces trois premiers onglets dépendent du nombre d'établissements qui composent l'organisation étudiée ou encore de l'organisation de l'étude. En effet, une organisation peut tout aussi bien décider de ne pas dissocier ces différents établissements et réaliser une évaluation globale. Cette dernière solution ne permettra pas de visualiser des différences ou des similitudes entre les établissements et entre les différents types d'établissements, engendrant une perte d'informations. Le choix de l'organisation de l'étude doit être décidé en amont avec les responsables en expliquant les conséquences de ce choix sur l'évaluation et sur les conclusions qui pourront être faites.

Les deux derniers onglets composant le fichier Excel® du TBE sont présents indépendamment du nombre d'établissements étudiés.

- l'onglet « Synthèse » constitue le tableau de bord environnemental général et synthétise l'ensemble des résultats pour l'ensemble des établissements de l'organisation ;
- enfin, l'onglet « Hypothèses » centralise l'ensemble des hypothèses qui ont été posées pour l'étude. Il permet aux futurs utilisateurs de cet outil Excel® de modifier les paramètres plus facilement.

Afin de faciliter la navigation entre ces différents onglets, des couleurs ont été attribuées à chaque feuille Excel®. Ainsi, les hypothèses sont en orange ; la synthèse en rouge ; les TBE de chaque établissement en vert ; les graphiques sont sur la feuille de couleur violette et enfin la description du site se trouve sur un onglet classique de Excel, sans couleur particulière. La Figure 26 illustre cette organisation par onglet et par couleur.

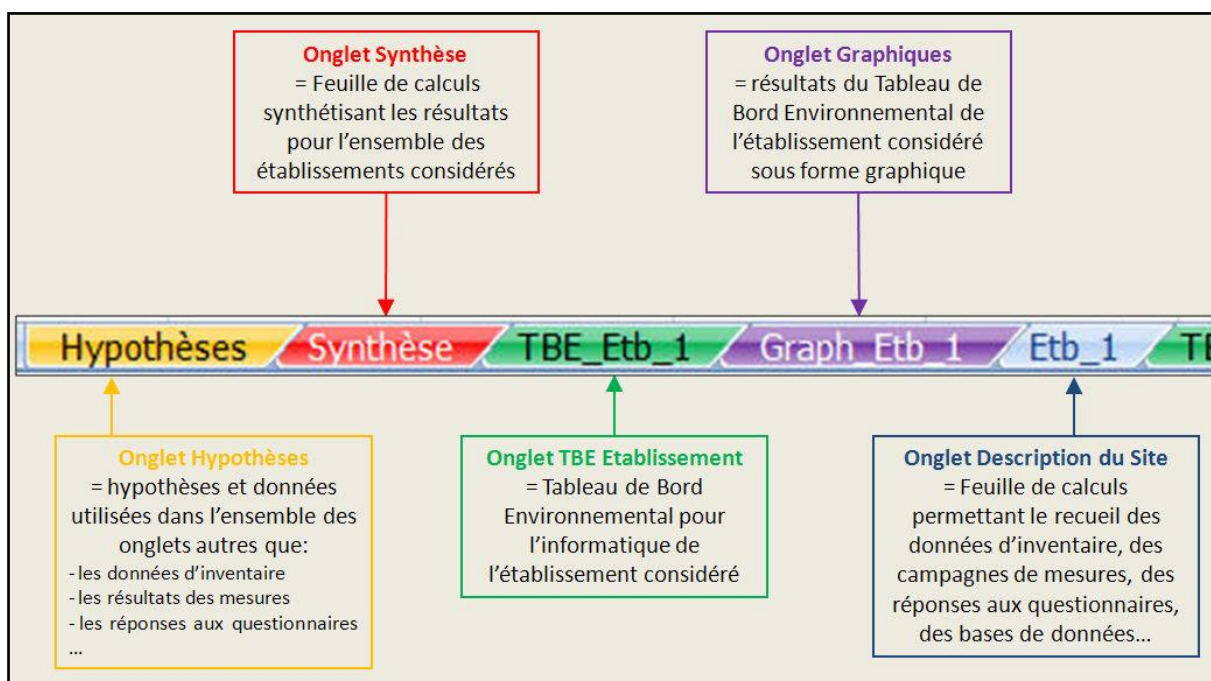


Figure 26: Illustration des onglets constituant le fichier Excel du TBE

Si l'organisation étudiée comporte un seul établissement alors l'onglet synthèse reprend les résultats présents dans l'onglet TBE (de couleur verte). En revanche, si l'organisation est composée de plusieurs établissements, il peut s'avérer intéressant d'avoir les résultats pour chaque établissement ([TBE_Etb_n] en vert) ainsi que les résultats pour l'organisation dans sa globalité, visibles dans l'onglet synthèse (en rouge).

Des captures d'écran de chacun de ces onglets sont disponibles en Annexes (cf Annexe 5).

2.5 Etape 5 : Evaluation des gains : Eco-efficiency

2.5.1 Objectifs

Comme pour tout domaine d'activité de l'entreprise, le service IT est soumis à des pratiques qui relèvent de la politique environnementale générale de l'entreprise même si certaines d'entre elles peuvent avoir une résonance particulière au niveau de l'IT, par exemple le déplacement du personnel (problème du télétravail), la réduction des consommables (en particulier le papier), le recyclage des emballages, etc. Néanmoins notre champ d'étude ne se focalise que sur les pratiques environnementales spécifiques à ce domaine d'activité (les technologies de l'information).

La mise en place d'un plan d'actions lié aux bonnes pratiques est une opération complexe dans la mesure où elle dépend de plusieurs facteurs qui ne sont pas forcément indépendants :

- les contraintes de séquence et de dépendance des bonnes pratiques.
- le niveau de maturité de l'existant : taux de virtualisation, taux de rationalisation des applications, niveau de performance du matériel, etc. Ce niveau de maturité pourra être intégré dans le périmètre potentiel d'application de l'action et dans le gain potentiel de chaque action, évidemment plus le niveau de maturité initial sera élevé plus le périmètre d'application et le gain potentiel seront réduits.
- les perspectives d'évolution en puissance de calcul et des capacités de stockage qui pourront conditionner entre autres les arbitrages entre les nouveaux investissements et la réutilisation des matériels dégagés par les diverses améliorations ainsi que la stratégie de réimplantation des matériels au sein du data-centre. Ces perspectives d'évolution ont tendance à l'augmentation quasi-exponentielle des besoins en puissance de calculs et stockage, besoins souvent dictés par d'autres services que le service informatique et qui s'opposent aux tentatives de maîtrise des impacts liés à l'informatique.

La notion de « gains » est relativement complexe et peut porter à confusion. Pour éviter tout malentendu, nous précisons qu'un gain correspond à une amélioration significative d'une situation par rapport à une situation antérieure. Ce gain peut-être double :

- fondamental dans le contexte de l'évaluation environnementale : le gain doit correspondre à une **diminution significative des impacts sur l'environnement** ;
- essentiel pour que les solutions proposées soient mises en application : le gain doit engendrer une **diminution des coûts pour l'organisation qui met en place ces solutions**.

Au-delà d'établir un état des lieux de la situation de l'organisation, l'évaluation doit permettre l'identification de solutions d'amélioration afin de tendre vers l'optimisation.

2.5.2 Possibilité d'amélioration

Les possibilités d'amélioration proposées se font sur la base de benchmarks et l'analyse d'études de situations comparables. Ainsi, plusieurs actions d'amélioration prioritaires peuvent être proposées pour diminuer l'impact environnemental de l'informatique de l'organisation.

Des bonnes pratiques dans le domaine de l'informatique ont été référencées par l'Union Européenne dans le document « *Code of Conduct* » [Commission Européenne, 2008]. Ce dernier établit une typologie des bonnes pratiques et est structuré en six parties, mentionnées ci-dessous :

1. Principes généraux de la démarche.
2. Gouvernance globale de l'établissement : équipe et processus de gestion du changement, définition des niveaux de redondance, optimisation des implantations.
3. Matériels et logiciels : spécification *ad hoc* et choix des nouveaux matériels et logiciels, mise en place d'une gestion des applications et des données. Il existe un lien évident entre les bonnes pratiques de cette catégorie et la mise en place d'une gestion efficace des services telle qu'elle peut être développée par exemple par une démarche ITIL (Information Technology Infrastructure Library).
4. Refroidissement : gestion des flux d'air, contrôle des températures et des taux d'humidité, gestion et pilotage des équipements de production de froid.
5. Equipements électriques en particulier les alimentations sans interruption (Uninterruptible Power Supply – UPS).
6. Mise en place des mesures et contrôles de consommation.

A toutes ces démarches relativement spécifiques à des installations de types « centre de données », s'ajoutent des bonnes pratiques de comportement des utilisateurs : paramétrage de la mise en veille, extinction des équipements non utilisés, choix des paramètres de luminosité et/ou de contraste pour les écrans, choix des modes d'impression (préférer une impression noir & blanc et recto-verso plutôt que du couleur), choix d'un mix énergétique à base d'énergies renouvelables, etc.

Il s'agira alors à ce niveau d'identifier les bonnes habitudes ou mauvaises pratiques de chacun afin d'optimiser le système.

2.5.3 Méthodes de calculs et hypothèses

Pour estimer les gains potentiellement réalisables après l'application d'une ou plusieurs bonnes pratiques, différents calculs peuvent être réalisés. Le calcul du gain relatif à l'application d'une action identifiée se réalise en plusieurs étapes. Les possibilités d'améliorations identifiées seront évaluées à la fois en termes environnementaux (unité selon l'indicateur environnemental) et économiques (retour sur investissement).

En **termes environnementaux**, le gain estimé par l'application d'une solution proposée se traduit par le calcul de la différence des impacts liés aux deux situations.

Par exemple, l'application d'une solution 1 génère potentiellement le gain (G_E) suivant (Équation 26) :

$$G_{Ea} = \sum_{i=1}^d I_{a(situation\ initiale)} - \sum_{i=1}^d I_{a(situation\ 1)} \quad \text{Équation 26}$$

Avec :

- G_{Ea} = Gain environnemental potentiel pour l'impact environnemental a
- d = durée sur laquelle les calculs sont réalisés (en années)
- $I_{a(situation\ initiale)}$ = Impact environnemental a de la situation initiale
- $I_{a(situation\ 1)}$ = Impact environnemental a lors de l'application de la situation 1

Si $G_E > 0$ alors la situation 1 a un impact environnemental moindre que la situation initiale. Il s'agit donc bien d'un gain si la solution 1 est mise en application.

En revanche, si $G_E < 0$ alors la situation 1 a un impact environnemental plus important que la situation initiale. La solution proposée n'est donc pas une solution d'optimisation du système et ne peut pas être retenue dans le cadre d'une optimisation du système.

Le calcul d'un gain environnemental se réalise pour chaque impact environnemental. Il est alors possible de réaliser le calcul pour comparer la situation initiale avec une solution proposée (ou deux solutions entre elles) pour les différents impacts environnementaux identifiés. Les calculs peuvent donner des résultats différents selon l'impact environnemental considéré. Le décideur devra alors choisir la solution qui lui paraît la plus pertinente en fonction de ses priorités vis-à-vis des divers impacts environnementaux.

En **termes économiques**, les possibilités d'amélioration de la situation seront évaluées en fonction du coût financier de leur mise en application et de leur fonctionnement en comparaison avec le coût financier de la situation actuelle (ou évolution de la situation actuelle dans une logique de continuité) (Équation 27).

$$Coût (\text{€}) = Coût_{(situation\ initiale)} - Coût_{(situation\ 1)} \quad \text{Équation 27}$$

Avec :

- $Coût (\text{€})$ = le coût financier potentiel de l'application de la solution 1
- $Coût_{(situation\ initiale)}$ = coût financier de fonctionnement de la situation initiale
- $Coût_{(situation\ 1)}$ = coût financier de fonctionnement de la situation 1

Avec la même logique que pour l'équation 26, si $coût (\text{€}) > 0$ alors la situation 1 a un coût financier moindre que la situation initiale. Il s'agit donc bien d'un gain si la solution 1 est mise en application.

En revanche, si $coût (\text{€}) < 0$ alors la situation 1 a un coût financier plus important que la situation initiale.

De plus, afin de pouvoir sélectionner une solution, le décideur se base généralement sur un autre indicateur qui lui permet de connaître le temps de rentabilisation d'une solution. Cet indicateur correspond au calcul de durée de retour sur investissement (D_{ROI}) (*ROI : Return on Investment*). Ce calcul est explicité dans l'Équation 28.

$$D_{ROI} = \frac{\text{Coût d'investissement (€)}}{\text{Gain (€)}} \quad \text{Équation 28}$$

Avec :

- D_{ROI} = Durée de retour sur investissement
- *Coût d'investissement (€)* = Coût financier lié à la mise en place de la solution (exprimé en euros)
- *Gain (€)* = économie financière réalisée avec la mise en place de la solution par rapport à la situation existante (exprimé en euros)

Ainsi, à ce niveau de l'étude, les possibilités d'amélioration pourront être données en fonction :

- de la diminution potentielle de l'impact environnemental (en unité de référence pour l'action unitaire) ;
- d'un indicateur de retour sur investissement qui est un calcul classique de ROI (*Return On Investment*) sur la durée d'amortissement des équipements.
- d'une efficacité environnementale représentant le ratio entre la diminution de l'impact et le coût de l'action unitaire en K€ (voir paragraphe 2.5.4 Echelle d'éco-efficacité) (Équation 29).

$$EcoEff = \frac{\Sigma G_E}{\Sigma Coût (€)} \quad \text{Équation 29}$$

Avec :

- $EcoEff$ = Eco Efficacité
- ΣG_E = Somme des gains environnementaux
- $\Sigma Coût (€)$ = Somme des coûts financiers (exprimés en euros)

De plus, des hypothèses doivent être établies au préalable. Ces hypothèses concernent les évolutions de la situation, qu'il s'agisse de l'actualisation, de l'évolution du coût de l'électricité ou de la durée d'amortissement des équipements. Des hypothèses spécifiques à chaque solution seront détaillées dans le chapitre 3 relatif à l'application de la méthodologie. Mais des hypothèses communes aux différentes possibilités d'amélioration peuvent d'ores et déjà être citées. Il s'agit :

- des facteurs de conversion du KWh en Europe
- des facteurs de conversion permettant d'établir les impacts environnementaux liés à la fabrication des différents équipements
- de la durée d'amortissement des équipements

- du taux d'augmentation annuel du coût du KWh d'électricité : (5 % par an) [Commission de Régulation de l'Energie, 2012]
- de l'absence de prise en compte du taux d'actualisation [Chabot, 2005]. Ce taux correspond à l'évolution des coûts d'investissement dans le temps du fait des avancées technologiques et techniques. Dans le domaine de l'informatique, les évolutions sont rapides aussi bien en termes de coûts qu'en terme de produits. Par conséquent, nous avons choisi de réaliser l'évaluation environnementale avec les données disponibles en un instant t et donc de ne pas considérer ce taux d'actualisation pour la suite de nos calculs.

2.5.4 Echelle d'éco-efficience

La recherche de l'éco-efficacité dans le domaine de l'industrie était initialement centrée sur la réduction des déchets et de la pollution. Elle a évolué vers une utilisation moindre de l'énergie et par extension vers la diminution de l'emploi des ressources primaires [European Environment Agency, 2003]. Afin de rendre ce concept plus fonctionnel, l'expression « Eco-efficience » (traduction littérale de l'anglais « eco-efficiency ») a été proposée par le conseil mondial des entreprises pour le développement durable (WBSCD) lors du Sommet de la Terre de Rio en 1992. Il s'agit alors d'ajouter la notion de développement durable telle que définie dans le rapport Bruntland [Bruntland et al., 1988] à la notion d'efficacité d'un produit ou d'un service.

Ainsi, l'éco-efficience représente l'offre de biens ou de services répondant aux besoins de l'homme et lui apportant une qualité de vie, en atténuant progressivement les impacts sur l'environnement (notamment au sujet de l'utilisation des ressources naturelles) afin d'atteindre un niveau environnemental cohérent avec les capacités de la Terre [Dormann et Holliday, 2002]. Progressivement la politique de management de nombreuses organisations (entreprises, collectivités, ...) a intégré ce concept d'éco-efficience [Johnstone, 2007] [OCDE, 2007] qui a souvent été résumé en une « stratégie de gestion qui consiste à faire plus avec moins ». Pour cela trois objectifs doivent être atteints [Madden et al., 2005] :

1. Augmenter la valeur du produit ou du service fourni;
2. Optimiser l'utilisation des ressources;
3. Diminuer les impacts sur l'environnement.

Le concept d'éco-efficience peut s'appliquer à tous les niveaux (échelle géographique, monde politique, secteur industriel, ...). À l'échelle globale, l'éco-efficience permet la gestion de la productivité. Néanmoins, il semblerait que l'augmentation générale de la consommation compense les efforts d'éco-efficience et donc les gains réalisés dans les pays industrialisés durant les dix dernières années [Dufresne et Laberge, 2006].

La recherche d'éco-efficience doit se baser sur des indicateurs : pertinents et compréhensibles ; utiles dans l'aide à la décision ; permettant un benchmark et un suivi mais aussi reposant sur des données de bonne qualité.

Les possibilités d'amélioration identifiées dans la partie précédente seront évaluées à l'aide d'un indicateur d'éco-efficience. Cet indicateur permet d'aider les décideurs en comparant les solutions les unes aux autres et par rapport à un axe environnemental et un axe financier.

Pour cela, plusieurs représentations étaient envisageables. Il a été retenu de présenter le gain environnemental en fonction du coût (financier) pour chaque solution proposée. Cette représentation a pour objectif de classer les actions proposées en quatre groupes (Figure 27).

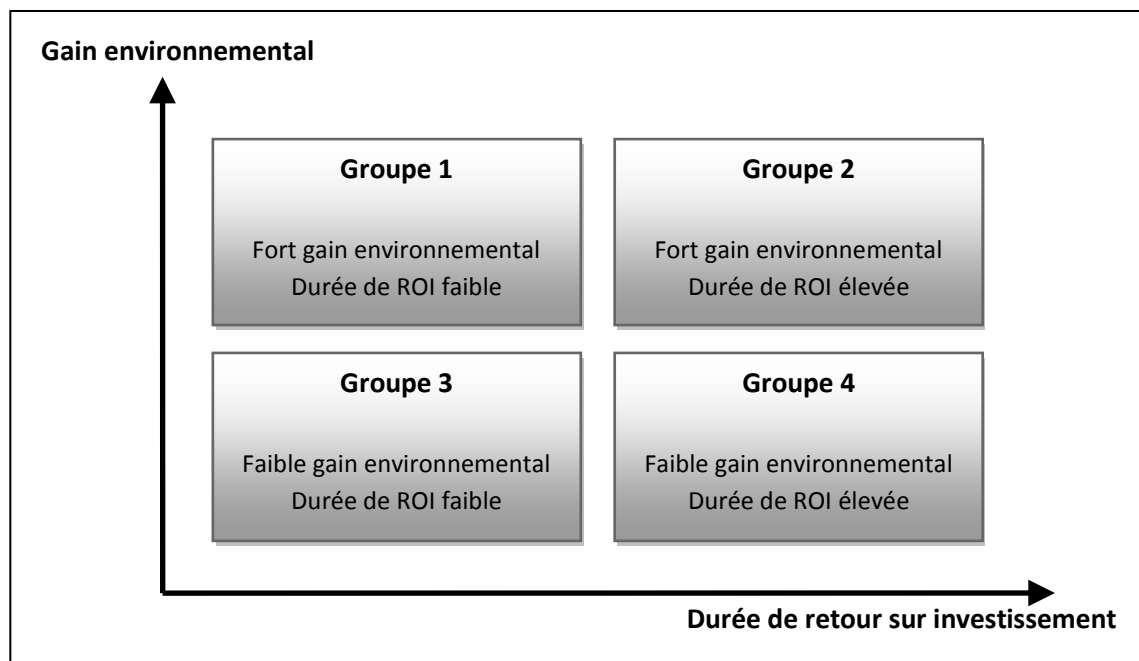


Figure 27: Illustration de l'Eco-efficience (inspiré de [Cha et al., 2008] et [ENSM-SE, 2010])

- Groupe 1 : Les actions permettant un important gain environnemental et avec une durée de retour sur investissement faible ;
- Groupe 2 : Les actions permettant un important gain environnemental mais avec une durée de retour sur investissement élevée ;
- Groupe 3 : Les actions avec un faible gain environnemental et une durée de retour sur investissement faible ;
- Groupe 4 : Les actions avec un gain environnemental et une durée de retour sur investissement élevée.

Les actions du groupe 1 seront celles avec une meilleure éco-efficience et seront par conséquent généralement choisies en priorité. A l'inverse, les solutions proposées situées dans le groupe 4 ne permettront pas un gain environnemental important et leur application devra être limitée au cas où aucune action des groupes précédents ne peut être appliquée (pour des raisons diverses).

2.5.5 Principes de l'évaluation des gains

L'évaluation des gains constitue la dernière étape de la méthodologie, elle s'appuie sur des scénarii utilisant les résultats fournis par le tableau de bord environnemental. Ce dernier, par l'identification des points forts (bonnes pratiques mises en place, faibles impacts environnementaux, etc.) et des points sensibles (comportements peu responsables, nombreux équipements allumés inutilement, etc.) de la situation permet de connaître les aspects sur lesquels il est important voir urgent d'agir. Le principe clef d'une telle étape de recherche de solutions réside dans **la connaissance des bonnes pratiques du secteur concerné**. En effet, il existe dans de nombreux secteurs des guides indiquant les bonnes pratiques à appliquer. Ceci est particulièrement vrai dans le secteur des technologies de l'information avec des référentiels comme le Code of Conduct [Commission Européenne, 2008] ou la certification ITIL [Carlier, 2005].

Sur la base de ces bonnes pratiques, des scénarii peuvent être proposés afin de prendre en considération l'applicabilité des bonnes pratiques identifiées ainsi que les champs d'application de ces scénarii au sein de l'organisation étudiée. Les scénarii ainsi établis seront simulés sur l'organisation étudiée pour réaliser l'évaluation des gains. Dans un premier temps, le gain unitaire de chaque action sera calculé puis dans un second temps, l'extension de cette action à l'ensemble du périmètre permettra d'effectuer l'évaluation sur l'ensemble de l'organisation. Au final, **l'évaluation des gains correspondra à la comparaison de différents scénarii** (lors de leur application à l'ensemble du périmètre).

Enfin, parmi les bonnes pratiques identifiées, les solutions techniques occuperont une grande place. Néanmoins, le comportement des utilisateurs finaux ne doit pas être négligé. Dans cette optique, **la comparaison de plusieurs profils d'utilisateurs peut s'avérer importante pour cette étape d'évaluation des gains**.

En outre, il peut s'avérer nécessaire de s'interroger sur les besoins en informatique afin d'apporter une réelle réduction des impacts « à la source ».

Partie 3 Synthèse et conclusion

Les différentes étapes de la méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux proposée sont relativement classiques des méthodes d'évaluation environnementale. L'objet d'étude est la fabrication et l'utilisation des équipements informatiques en croisant l'approche site et l'approche produit. L'objectif est d'évaluer les émissions liées à la phase de production et celles liées à la phase d'utilisation (Figure 22 p95).

Ce travail méthodologique a nécessité, dans un premier temps, une réflexion sur les objectifs et les limites d'une telle évaluation mais aussi la recherche d'une démarche structurée. Dans une volonté d'obtenir une méthodologie spécifique à une entité donnée, le recueil des données fait intervenir à la fois des données d'inventaires, des comportements d'utilisateurs et des mesures de terrain. Ces données, par l'intermédiaire d'hypothèses et de divers calculs intègrent le tableau de bord environnemental, véritable point central de cette méthodologie d'évaluation. Enfin, sur la base de ce TBE, des points forts et des points sensibles peuvent être identifiés. Ces derniers seront analysés afin de trouver des bonnes pratiques permettant de les faire évoluer positivement pour l'entreprise. Il s'agira alors de constituer des scénarii d'optimisation sur la base de ces bonnes pratiques et d'estimer les gains relatifs à leur applicabilité dans le système étudié via un indicateur d'éco-efficience.

La méthodologie proposée est ainsi structurée en cinq étapes dont la Figure 28 illustre le déroulement et les liens :

1. Etape 1 : L'identification du système et des enjeux

Les enjeux regroupent de réelles préoccupations qui se divisent en deux catégories : des enjeux internes à l'entreprise et des enjeux plus globaux vis-à-vis de l'environnement ou de cette même entreprise vis-à-vis de sa communication externe.

- Exemples d'enjeux internes à l'entreprise :
 - Préoccupation vis-à-vis de la réglementation
 - Volonté d'exprimer l'impact environnemental selon un référentiel défini pour les technologies de l'information
 - Démarche de communication
 - Preuve d'un engagement concernant l'environnement
 - Souhait de maîtrise des consommations électriques liées à l'informatique
- Exemples d'enjeux plus globaux :
 - Secteur informatique en pleine expansion
 - Connaissance de ses impacts planétaires et des aspects environnementaux directs et indirects

2. Etape 2 : La collecte des données

Les résultats d'une étude d'évaluation environnementale dépendent des données utilisées pour réaliser l'évaluation. Ainsi, la phase de collecte des données est particulièrement importante. Elle

doit être réalisée avec rigueur et précision. Dans le cadre de notre méthodologie, nous l'avons décomposée en quatre phases : une phase d'**échantillonnage**, une phase d'**inventaires**, une phase d'**enquêtes** et une phase de **mesures**. Ces étapes, dont certaines peuvent être réalisées en parallèle, nécessitent une itération afin de valider et de compléter l'ensemble des données à tout moment.

3. Etape 3 : L'analyse et le traitement des données

Etape indispensable, le traitement des données permet de transformer des données brutes d'inventaires, de mesures ou d'enquêtes en informations exploitables. Ces données permettent alors d'obtenir les premiers résultats comme des volumes de déchets, des durées d'utilisation ou encore des puissances électriques.

4. Etape 4 : Le remplissage du tableau de bord environnemental

Le tableau de bord environnemental permet d'obtenir des résultats sous forme d'indicateurs environnementaux. Pour cela, les résultats obtenus précédemment sont utilisés ainsi que des facteurs d'impacts issus, entre autres, de diverses bases de données.

5. Etape 5 : L'évaluation des gains

L'ultime étape de cette méthodologie concerne l'évaluation des gains potentiellement réalisables suite à l'application de différentes solutions d'amélioration proposées. Pour réaliser cette dernière étape, la situation initiale est comparée à la situation résultant de l'application de diverses solutions. Cette étape permet ainsi d'évaluer les économies environnementales et financières potentiellement réalisables et ainsi sélectionner les solutions d'amélioration les plus avantageuses en fonction des priorités que l'organisation se fixe.

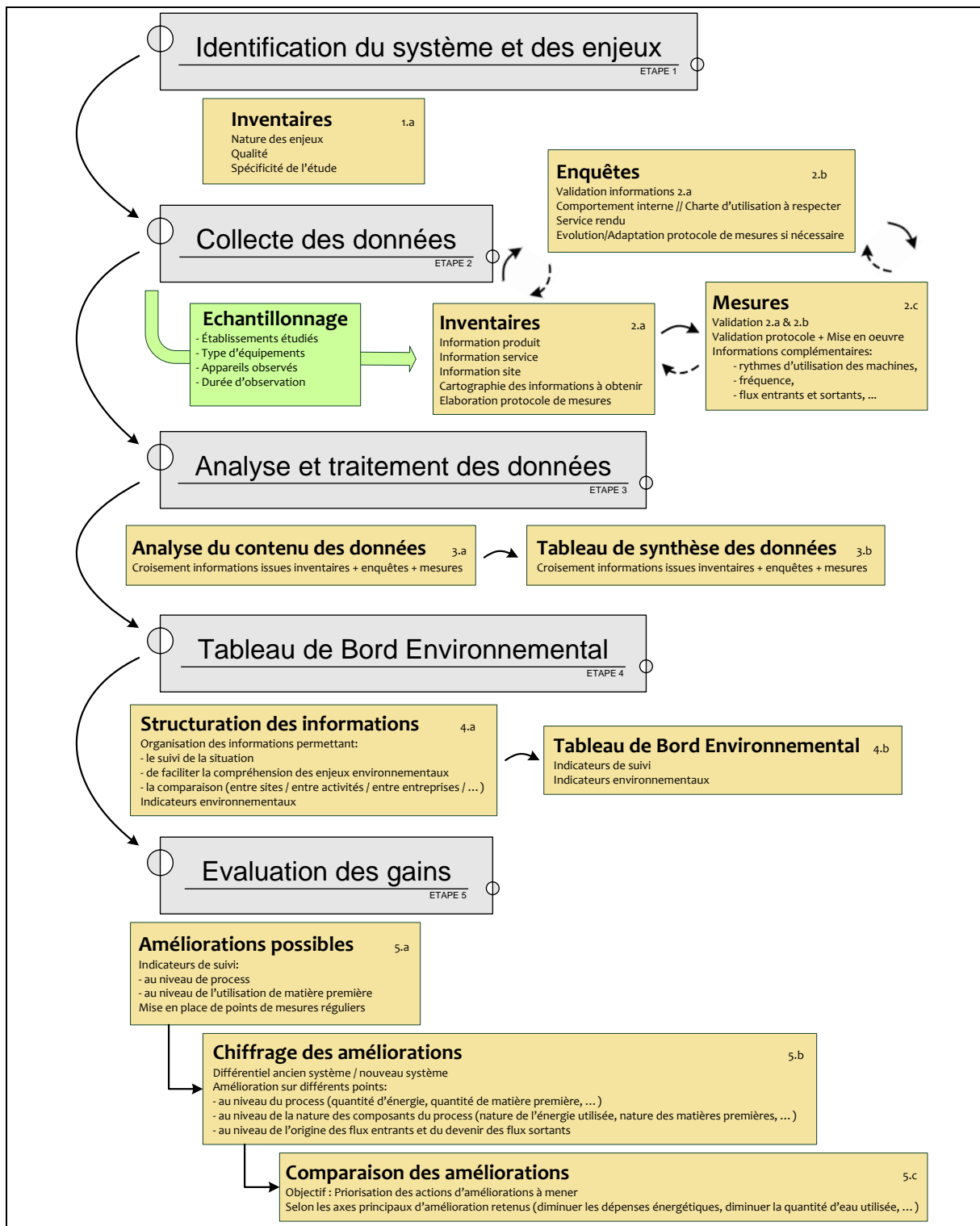


Figure 28: Schéma de la méthodologie élaborée [d'après [Moreau et al., 2011a], modifié]

Le troisième chapitre de ce manuscrit présentera la mise en application de cette méthodologie lors de deux études de cas ainsi que l'évolution de la méthodologie par les retours d'expériences.

Chapitre 3 Etudes de cas et évolution de la méthodologie

La méthodologie développée a fait l'objet de deux applications en conditions réelles. La première application a eu lieu en 2009, dans le cadre d'un partenariat avec la société Casino Information Technology (CIT) filiale du groupe Casino. Après quelques compléments apportés suite au retour d'expérience de cette application, la méthodologie a été appliquée une seconde fois au sein de l'Ecole des Mines en 2011.

Les résultats de ces deux études de cas sont détaillés dans le présent chapitre en trois parties distinctes : (1) Etude de cas « groupe Casino », (2) Evolution de la méthodologie et (3) Etude de cas « Ecole des Mines ».

Partie 1 Application 1 : Casino IT

De juin 2009 à janvier 2010, le groupe Casino a mis en œuvre un projet de diagnostic environnemental du système d'information et d'évaluation des axes d'amélioration. Sur l'initiative conjointe de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne et de Casino Information Technology (CIT), un partenariat a été établi aboutissant au développement et à l'application de la méthodologie d'évaluation des systèmes informatiques d'une activité de service décrite dans le chapitre 2.

Comme tout groupe multinational, le groupe Casino est composé de plusieurs entités regroupées en catégories d'établissements (magasins, entrepôts, cafétérias, data-centres, ...). La méthodologie s'attache à étudier les spécificités de chaque catégorie d'établissements puis à généraliser sur l'ensemble des établissements de chaque catégorie de profils identifiés par catégorie. L'étude se focalise sur deux types de services rendus par l'informatique : (1) **l'informatique centralisée** (IC) représentant l'ensemble de l'informatique présent au niveau des centres de données (data-centres) et (2) **l'informatique distribuée** (ID) qui regroupe l'ensemble des systèmes informatiques répartis dans les divers établissements appartenant au groupe Casino. Ces établissements peuvent être des magasins mais aussi des bureaux ou des entrepôts. Pour des raisons internes au groupe Casino, les cafétérias n'ont pas pu être considérées dans l'étude.

Le périmètre d'étude considère deux établissements pour l'informatique centralisée :

- Le data-centre principal, appelé « NoSICa » construit en 2005
- Le data-centre d'origine appelé « site R »

Pour l'informatique distribuée, les établissements sont regroupés en catégories d'établissements nommées les « branches » (la branche hypermarché, la branche supermarché, ...). Le panel concerné est le suivant :

- 108 hypermarchés,
- 304 supermarchés,
- 1980 commerces de proximité (« petits Casino »),
- 24 entrepôts,
- les bureaux (siège social de Casino).

Note : pour des raisons de confidentialité, les résultats seront exprimés sous forme relative, en les mentionnant en pourcentage du total.

De plus, les modèles des équipements et leurs quantités présents au sein des établissements ne seront pas détaillés.

1.1 Etape 1 : Identification du système et des enjeux

1.1.1 Le système

Le périmètre du système tient compte de l'organisation des établissements présents au sein du groupe Casino. Nous distinguons donc :

- l'informatique centralisée : composée de deux data centres ;
- l'informatique distribuée, rassemblant les établissements appartenant au groupe Casino (hypermarchés, supermarchés, commerces de proximité, entrepôts et bureaux).

De plus, notre étude se focalise uniquement sur les équipements informatiques nécessaires au fonctionnement de ces différents établissements et donc permettant d'assurer le fonctionnement de l'activité du groupe. Ce système exclut donc l'ensemble des équipements informatiques vendus aux clients dans l'enceinte des magasins. En revanche, les ordinateurs, serveurs, imprimantes, etc. permettant d'assurer l'activité de vente des magasins ainsi que les comportements de leurs utilisateurs sont intégrés dans ce périmètre d'étude.

La Figure 29 permet de schématiser l'ensemble de ce périmètre d'étude.

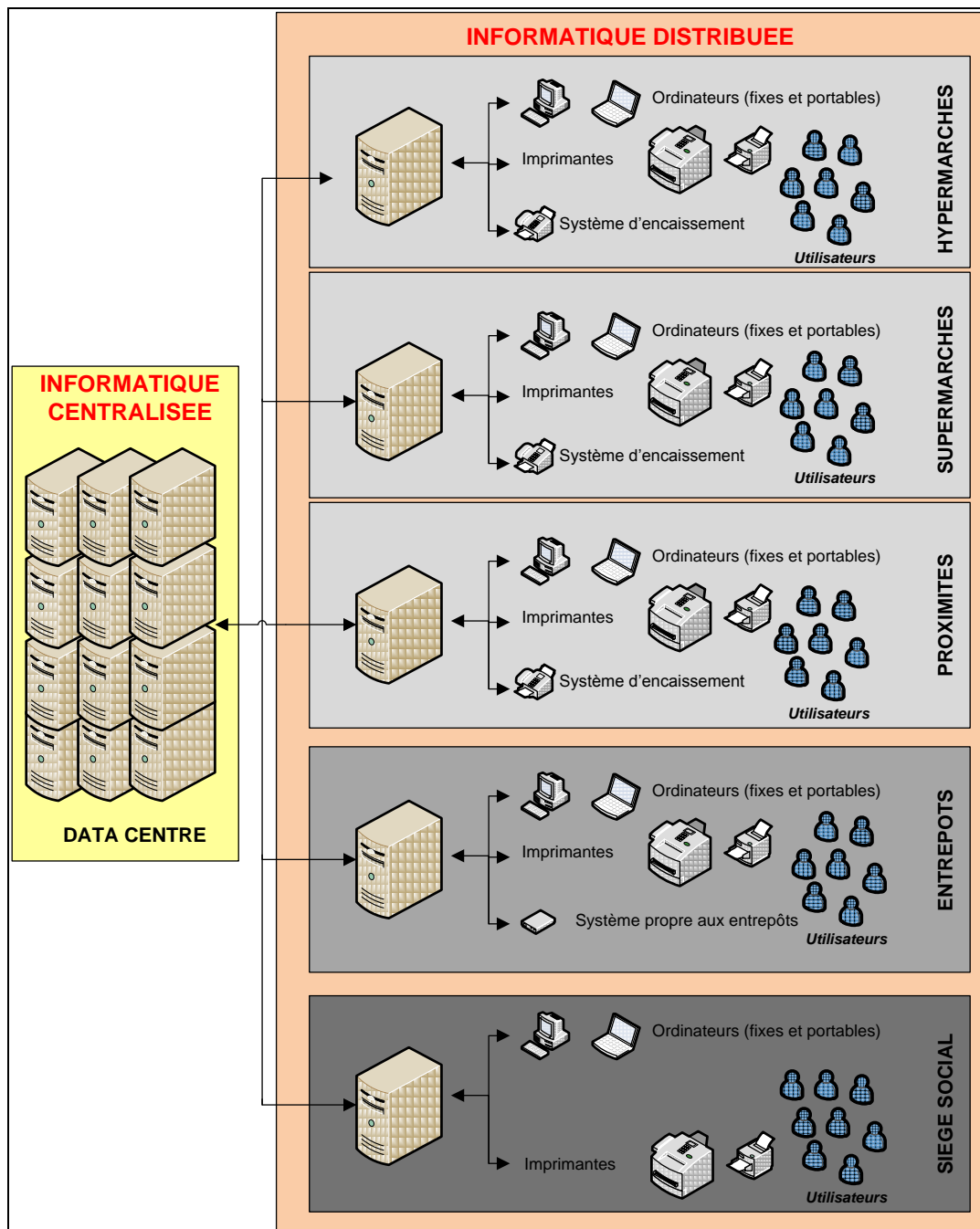


Figure 29: Représentation du système étudié lors de l'application 1

1.1.2 Les enjeux

Deux catégories d'enjeux ont été identifiées pour ce cas d'étude : des enjeux internes à l'entreprise et des enjeux plus globaux vis-à-vis de l'environnement et de sa communication externe.

Lors de la définition du projet, une réelle **préoccupation de la réglementation** a été identifiée. En effet, les puissances nécessaires au sein du data-centre NoSiCa construit en 2005 augmentaient constamment, se rapprochant dangereusement de la limite fixée par l'arrêté d'autorisation ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) établi lors de la construction du site. Une mise à jour de ce document nécessitant du temps et l'investissement de nombreuses personnes, une réelle préoccupation est apparue pour tenter de ralentir cette augmentation mais aussi d'évaluer comment la situation pouvait être améliorée.

En outre, cette préoccupation s'est vue amplifiée par les perspectives de **construction d'un nouveau centre de données** pour remplacer l'ancien site R. Dans cette optique, il était nécessaire d'évaluer les points forts et les points sensibles du site NoSiCa afin de construire un nouveau site plus « performant ».

De plus, le groupe Casino est **engagé envers l'environnement**. En effet, le groupe a réalisé en 2008 son second Bilan Carbone® (le premier ayant été mené durant l'année 2004) selon la méthode de l'ADEME et les résultats avaient mis en avant une part importante des émissions à allouer aux équipements informatiques. L'équipe de CIT a donc souhaité établir plus précisément les émissions de GES liés à ces systèmes. Pour cela, **un référentiel d'évaluation environnementale adapté aux équipements informatiques** devait être développé au sein du groupe Casino. Une telle démarche pourra par la suite faire **l'objet de communications** diverses permettant de mettre en avant l'aspect vertueux de l'entreprise.

En outre, lors du début du projet, la **contribution climat-énergie** était en cours de réflexion au niveau national. Son application et les conséquences financières qu'elle aurait pu engendrer ont été un accélérateur pour la mise en place d'un projet portant sur l'évaluation des impacts environnementaux de cette activité. Cependant, des changements décisionnels politiques l'ont éliminée et jusqu'à présent, elle n'est toujours pas en application. Néanmoins, la réalisation de cette étude permettra à CIT de mieux connaître ces impacts environnementaux et ainsi d'anticiper les conséquences réglementaires, techniques et financières qu'une telle contribution pourrait avoir sur leur activité.

Enfin, dans un contexte d'**expansion du secteur informatique**, il semble pertinent de se préoccuper de ses conséquences sur l'environnement.

Ainsi, les enjeux identifiés sont :

- **Enjeux internes :**
 - Préoccupation vis-à-vis de la réglementation
 - Construction d'un nouveau site : volonté d'amélioration par rapport à l'existant
 - Volonté d'exprimer l'impact environnemental selon un référentiel défini pour les technologies de l'information
 - Démarche de communication
 - Preuve d'un engagement concernant l'environnement
- **Les enjeux externes :**
 - Préoccupation vis-à-vis de la contribution-climat-énergie en réflexion en 2009
 - Secteur informatique en pleine expansion

1.2 Etape 2 : Collecte des données

Les résultats d'une évaluation environnementale dépendent de deux facteurs : les données mobilisées et les modèles utilisés. Ainsi, la phase de collecte des données est particulièrement importante. Elle doit être réalisée avec rigueur et précision. Comme présenté en Figure 25 (page 103), elle est décomposée en quatre parties : une phase d'échantillonnage, une phase d'inventaires, une phase d'enquêtes, et une phase de mesures. Ces étapes, réalisées en parallèle, nécessitent plusieurs itérations afin de valider et de compléter l'ensemble des données à tout moment.

1.2.1 La phase d'échantillonnage

Afin de proposer une méthode qui puisse être reproductible en termes de coûts (en temps et matériels de mesures), nous avons choisi de réaliser cette étape de collecte des données sur un site de chaque branche seulement. Le choix du site s'est fait comme suit.

En coopération avec le personnel de CIT travaillant sur le projet, les établissements retenus pour l'étude ont été sélectionnés selon trois critères. Le premier critère concerne la **représentativité du parc informatique**. Sur la base des inventaires des équipements présents sur tous les établissements de chaque branche, nous avons établi un parc informatique type. L'établissement choisi devra donc être le plus proche de ce parc de référence. Le second critère, essentiellement technique, s'intéresse à l'**accessibilité des équipements**. Dans certains établissements, les branchements électriques se font sur des prises spéciales de type P17 nécessitant la mise en place d'adaptateurs (Figure 30) et donc rendant les mesures plus contraignantes. Dans la mesure du possible, ces contraintes techniques ont été évitées. Enfin, pour des raisons pratiques et techniques, le troisième critère concerne la **localisation géographique**. Sur les établissements remplissant les deux premiers critères, nous avons alors retenu l'établissement situé dans l'agglomération stéphanoise.

Ainsi, les établissements constituant notre échantillon sont :

- Le data-center NoSiCa
- L'hypermarché de Monthieu
- Le supermarché de Bergson
- L'entrepôt du Technopôle
- Le siège de Casino (Saint-Etienne)
- L'ensemble des informations nécessaires à l'étude pour la branche proximité ont été obtenues en centrale sur les prototypes des appareils installés en magasins par l'intermédiaire du responsable de branche et des membres de son service.



Figure 30: Adaptateur pour prise P17 [Adaptateur P17/2P+T 16 A, Marque L'Ebenoid, www.ebenoid.fr]

La collecte des données réelles relatives à la quantité, aux modèles ainsi qu'aux puissances et au rythme d'utilisation des équipements informatiques sur le terrain a permis de valider et de corriger les informations recueillies au préalable auprès des responsables de branches.

1.2.2 La phase d'inventaires

Les données d'inventaires ont été recueillies auprès des responsables informatiques de chaque branche et auprès des services généraux du groupe Casino (notamment pour les inventaires concernant les bureaux du siège social).

Deux types d'inventaires ont été recueillis :

- Les inventaires des sites retenus pour l'expérimentation
- Les inventaires de l'ensemble des équipements présents dans tous les établissements d'une même branche pour l'extrapolation

L'inventaire du matériel informatique a consisté à récupérer les références exactes et les quantités précises de chaque équipement présent dans les différentes branches comprises dans le périmètre de l'étude. Un inventaire exhaustif du matériel présent sur l'ensemble des établissements du groupe en France a été réalisé sur la base des données disponibles pour l'ensemble des établissements de chaque branche.

En ce qui concerne le siège, les données d'inventaires ont été recueillies par un membre de CIT. Ces données concernent l'ensemble des bâtiments constituant le siège du groupe Casino à savoir les bâtiments sur Saint-Etienne, les deux sites de Marne-la-Vallée et les différents sites présents dans Paris intra-muros.

Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons présenter ici les résultats bruts de ces inventaires, néanmoins, la Figure 31 représente les proportions de chaque catégorie d'équipements par rapport au total des équipements au sein de chaque établissement.

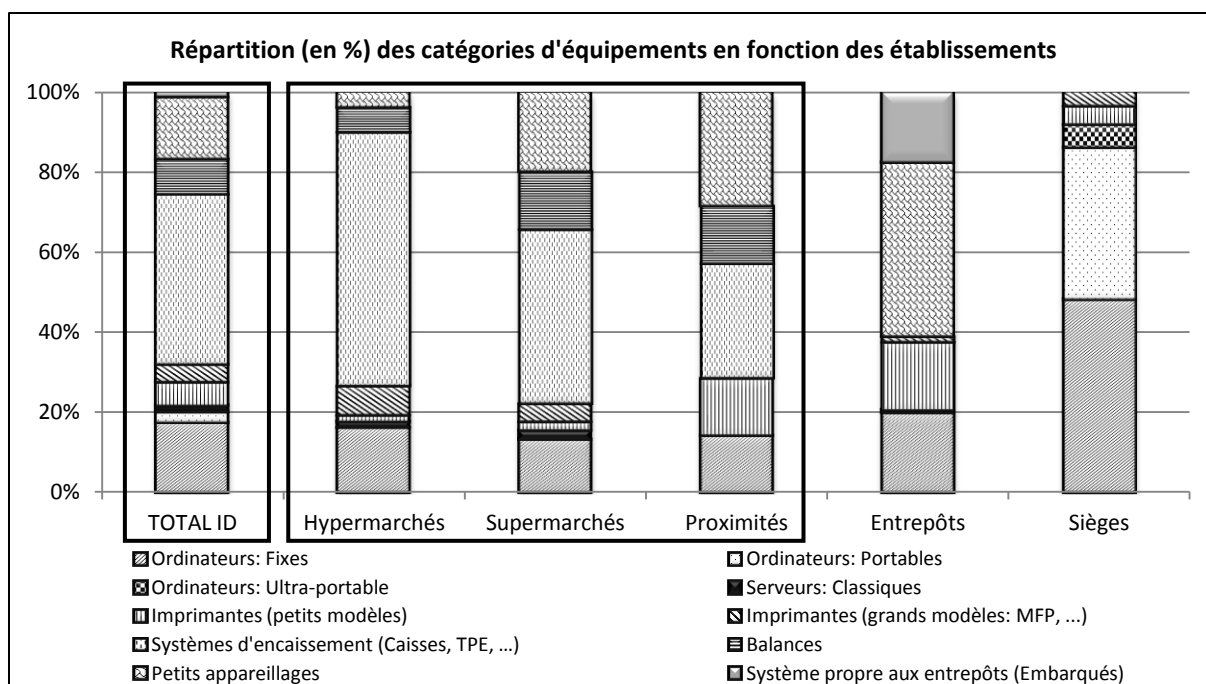


Figure 31 : Répartition (en %) des catégories d'équipements en fonction des établissements et synthèse pour l'informatique distribuée (ID)

Ce graphique (Figure 31) montre que les établissements de chaque branche ne présentent pas les mêmes proportions d'équipements. Néanmoins, des profils de tendances peuvent être établis, nous distinguons ainsi :

- un profil propre aux magasins avec des proportions différentes en fonction de leur taille : hypermarchés, supermarchés et proximités ;
- un profil propre aux entrepôts ;
- un profil spécifique aux sièges du groupe Casino regroupant les bureaux.

Bien que les deux ne puissent être comparés de par la spécificité des services rendus par chaque catégorie, la Figure 32 montre les profils différents du total de l'informatique distribuée (ID) (Figure 32a) et du total de l'informatique centralisée(IC) (Figure 32b). Notons qu'il existe de nombreux échanges de données entre l'ID et l'IC.

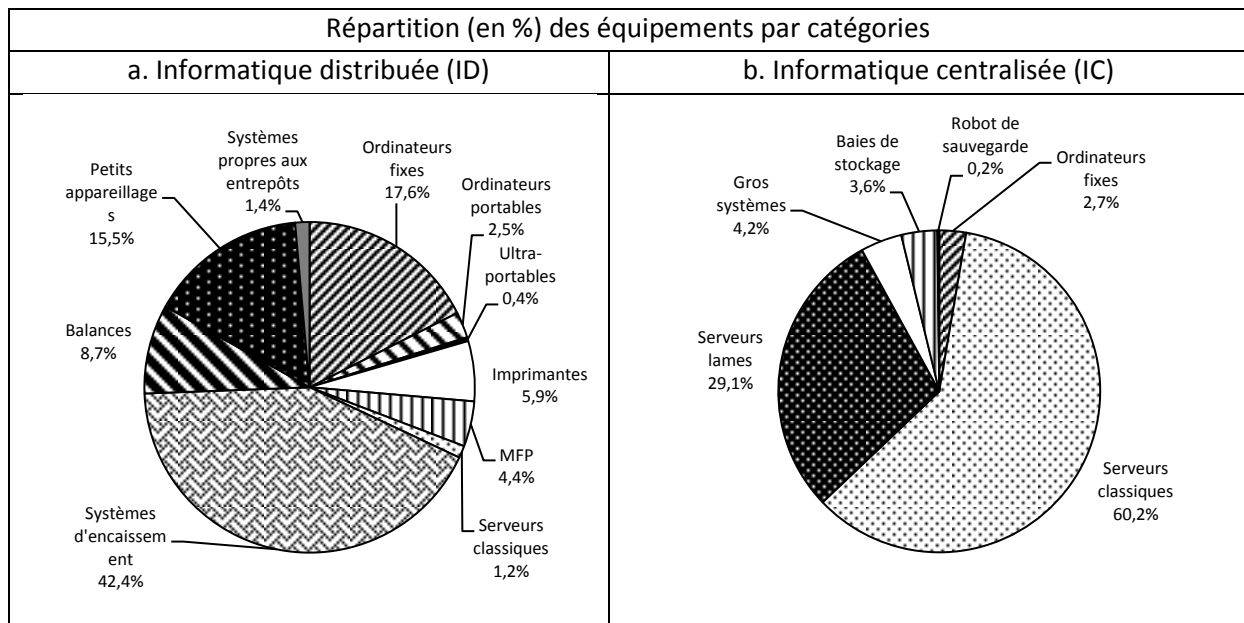


Figure 32: Répartition des équipements (en % par rapport au total) en informatique centralisée et distribuée

Les deux graphiques précédents mettent en évidence la différence importante qui existe entre les équipements présents au sein de l'ID et de l'IC, rendant les deux profils non comparables.

En informatique distribuée, les systèmes d'encaissement représentent plus de 40% des équipements (42,4 %) suivis des ordinateurs fixes (17,6 %) et d'un ensemble de petits appareils (15,5 %). Alors qu'en informatique centralisée, ce sont les serveurs qui sont présents en très grande majorité avec un total de près de 90% (60,2 % pour les serveurs classiques et 29,1 % pour les serveurs lames) des équipements.

Les profils précédents sont relatifs aux équipements présents ainsi qu'aux spécificités des services attendus. Ainsi, les systèmes d'encaissements sont majoritaires au sein des magasins, alors que les ordinateurs assurent uniquement un soutien logistique relatif par exemple, à la gestion des stocks des divers produits. Dans les magasins de proximités, le nombre de systèmes d'encaissement présents est plus faible ce qui explique une répartition plus équilibrée entre les divers équipements présents. Le fonctionnement des entrepôts repose sur des équipements portables permettant la transmission des informations entre l'ordinateur central et les opérateurs qui préparent les commandes. De même, afin de finaliser les lots (commandes) préparées, des imprimantes sont réparties à plusieurs endroits de l'établissement. Par conséquent, les équipements majoritaires au sein de cette catégorie d'établissement regroupent l'ensemble de ces équipements. Enfin, représentatifs d'un travail de bureau, les ordinateurs représentent plus de 90% des équipements présents au sein des bâtiments du siège. En informatique centralisée, la prédominance des serveurs (89,3%) est liée au service de stockage des données qu'ils permettent.

1.2.3 La phase d'enquêtes

Une enquête auprès de certains utilisateurs a ensuite été réalisée via un questionnaire (présenté en Annexe 4) concernant les pratiques d'utilisation de l'informatique sur chaque site étudié. Elle avait pour objectif de connaître plus en détail les modalités d'utilisation du matériel. Nos questions portaient sur les pratiques d'utilisation, les durées d'utilisation, les modalités de mise en veille ou d'extinction des différents équipements ainsi que sur le degré de liberté d'intervention des

responsables informatiques au sein de chaque établissement,... De même, des éléments d'informations relevant de la gestion des consommables et des déchets ont été recueillis.

Avant d'interroger le personnel des établissements retenus comme « site d'étude », le questionnaire a été présenté aux différents responsables des branches (Hypermarchés, Supermarchés, Entrepôts, ...) lors des entretiens qui se sont déroulés de juin à octobre 2009. Certaines informations recherchées dans ce questionnaire ont pu être obtenues auprès de ces différents responsables. Mais la majorité des informations n'ont pu être acquises ou vérifiées que lors de la rencontre avec certains membres du personnel des sites d'étude.

Les résultats de ces questionnaires montrent que 77,4 % des utilisateurs n'éteignent pas leur poste lors d'une absence du bureau, seul le verrouillage de la session est appliqué, qu'il s'agisse d'une pause (café ou repas) ou la nuit pendant la semaine.

Il semblerait que le verrouillage de la session soit appliqué de manière quasi systématique par les employés. En effet, 94,6% des répondants ont affirmé qu'il s'agissait d'une des consignes de sécurité transmises par la hiérarchie. Les consignes concernant les mises en veille ou l'arrêt des machines ne semblent pas être connues et leur existence a été remise en question par de nombreux répondants (82,3%). Ainsi, peu de consignes sont connues et appliquées par les utilisateurs et celles qui sont appliquées concernent essentiellement la sécurité du poste de travail (verrouillage de session, changement de mot de passe) mais n'abordent pas la problématique de la gestion de l'alimentation.

Des pistes d'économies d'énergie se dégagent de ces premières enquêtes comme le paramétrage des mises en veille, l'arrêt automatique la nuit au-delà d'une certaine heure, ... De plus, lors de la réalisation de l'étude, ces questions de consignes semblaient déjà être une préoccupation de la part du groupe Casino et une charte d'utilisation des équipements informatiques était déjà à l'étude en interne. Les résultats de nos enquêtes ont confirmé la nécessité de cette mise en place.

1.2.4 Mesures

Enfin, des mesures *in-situ* de consommations électriques de différents équipements, dans un établissement de chaque branche identifiée, ont permis de connaître les consommations des différents équipements sur les sites d'étude.

Grâce à des boîtiers de mesures ou « energy meter » (Economètre avec interface USB, Standby-Energy-Monitor Log 16, NZR), les consommations effectives des différents équipements sur les sites d'étude ont été mesurées. Ces consommations variant au cours de la journée et en fonction de l'utilisation qui en est faite, les mesures permettent de mieux comprendre le fonctionnement de chaque équipement. Le protocole a été élaboré dans ce sens : les « energy meter », positionnés pendant une semaine, assurent le suivi de mesures permettant de connaître l'évolution du fonctionnement des équipements en fonction des jours de la semaine mais aussi en fonction des heures d'ouverture des sites au public. Les équipements ayant fait l'objet de mesures étant très différents, les pas de temps de prises de mesures varient entre une et trente minutes (Tableau 23). Le modèle d'« energy meter » utilisé dans le cadre de l'étude permet de récupérer les données par l'intermédiaire d'une interface USB et d'un logiciel (fourni par le constructeur, logiciel *Vadev® Distant meter reading system Version 1.0.1* [Vadev, 2006]). Ces boîtiers de mesures peuvent stocker jusqu'à 18 000 valeurs avec des pas de temps pouvant aller de 1 à 60 minutes.

Tableau 23 : Explication des pas de temps retenus par équipement pour la phase de mesures

	Pas de temps retenus (en minutes)	Explication du choix retenu
Ordinateurs fixes	5	De manière générale, les actions réalisées sur les ordinateurs durent plusieurs minutes (lecture de mail, bureautique, internet, ...). Un pas de temps de 1 minute aurait abouti à un trop grand nombre de données pour peu d'informations supplémentaires. De même, un pas de temps de 10 minutes aurait impliqué une trop grande perte d'informations. Le même pas de temps a été retenu pour les trois catégories d'ordinateurs.
Ordinateurs portables	5	
Ordinateurs ultra-portables	5	
Serveurs*	30	Après des essais à 5 et 10 minutes, les serveurs feront l'objet d'une prise de mesure toutes les 30 minutes. Un pas de temps plus fin aboutit aux mêmes résultats mais impliquent un plus grand nombre de données à traiter et stocker.
Imprimantes	1	L'action d'impression peut être courte (si le document imprimé ne comporte qu'une ou deux pages), le pas de temps le plus petit possible a donc été retenu pour les imprimantes. Même si le nombre de données sera important, seul ce pas de temps permet d'obtenir l'ensemble des informations nécessaires. Le même pas de temps a été retenu pour les deux catégories d'imprimantes.
Imprimantes multi fonctions	1	
Systèmes d'encaissement	1	Les actions sur les systèmes d'encaissement, qu'il s'agisse du terminal de paiement ou de la caisse, sont courtes et répétitives. Le pas de temps le plus petit possible a donc été retenu malgré l'importante quantité de données obtenues afin d'obtenir les informations nécessaires pour la suite de l'étude.

* Les serveurs ont fait l'objet de plusieurs séries de tests de mesures pour savoir s'il était nécessaire d'avoir un pas de temps plus petit. Ainsi, les premiers serveurs ont été mesurés avec un pas de temps de 5 et 10 minutes, puis il a été décidé d'espacer les valeurs à 30 minutes. En effet, les résultats ne variaient pas selon le pas de temps retenu.

De plus, les serveurs possèdent une double alimentation qui a été testée lors des premiers essais pour connaître la répartition de la consommation sur les deux alimentations. Il s'avère que les deux courbes sont superposables, par conséquent lorsque les mesures seront réalisées sur une seule alimentation, la consommation électrique mesurée sera doublée pour obtenir la véritable consommation du serveur.

Suite à un entretien avec le responsable des infrastructures distribuées, il a été convenu que ces campagnes de mesures sur les différents sites considérés comme « site d'étude » pouvaient être menées, en accord avec les différents responsables des branches. Ces campagnes se sont déroulées à l'aide des « energy meter » reliés aux différents équipements informatiques. Pour des raisons techniques et de sécurité, des membres du personnel de CIT, ont réalisé les différents raccordements électriques nécessaires. Ces campagnes de mesures ont eu lieu entre le 25 septembre et le 27 octobre 2009. Les campagnes de mesures au siège social de Casino ont été réalisées en présence d'un chargé de mission de CIT qui a effectué les raccordements électriques nécessaires pour les mêmes raisons que celles citées précédemment. Ces campagnes se sont déroulées entre le 17 novembre et le 2 décembre 2009.

Au total 48 équipements ont fait l'objet de mesures. Le Tableau 24 indique le nombre d'équipements pour chaque établissement étudié.

Tableau 24: Nombre d'équipements de chaque catégorie ayant fait l'objet de mesures par établissement.

	Hypermarché	Supermarché	Proximité	Entrepôt	Siège	TOTAL
Ordinateurs (Fixe, portable, ultra-portable)	1	2	1	2	5	11
Serveur	2	2	1	-	1	6
Imprimante	1	-	1	1	2	5
Imprimante multi fonctions	1	2	2	-	2	7
Equipements spécifiques	3	2	4	10	-	19
TOTAL	8	8	9	13	10	48

Pour l'informatique centralisée, les mesures *in-situ* n'ont pas été possibles en raison de la complexité du système et des raccordements électriques nécessitant une accréditation électrique particulière. Par conséquent, une autre méthodologie basée sur un coefficient de consommation électrique [Larzabal, 2009] en fonction de la puissance installée a permis d'obtenir des valeurs de consommations électriques.

En croisant les résultats des mesures récupérées à l'aide des boitiers et les réponses aux entretiens, les informations issues des données constructeurs peuvent être vérifiées et corrigées. Certaines informations peuvent être déduites des mesures comme la puissance moyenne mesurée lorsque l'équipement est en activité, en veille et éteint ou encore le temps moyen passé selon les trois modes (activité, veille, éteint). La Figure 33 indique les informations recueillies à partir du graphique des mesures.

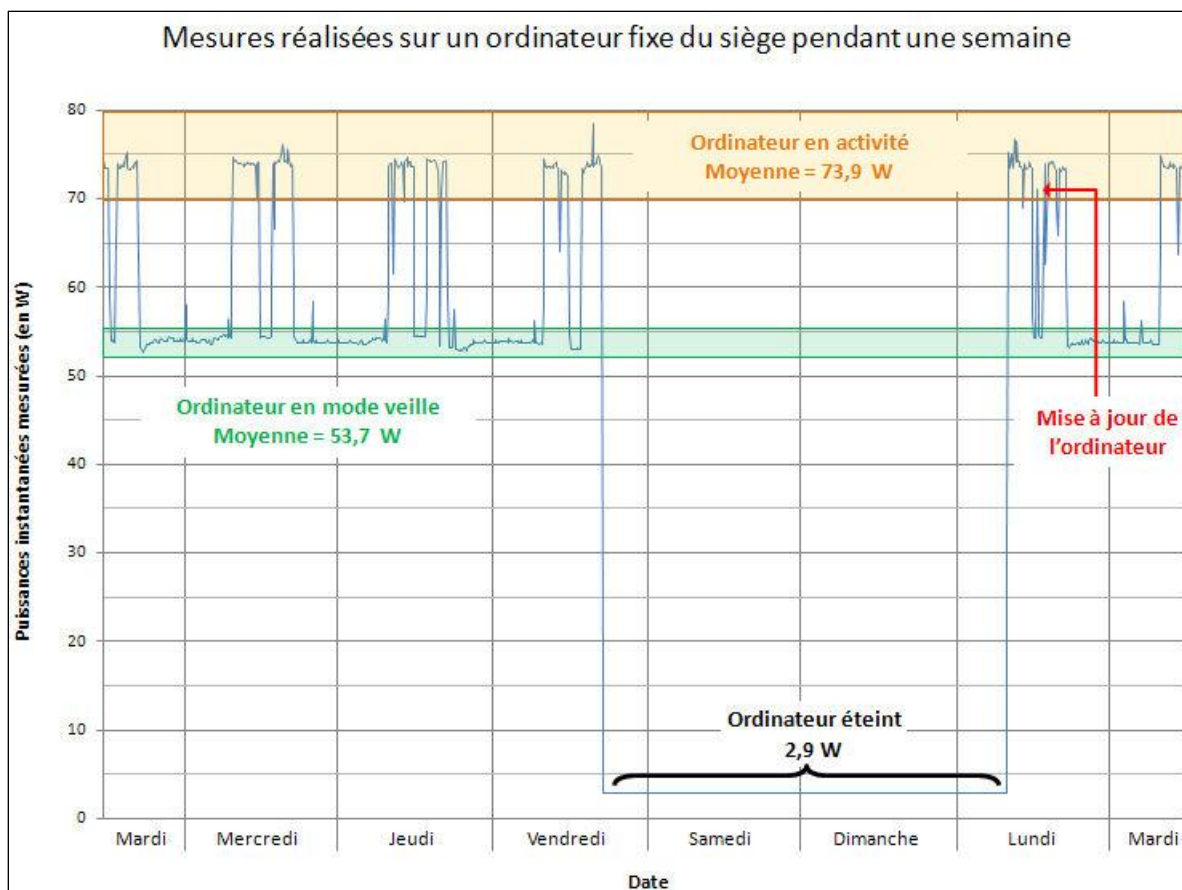


Figure 33: Mesures de puissances instantanées pendant une semaine sur un ordinateur fixe

Avec l'ensemble de ces informations, des profils d'utilisateurs mais aussi de comportements des équipements peuvent être établis. Ces informations sont mentionnées dans l'onglet « description du site » permettant d'aboutir au tableau de bord environnemental.

Les méthodes de calculs utilisées sont celles décrites dans le chapitre 2 lors de la description de la méthodologie. Le graphique de la Figure 33 peut ainsi être décomposé selon les trois modes préalablement définis (veille, en activité et éteint). De manière à rendre les résultats plus compréhensifs et représentatifs, il a été choisi d'annualiser l'ensemble des éléments (Tableau 25). Pour cette généralisation, il a été considéré que les équipements sont utilisés de manière identique tout au long de l'année. Les valeurs hebdomadaires ont donc été multipliées par le nombre de semaines de l'année 2009 (année de déroulement de l'étude) soit 52,14 semaines.

Tableau 25: Mesures réalisées sur une semaine et bilan annuel (1 an = 52,14 semaines)

	Résultats des mesures sur une semaine			Bilan annuel		
	Temps (en h)	Puissance moyenne (en W)	Consommation (en kWh)	Temps (en h)	Puissance moyenne (en W)	Consommation (en kWh)
Activité	40,8	73,9	3,02	2 127,4	73,9	157,2
Veille	64,5	53,7	3,46	3 363,2	53,7	180,6
Eteint	62,7	2,9	0,18	3 269,4	2,9	9,5
Total	168	-	6,66	8 760	-	347,3

Enfin, les poids des déchets d'équipements informatiques ne pouvant être obtenus directement, il a été émis l'hypothèse que chaque équipement deviendrait un déchet au bout du temps d'amortissement de l'équipement, par conséquent, le poids des équipements permet d'obtenir le poids des déchets. Dans le cas présenté, il s'agit d'un ordinateur fixe dont le poids moyen est fixé à 12,1 kg selon la base de données Ecoinvent [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010]. En outre, la politique informatique de renouvellement des équipements en vigueur dans cette société prévoit une durée de vie de 3 ans pour les ordinateurs fixes. Par conséquent, le poids de déchets générés par cet ordinateur équivaut à 4,03 kg par an ($4,03 \text{ kg} = 12,1 \text{ kg} / 3 \text{ ans}$).

1.3 Tableau de bord environnemental

1.3.1 Indicateurs de suivi

- ***Les consommations électriques***

Les principaux indicateurs de suivi opérationnels concernent les consommations électriques. Ces dernières peuvent être fonction de la catégorie d'équipement au sein d'un établissement mais aussi de l'ensemble des établissements.

Pour chacun des équipements ayant fait l'objet de mesures de consommations électriques, les puissances et intensités de courant instantanées ont été mesurées pendant une semaine à intervalles réguliers variant de une à trente minutes. Ces données ont par la suite été annualisées afin que l'ensemble des résultats soient exprimés annuellement.

L'ensemble des équipements, notamment en hypermarché, n'ayant pu faire l'objet de mesures, des mesures *in-situ* complémentaires ont été envisagées mais n'ont pu être réalisées. Ces mesures supplémentaires devaient permettre de connaître les durées et les puissances (en activité et en veille) des équipements tels que les traceurs ou encore les imprimantes métiers telles que les imprimantes de billetterie, les imprimantes des cartes de fidélité. De même, dans le périmètre initialement défini, les cafétérias devaient être comprises dans cette étude, mais des problèmes de disponibilité de personnel et de périmètre d'intervention n'ont pas permis les mesures en cafétéria. Les cafétérias ayant une gestion de leur informatique non effectuée par Casino IT, mandataire de l'étude, elles n'ont finalement pas été intégrées au périmètre de l'étude.

La Figure 34 indique la répartition des consommations électriques au sein des magasins constituant notre échantillon, selon les différentes catégories d'équipements.

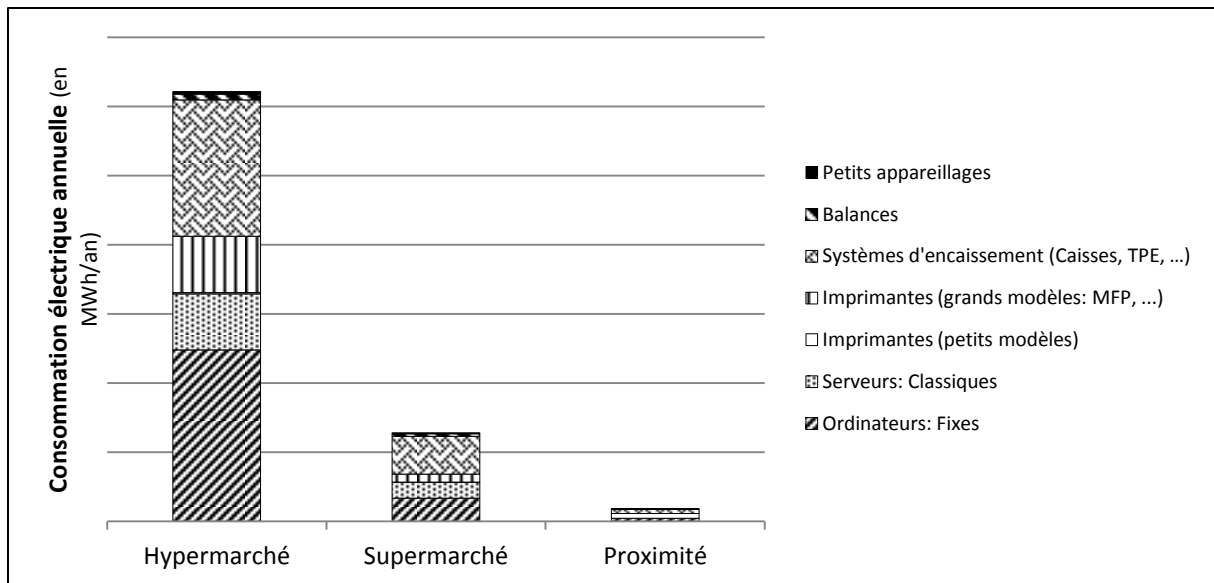


Figure 34: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour les établissements témoins

Cette Figure 34 nous indique qu'un hypermarché a des consommations électriques annuelles supérieures aux consommations d'un supermarché, elles-mêmes supérieures à celles en proximité. La taille de l'établissement et la quantité d'équipements présents dans chaque magasin permettent d'expliquer cette répartition qui pourrait également être compensée par la quantité d'établissements de chaque type d'établissements (soit 108 hypermarchés, 304 supermarchés et 1 980 magasins de proximité). Ainsi, il paraît pertinent de comparer l'ensemble des établissements de chaque catégorie. Ces résultats sont présentés dans la Figure 35.

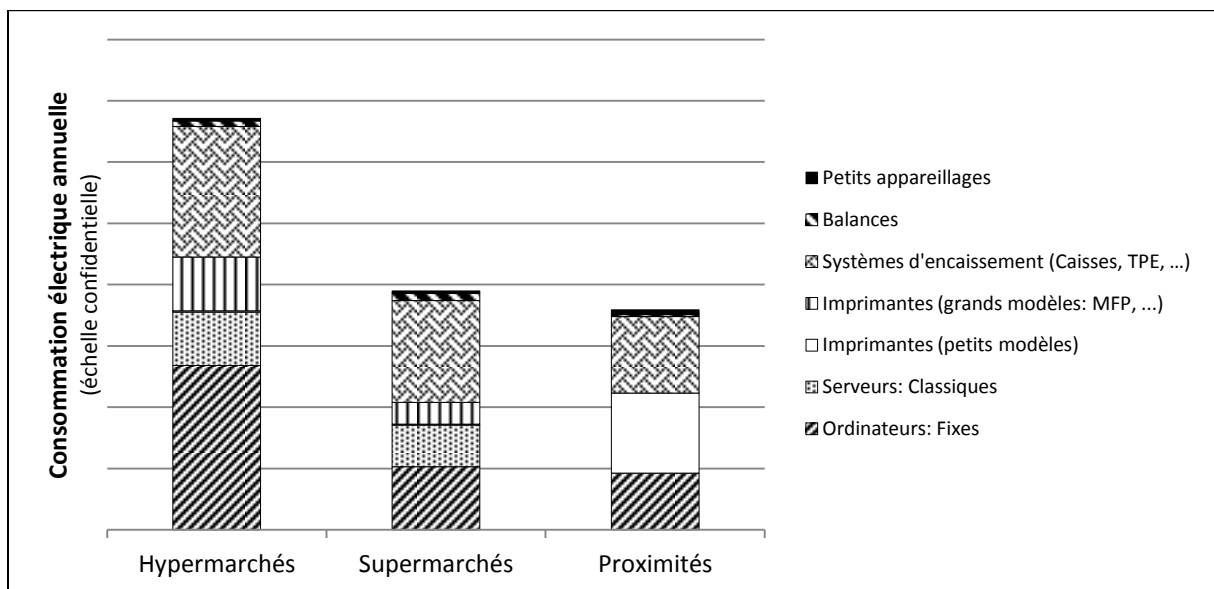


Figure 35: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour l'ensemble des établissements de chaque catégorie (hypermarchés, supermarchés et proximités)

Bien qu'ils ne soient pas majoritaires dans toutes les branches, les systèmes d'encaissement représentent l'ensemble des installations informatiques permettant le passage en caisse des articles. Il s'agit alors d'un ensemble constitué d'une caisse, d'un écran tactile, d'une douchette permettant la lecture des codes-barres et enfin d'un terminal de paiement. Ces systèmes sont une catégorie

fortement consommatrice au sein des magasins (respectivement 32%, 43% et 35% dans les branches Hypermarchés, Supermarchés et Proximités). Les ordinateurs assurent essentiellement un service de gestion des stocks, de transmission des commandes et des prix. Leur part dans la consommation électrique est également non négligeable (de 26 à 40%), il s'agit de la catégorie la plus consommatrice au sein de la branche hypermarchés. En revanche, pour les magasins de proximité, la catégorie la plus consommatrice se trouve être les imprimantes de petits modèles permettant au responsable de l'établissement d'éditer les documents devant être conservés au titre de suivi de l'activité. Notons cependant que cet ensemble des consommations liées à l'informatique ne représente qu'une faible part de la consommation électrique totale en magasin, soit 0,79% pour les hypermarchés, 0,89% pour les supermarchés et seulement 0,05% pour les magasins de proximité. Les responsables d'établissements n'ont pas été surpris par ces chiffres et nous ont informé que les postes les plus consommateurs d'électricité étaient très probablement : les groupes froids des espaces frais et surgelés ainsi que l'éclairage et la climatisation.

Les entrepôts n'ayant pas les mêmes catégories d'équipements, la répartition des consommations des différentes catégories est présentée dans la Figure 36.

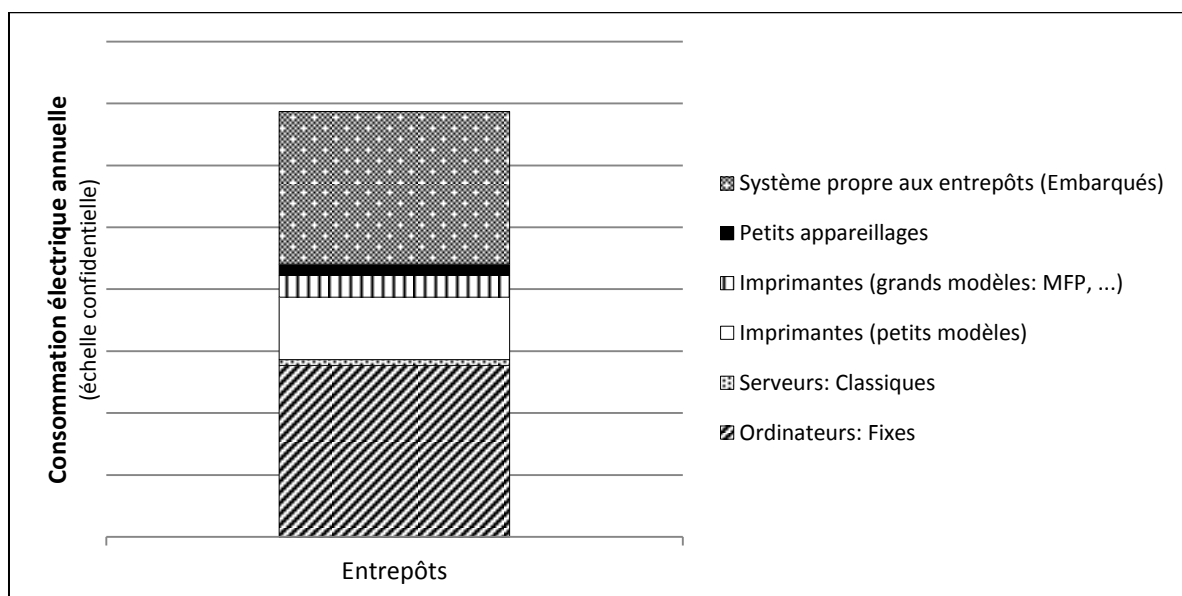


Figure 36: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour les entrepôts

Pour les entrepôts, la catégorie la plus consommatrice se trouve être les ordinateurs avec 40% de la consommation électrique totale. Avec 36% de cette consommation, les systèmes propres aux entrepôts que constituent les embarqués sont la seconde catégorie la plus consommatrice. Cependant, en comparant la consommation électrique de l'informatique à celle de l'ensemble du site (tous postes électriques confondus : éclairage, chariots élévateurs, ...), l'informatique ne constitue que 0,88% de la consommation électrique totale des entrepôts.

Les différents établissements constituant la branche siège de l'étude n'ayant pas les mêmes catégories d'équipements, la répartition des consommations des différentes catégories est présentée dans la Figure 37.

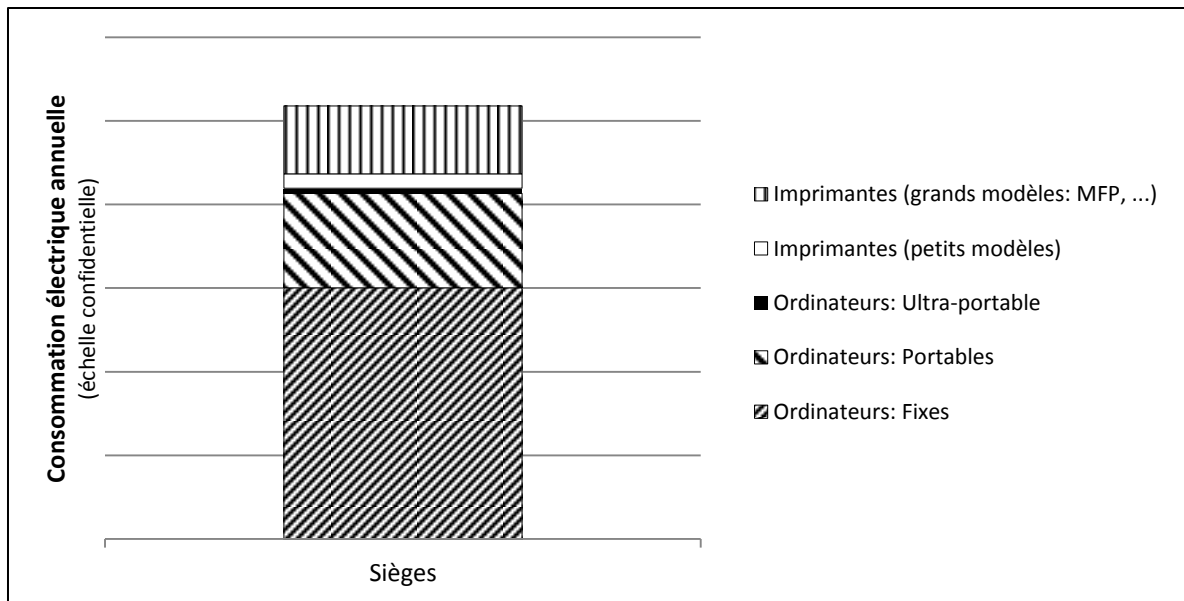


Figure 37: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour le siège

Les ordinateurs constituent 86% de la consommation électrique informatique du siège, répartis à 62% pour les ordinateurs fixes, 23% pour les ordinateurs portables et 1% pour les ultra-portables. Bien que les ordinateurs fixes (5,5 kWh annuel) consomment unitairement plus que les ordinateurs portables (2,6 kWh annuel) consommant eux-mêmes plus que les ultra-portables (1 kWh annuel), ce résultat doit également être ramené au nombre d'équipements dans chacune de ces catégories. Ainsi, au-delà de la consommation unitaire de chacun de ces équipements, leur nombre joue un rôle important dans la consommation électrique totale de l'informatique de cette branche. Le siège étant essentiellement constitué de bureaux, la part de l'informatique dans la consommation électrique totale s'avère plus importante que pour les autres catégories d'établissements et atteint environ 12%.

L'informatique centralisée est composée d'équipements très particuliers dont la majorité ne se retrouve dans aucune autre branche. De plus, contrairement aux autres établissements, il n'a pas été possible de réaliser des mesures directes sur ces équipements (raccordements nécessitant une accréditation électrique). Néanmoins, les consommations électriques ont pu être estimées à l'aide des puissances électriques des différents équipements. En effet, sur la base des inventaires des équipements présents et des données constructeurs, le calcul de la puissance totale installée est réalisé puis mis en parallèle avec la consommation électrique informatique du site. Ainsi, il est apparu que la consommation électrique des équipements représentait 59% de la puissance nominale des équipements [Larzabal, 2009]. Ce coefficient a alors été utilisé pour calculer les consommations des divers équipements ne pouvant faire l'objet de mesures. La répartition de ces consommations est présentée dans la Figure 38.

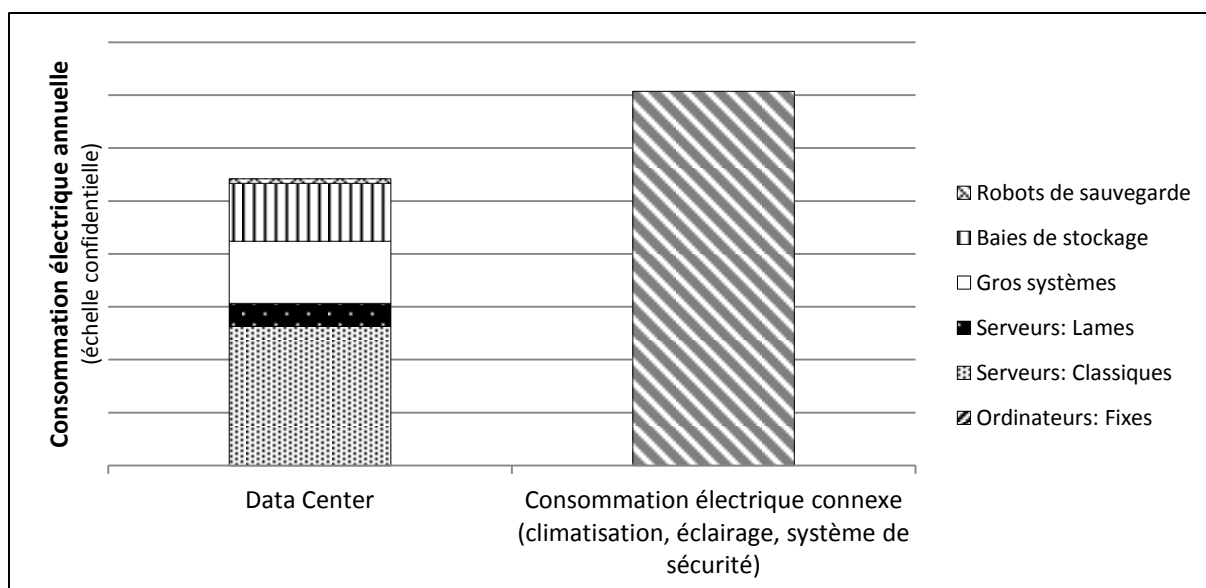


Figure 38: Consommations électriques annuelles par catégorie d'équipements pour l'informatique centralisée et consommation électrique connexe

Près de la moitié des consommations électriques en informatique centralisée sont liées aux serveurs classiques. Cette part importante est liée au nombre de ces serveurs. Le nombre de serveurs lames est équivalent à la moitié du nombre de serveurs classiques et leur alimentation étant partagée, ils tiennent une part de 8% de la consommation totale. Le robot de sauvegarde, bien qu'il n'y en ait qu'un par établissement donc deux au total sur le parc étudié représente 2% de la consommation totale. Son poids est donc loin d'être négligeable. De plus, ce résultat est à mettre en perspective de la consommation électrique totale du site. En effet, l'ensemble des infrastructures de ce site sont dédiées au bon fonctionnement de l'informatique. Leurs consommations doivent donc être associées aux consommations électriques des équipements. Ainsi, les consommations électriques connexes que sont la climatisation et l'éclairage, mais aussi le système de sécurité des établissements représentent 57% de la consommation électrique totale. Notons que ces résultats regroupent les deux data-centres du groupe situés sur Saint-Etienne. La performance du site principal (NoSICa) est donc diminuée par l'ancienneté du second site.

Pour conclure concernant la répartition des consommations électriques au sein de l'ensemble des établissements, la Figure 39 permet de visualiser la part de chaque branche d'établissements dans la consommation électrique informatique totale. Cette généralisation à l'ensemble des établissements s'est faite suivant la démarche de la Figure 23 (page 99) : la première condition permet de reconstituer l'ensemble du parc informatique de l'établissement à partir des équipements ayant fait l'objet de mesures ; la seconde condition permet de généraliser les résultats d'un établissement à l'ensemble des établissements d'une même catégorie. Il s'agit ainsi de remonter le processus de sélection mis en place lors de la constitution de l'échantillon.

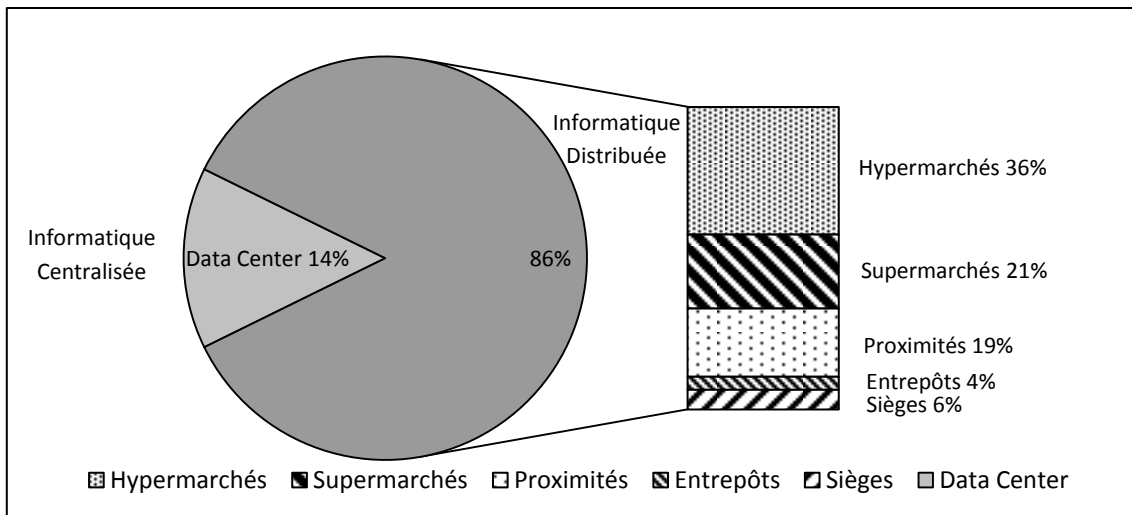


Figure 39: Répartition (en %) des consommations électriques de l'informatique distribuée et centralisée.

Les consommations au sein de chaque établissement sont plus faibles qu'au sein d'un centre de données mais le grand nombre d'établissements notamment les magasins rendent les consommations plus importantes en informatique distribuée qu'en informatique centralisée. Ainsi, 86% des consommations électriques liées à l'informatique résultent des infrastructures distribuées contre 14% pour les centres de données. Les établissements les plus consommateurs d'électricité sont les magasins : les hypermarchés, supermarchés et magasins de proximité avec respectivement 36 ; 21 et 19 % de la consommation électrique informatique totale.

La répartition du temps passé par chaque catégorie d'équipements en fonction des modes en activité, en veille et éteint révèle également d'éventuels points sensibles dans l'utilisation de ces équipements. En effet, sur cette répartition peuvent être identifiés, par exemple, les équipements qui ne sont jamais éteints ou encore ceux dont la veille représente la majorité du temps d'utilisation. L'ensemble des résultats pour l'informatique distribuée est présenté dans la Figure 40.

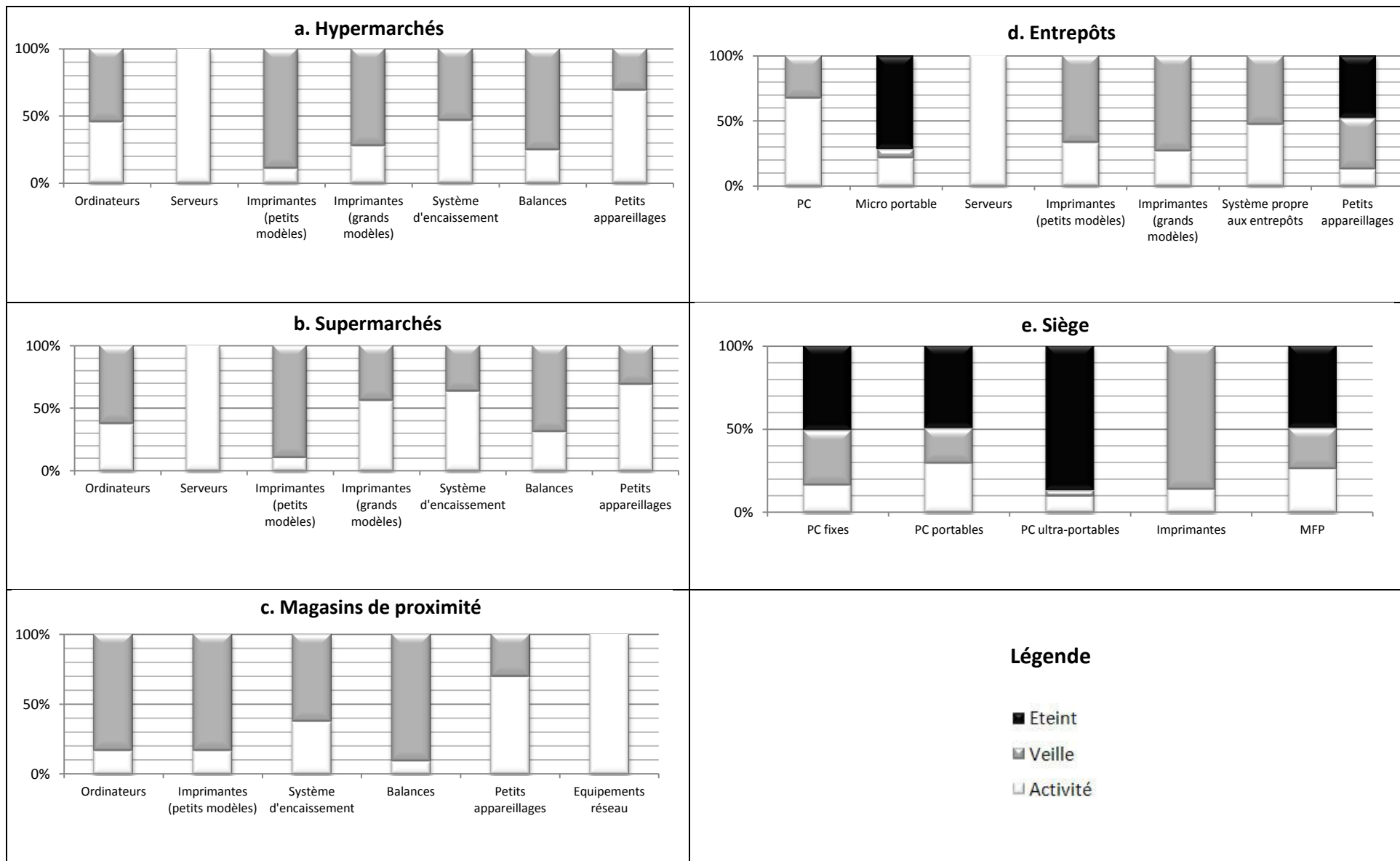


Figure 40: Répartition des temps passés sous les différents statuts pour les équipements présents en informatique distribuée

Plusieurs conclusions peuvent être déduites de ces graphiques :

- les équipements présents dans les magasins (hypermarchés, supermarchés et magasins de proximité) ne sont **jamais éteints**. Des contraintes métiers liées à diverses applications sont mises en avant par les équipes techniques afin d'expliquer cette procédure. Néanmoins, un véritable point sensible dans le système actuel vient d'être identifié et devra être approfondi dans la suite de l'étude, sans omettre les contraintes mentionnées.
- seuls les serveurs et les équipements réseaux sont en **activité durant 100% du temps**. Ces deux catégories d'équipements assurant la liaison des établissements avec le réseau central du groupe, ils doivent fonctionner en continu.
- les taux d'activité des équipements de la branche siège sont **plus faibles** que dans les autres établissements. En effet, le siège est constitué uniquement de bureaux. Il est fermé et non accessible la nuit et une partie des week-ends. Ainsi, les durées d'activité annuelle des équipements varient entre 9% et 29%.

Concernant les équipements du siège, les variations de comportement peuvent expliquer la différence entre les durées d'activité des catégories d'ordinateurs. Le faible pourcentage d'activité au sein du siège des ultra-portables (9%) s'explique par le déplacement des collaborateurs. En effet, ces équipements sont destinés à des personnels à responsabilités, qui se déplacent beaucoup. Ainsi, leur présence physique dans l'enceinte du siège est plus faible que celle des personnels ayant des ordinateurs fixes (16%). Le taux d'utilisation plus important à leur poste de travail (29%) des ordinateurs portables pourrait s'expliquer par le fait que cette catégorie d'ordinateurs est attribuée à des personnes ayant des responsabilités et se déplaçant mais, dont la présence au siège est plus importante.

Pour les deux catégories d'imprimantes présentes au siège, la différence principale réside dans le fait que les imprimantes grand modèle (MFP) sont éteintes près de la moitié du temps alors que les petites imprimantes ne le sont jamais. En effet, les MFP possèdent un système de programmation qui permet d'éteindre l'équipement si ce dernier n'est pas occupé durant une certaine période de temps. Lors de la réalisation des mesures la programmation était fixée à 4h. De plus, les deux catégories n'ont pas les mêmes fonctionnalités (imprimante d'une part et imprimante / scanner / photocopieur d'autre part). Cette diversité d'utilisation peut expliquer que les MFP soient plus souvent sollicitées (26%) que les petites imprimantes (14%), alors que ces deux catégories d'imprimantes sont en réseau sur le site.

Les équipements informatiques présents dans les data-centres étant en fonctionnement en continu, le graphique correspondant n'est pas présenté.

- **Les déchets**

Une grande part des équipements informatiques du groupe Casino est louée. Ainsi, le loueur récupère le matériel en fin de contrat. CASINO IT a donc peu de visibilité et de leviers d'actions sur le devenir de ces équipements. Cependant, dans le cadre d'une évaluation environnementale globale, il est indispensable d'identifier les proportions de matériels démantelés / recyclés, ceux qui sont réutilisés dans d'autres sociétés voire ceux qui sont envoyés en centre d'enfouissement technique, par exemple. Ainsi, des estimations indiquant la quantité (en tonnes/an) et un pourcentage

d'équipements retraités et réutilisés peuvent être intégrées dans le tableau de bord. Cependant, ces données n'ont pu être obtenues et ne sont donc pas incorporées actuellement dans le tableau de bord. Seule la quantité de déchets produite par chaque branche a été renseignée, les résultats sont présentés dans la Figure 41.

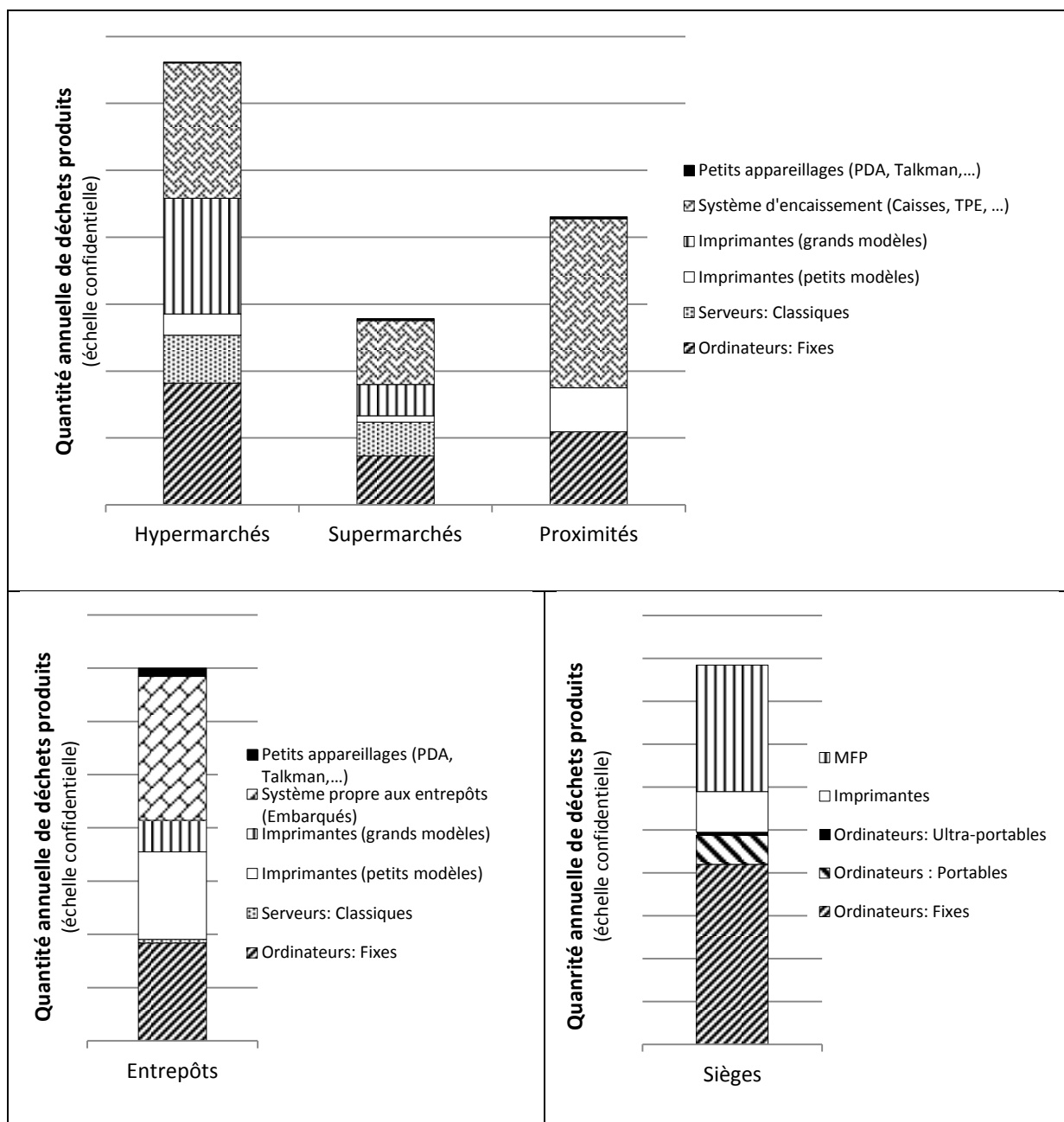


Figure 41 : Répartition massique de la quantité de déchets produits par catégorie d'établissements et par catégorie d'équipements

Les systèmes d'encaissement représentent la catégorie la plus génératrice de déchets pour les magasins (branches Hypermarché, Supermarché et Proximité confondues). Pour la branche entrepôts, les embarqués constituent la majorité des déchets informatiques ($\pm 40\%$). Les ordinateurs et les imprimantes (petits modèles) contribuent respectivement à 26% et 24% de la quantité de déchets. Les équipements du siège se décomposent en deux grandes catégories : les ordinateurs (fixes, portables et ultra-portables) et les imprimantes (petits modèles et MFP). Ces deux catégories

représentent respectivement 56% et 44% des déchets issus des équipements informatiques. Le poids unitaire et la quantité des ordinateurs fixes étant plus importants que pour les autres catégories d'ordinateurs, la quantité de déchets de cette catégorie est plus importante. Il en va de même pour les imprimantes MFP (*Multi Function Printer*) qui sont unitairement très lourdes (poids moyen \pm 180 kg) par rapport aux autres imprimantes (poids moyen \pm 29kg).

La Figure 42 montre que les gros équipements sont peu nombreux dans les data-centres. Cela explique que la répartition des déchets est en inadéquation avec le nombre de chacun des équipements. En effet, les serveurs classiques sont les plus nombreux (48 % de la quantité des équipements) mais ils ne produisent que la troisième plus grande quantité de déchets après les gros systèmes (22% de la quantité des équipements) et les baies de stockage (20%).

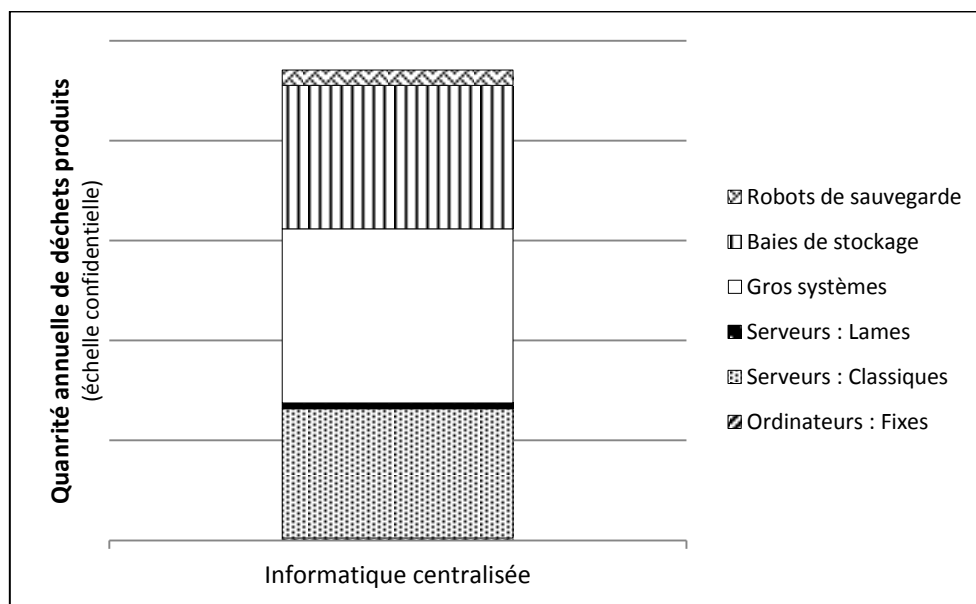


Figure 42 : Répartition massique de la quantité de déchets produits par catégorie d'équipements pour l'informatique centralisée

1.3.2 Impacts environnementaux

Lors de la réalisation de cette première étude, seul l'impact émissions de gaz à effet de serre a été présenté au commanditaire. Ainsi, bien que plusieurs indicateurs environnementaux agrégés aient été estimés dans le tableau de bord, l'expression en tonne équivalent CO₂ a été privilégiée dans un premier temps. Ce choix se justifie par le déploiement du Bilan Carbone® au sein du groupe Casino mais aussi par l'accessibilité des données.

Le guide des facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME donne deux types de coefficients : des coefficients calculés pour les équipements les plus courants (ordinateurs, imprimantes) et une méthode fonction du coût permettant d'obtenir la quantité d'émissions de GES pour des équipements tels que les serveurs ou les robots. Cette dernière n'apparaît alors pas particulièrement adaptée aux équipements informatiques dont le coût n'est pas directement corrélé avec les émissions de GES [Larzabal, 2009]. Ainsi, des facteurs d'émissions spécifiques pour certaines catégories d'équipements (serveurs, systèmes d'encaissement, ...) ont été proposés à partir du guide des facteurs d'émissions de l'ADEME [ADEME, 2010] pour les émissions de GES ainsi que de la base de données Ecoinvent [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010] pour les autres impacts

environnementaux. Les coefficients d'émissions utilisés ainsi que les poids moyens des équipements et leurs durées d'amortissement sont mentionnés dans le Tableau 26. Les hypothèses permettant d'obtenir des coefficients d'émissions pour les équipements non abordés dans les bases de données sont également précisées.

Tableau 26 : Hypothèses de calculs et coefficients d'émissions utilisés dans l'étude

	Poids (en kg)	Hypothèses pour les coefficients d'émissions	Coefficients d'émissions		Durée d'amortissement (en années)
			kg C éq.	kg CO ₂ éq.*	
Ordinateur fixe	12,0	Coefficient donné dans le guide des facteurs d'émissions du Bilan Carbone [Guide FE v6.1 juin 2010]	350,6	609,7	3
Ordinateur portable	2,4	Hypothèse basée sur les émissions liées à la production d'un ordinateur fixe, au pro-rata du poids d'un ordinateur portable. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de portables présents.	67,8	248,0	3
Ordinateur ultra-portables	1,6	Hypothèse basée sur les émissions liées à la production d'un ordinateur fixe, au pro-rata du poids d'un ultra-portable. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles d'ultra-portables présents.	46,3	169,6	3
Imprimante	29,1	Coefficient donné dans le guide des facteurs d'émissions du Bilan Carbone [Guide FE v6.1 juin 2010] " <i>Pour les "petites imprimantes", Le "contenu en électronique" étant 5 à 6 fois inférieur et l'essentiel de la consommation d'énergie "résidant" dans l'électronique, nous prendrons, à titre conservatoire, un facteur d'émission 5 à 6 fois moindre, à savoir 30 kg équivalent carbone par unité.</i> "	30,0	109,8	3
MFP	179,7	Coefficient donné dans le guide des facteurs d'émissions du Bilan Carbone [Guide FE v6.1 juin 2010] " <i>Considérant que le matériel de reprographie n'est rien d'autre que du matériel informatique particulier et sur la base des résultats du § précédent, il ressort qu'un photocopieur a un facteur d'émission moyen de 800 kg équivalent carbone.</i> "	800,0	2 928,0	3
Serveurs	49,9	Facteur d'émission associé à une unité centrale (= 140 kg C éq), au pro-rata du poids par rapport à un serveur. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de serveurs présents.	580,7	2 125,4	5
Serveurs lames	4,6	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à un serveur lame. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de serveurs lame présents.	53,9	197,2	5
Systèmes d'encaissement	12,7	Une caisse est assimilable à l'unité centrale d'un ordinateur classique associée à un écran tactile. L'ensemble est plus petit mais l'écran étant tactile il est plus impactant qu'un écran classique d'ordinateur.	350,6	1 283,2	5
Balances	5,6	Assimilé à de petites imprimantes de part la taille et la complexité du système.	30,0	109,8	5
Petits appareillages	0,5	En réunissant les impacts des portables et de leurs chargeurs. Assimilé à de petites imprimantes de part la taille et la complexité du système.	30,0	109,8	5
Systèmes propres aux entrepôts (embarqués)	17,9	Un embarqué comporte une unité centrale, un écran, un clavier et une petite imprimante. Donc assimilable à un ordinateur + une imprimante (petit modèle).	380,6	1 393,0	5
Gros systèmes	967,7	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à un gros système. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de gros systèmes présents.	28 201,6	103 217,8	5
Baies de stockage	919,1	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à une baie de stockage. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de baies de stockage présents.	26 613,8	97 406,6	5
Robot de sauvegarde	1954,0	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à un robot de sauvegarde. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles d'un robot de sauvegarde présents.	56 947,0	208 426,0	5

* 1 kg C éq. = 3,67 kg CO₂ éq.

De plus, pour la phase d'utilisation des équipements, il est nécessaire d'employer un coefficient d'émissions pour l'électricité consommée. Ainsi, de manière à être cohérent avec la réalisation du Bilan Carbone® de Casino, le coefficient de 0,023 kg C éq. a été retenu pour la consommation de 1 kWh d'électricité (coefficient établi pour la France dans la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME) [ADEME, 2010].

La Figure 43 présente les résultats correspondant à l'expression de l'amortissement des équipements en tonnes équivalent CO₂ pour chaque catégorie d'équipements et ce pour les différentes branches considérées en informatique distribuée. Pour mémoire, l'amortissement correspond à la phase de production. Ces résultats sont présentés sans mentionner les valeurs en ordonnée pour des raisons de confidentialité.

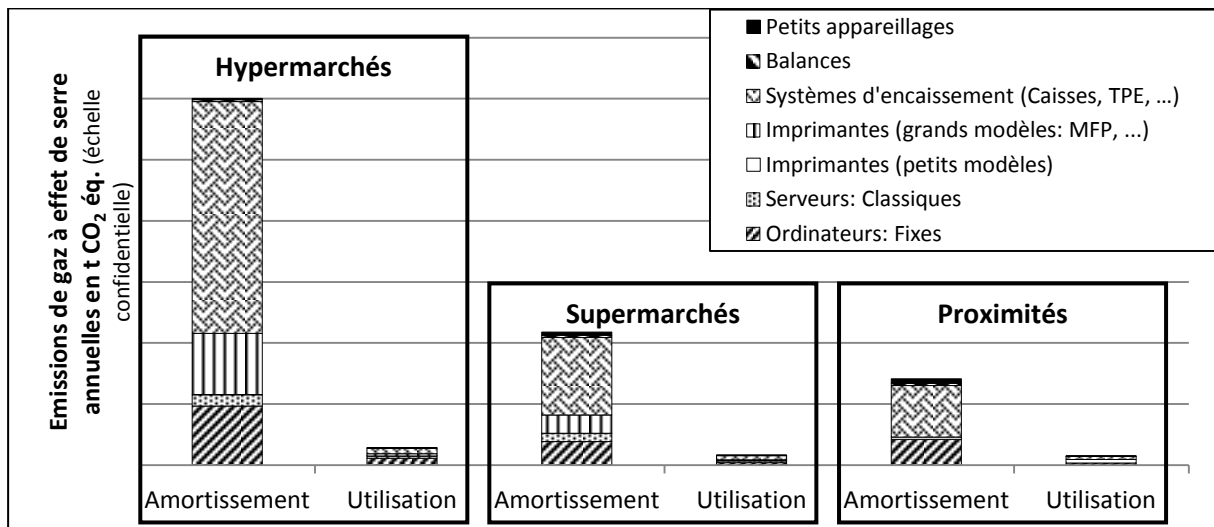


Figure 43: Emissions annuelles de gaz à effet de serre en t CO₂ éq. par catégorie d'équipements et par établissements (hypermarchés, supermarchés et magasins de proximité)

La Figure 43 montre que les systèmes d'encaissement représentent la catégorie d'équipements émettant le plus de gaz à effet de serre lors de la phase de fabrication. Ce résultat est à mettre en perspectives avec la quantité d'équipements dont plus de 40% correspondent aux systèmes d'encaissement (catégorie la plus importante en informatique distribuée, voir Figure 32).

Pour les entrepôts, les quantités de CO₂ issues de l'amortissement des ordinateurs et des « embarqués » sont proches, respectivement 41 et 39 % des émissions totales liées à l'amortissement des équipements en entrepôts (Figure 44a).

Pour le siège (Figure 44b), c'est la fabrication des ordinateurs fixes qui génère le plus d'émissions de gaz à effet de serre (74%). Les autres catégories d'ordinateurs ayant des parts moindres : 11% pour les ordinateurs portables et 1,2% pour les ultra-portables. Les imprimantes et les MFP contribuent aux émissions de CO₂ à hauteur de 0,6 et 13% des émissions d'équipements du siège.

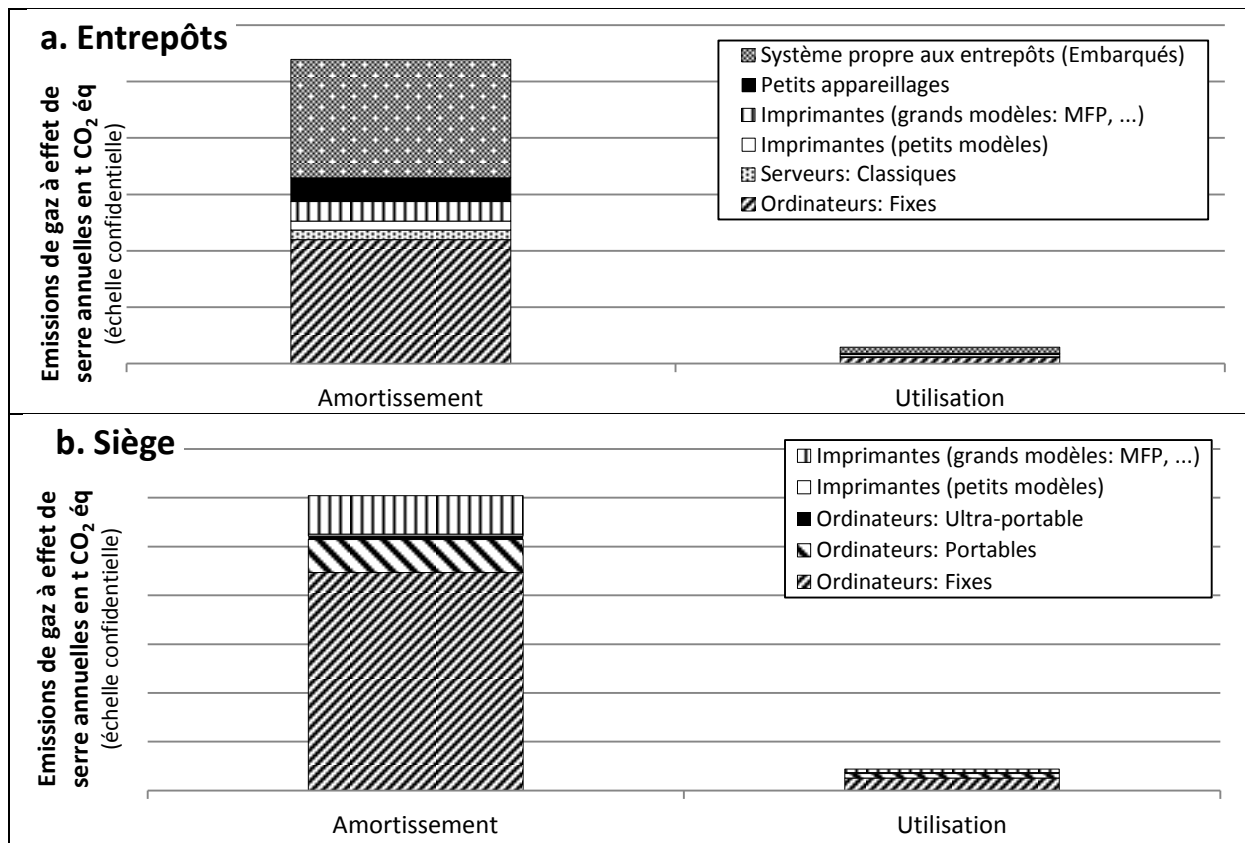


Figure 44 : Expressions annuelles des émissions de gaz à effet par catégorie d'équipements pour les entrepôts et le siège

Les émissions pour la phase utilisation sont estimées proportionnellement à la consommation électrique de chaque catégorie d'équipements. Pour l'informatique centralisée (Figure 45), les émissions liées au système de climatisation ont été intégrées. En effet, la climatisation entièrement dédiée aux équipements informatiques est indispensable à leur bon fonctionnement. Ces émissions ne sont pas négligeables et représentent à elles seules l'équivalent de la partie utilisation de l'ensemble des équipements. En effet, pour chaque Wh consommé en électricité pour les équipements informatiques, 1 Wh est consommé pour la climatisation.

Les résultats diffèrent beaucoup d'une branche à l'autre mais les émissions de CO₂ liées à l'utilisation restent toujours inférieures aux émissions liées à l'amortissement.

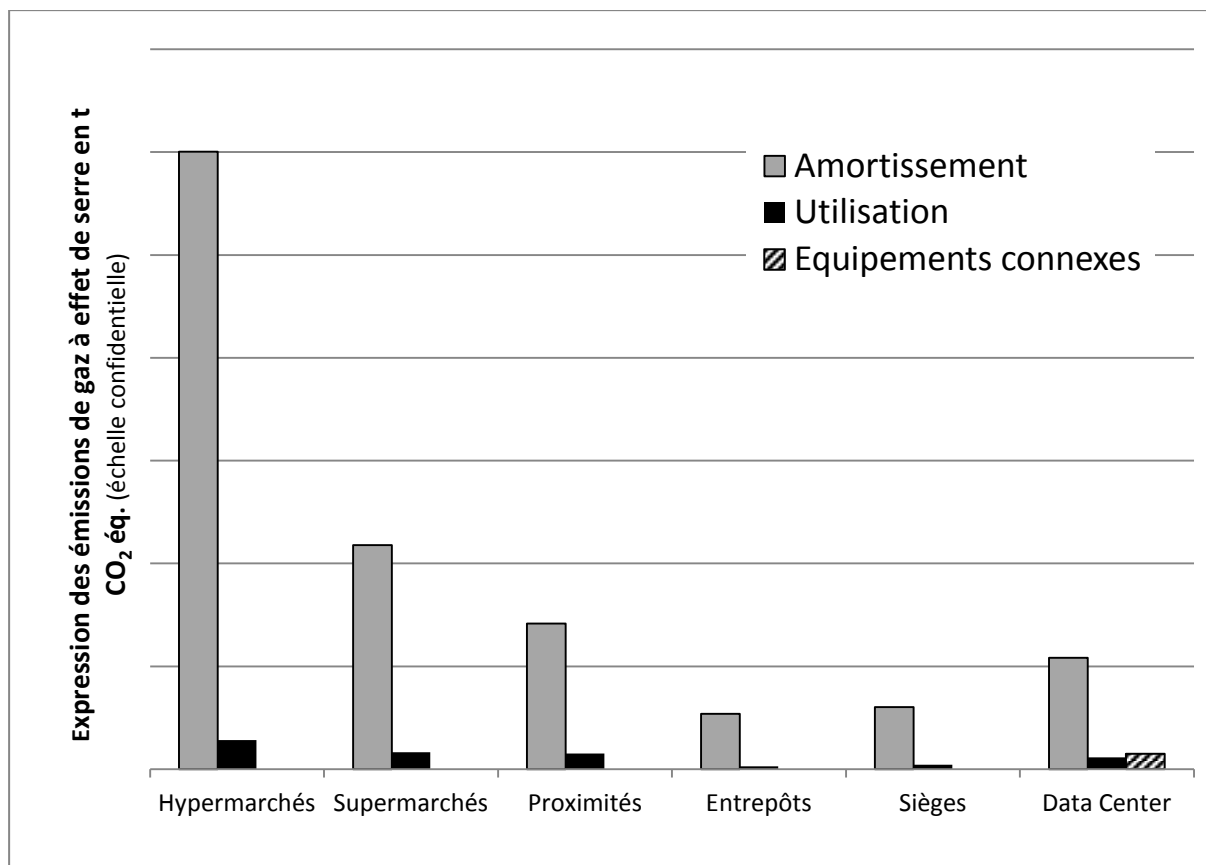


Figure 45: Expression des émissions annuelles en gaz à effet de serre pour l'ensemble des établissements

Les résultats présentés dans le tableau de bord environnemental, dont un extrait a été présenté ici, permettent d'évaluer les consommations énergétiques et les émissions de GES de l'activité informatique du groupe Casino selon différents paramètres. Cette estimation, réalisée à partir de l'inventaire du matériel, de mesures de consommations *in-situ* et de facteurs d'émissions issus de la littérature, constitue un état des lieux de la situation actuelle.

Parallèlement à cet état des lieux, un inventaire des bonnes pratiques pouvant être mises en place dans le domaine de la gestion de parc informatique a été réalisé. De cet inventaire, ont été identifiées des pratiques qui pouvaient s'avérer particulièrement pertinentes dans le cas de CASINO IT. Les gains environnementaux pouvant être apportés par ces pratiques ont ensuite pu être estimés en fonction de la situation actuelle. La description de ces bonnes pratiques et le chiffrage du gain environnemental constituent l'étape suivante de la méthodologie.

1.4 Etape 5 : Evaluation des gains

L'étape d'évaluation des gains est divisée en trois temps : (1) **identification des améliorations** possibles par la recherche de bonnes pratiques dans le secteur ; (2) **chiffrage de ces améliorations** par la réalisation de divers calculs permettant d'estimer les gains réalisables lors de l'application des solutions identifiées et enfin (3) **comparaison de ces améliorations** afin de classer les actions selon l'estimation des gains environnementaux et financiers et ainsi aider le décideur dans ses choix (Figure 46).

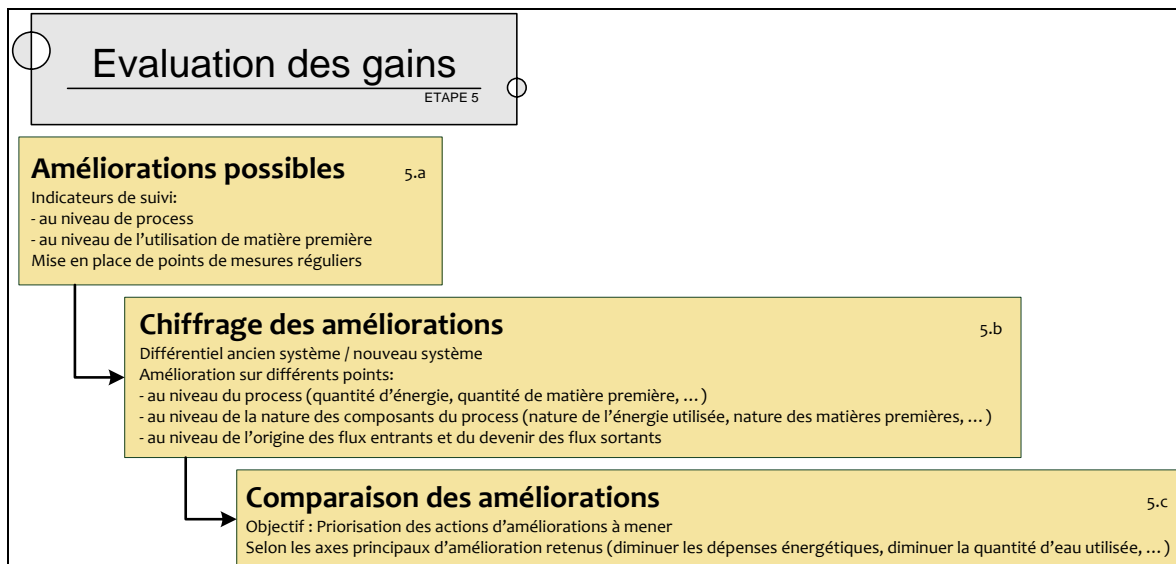


Figure 46: Détail de l'étape « Evaluation des gains »

1.4.1 Améliorations possibles

Les recherches bibliographiques ont permis d'identifier des bonnes pratiques pouvant être appliquées dans le secteur [Commission Européenne, 2008] [Larzabal, 2009]. Ainsi, les bonnes pratiques ont été analysées et confrontées à la situation actuelle au sein du groupe Casino. Certaines solutions se sont alors révélées incompatibles avec des choix réalisés antérieurement (lors de l'installation des équipements par exemple). Néanmoins, huit actions ont été retenues et font l'objet d'un chiffrage (présenté dans le paragraphe 1.4.2.). Cette phase du projet a été réalisée en partenariat avec le laboratoire OMSI de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, laboratoire spécialisé en génie industriel.

Les actions retenues sont les suivantes :

- **Action Serveur (centralisé) :** Remplacement de serveurs par des serveurs de nouvelle génération (labellisés Energy star ou équivalent) sur les périmètres DATA CENTER et ENTREPOTS
L'action consiste à remplacer 4 serveurs de plus de 4 ans par 1 serveur de nouvelle génération ayant une consommation électrique équivalente à celle d'un ancien serveur.
- **Action Serveur (distribué) :** Remplacement de serveurs par des serveurs de nouvelle génération (labellisés Energy star ou équivalent) sur le périmètre INFORMATIQUE DISTRIBUEE
L'action consiste à remplacer 2 serveurs de plus de 4 ans par 1 serveur de nouvelle génération ayant une consommation électrique équivalente à celle d'un ancien serveur.
- **Action Gestion de charge :** Utiliser des logiciels de gestion de la charge informatique permettant une diminution de la consommation électrique en basculant un serveur du mode « veille » en mode « arrêt ».
- **Action Extinction :** Eteindre les équipements inutilisés
L'action consiste à limiter l'existence de longue période où les ordinateurs sont en mode « veille » en les arrêtant.
- **Action Virtualisation :** Utiliser la virtualisation qui consiste à opérer un transfert dynamique de 4 serveurs sur un seul serveur physique avec passage dynamique en mode arrêt des serveurs non utilisés.

- **Action Client léger renouvellement :** Partager les ressources des applications peu utilisées. L'action consiste à remplacer 50 ordinateurs fixes par des terminaux légers accompagnés d'un serveur (localisé en informatique centralisée). Ce scénario sera comparé à une situation où les 50 ordinateurs auraient été remplacés (en fin de bail) par 50 ordinateurs labellisés Energy Star ou équivalent.
- **Action Client léger prolongation :** Partager les ressources des applications peu utilisées. L'action consiste à prolonger la durée de vie de 50 ordinateurs en les transformant en clients légers. Pour réaliser cette transformation, les ordinateurs devront être reconfigurés et une connexion à un serveur supplémentaire ajouté en informatique centralisée devra être établie. L'objectif d'une telle action est de prolonger la durée de vie des équipements présents en limitant les inconvénients liés à l'obsolescence des équipements. Comme pour l'action précédente, cette action sera comparée à un scénario où les 50 ordinateurs auraient été remplacés (en fin de bail) par 50 ordinateurs labellisés Energy Star ou équivalent.
- **Action Prolongation :** Gérer les équipements existants en prolongeant leur durée de vie de 3 ans. Pour cela, une mise à jour logicielle et / ou matérielle sera alors nécessaire. Comme pour les actions précédentes, cette action sera comparée à un scénario où les ordinateurs sont remplacés (en fin de bail) par du matériel labellisé Energy Star ou équivalent.
- **Action Rationalisation :** Rationaliser les applications sur les serveurs en informatique centralisée par l'utilisation de démarche telle que ITIL (*Information Technology Infrastructure Library*). Les résultats attendus devraient aboutir à une diminution de besoin en matériel et donc de la consommation d'électricité en informatique centralisée notamment. De même, une réduction des coûts concernant la maintenance des applicatifs pourra alors être envisagée. Les gains seront calculés en réalisant le pourcentage d'applications économisées sur la consommation annuelle d'un serveur ainsi que sur ses coûts de maintenance.

1.4.2 Chiffrage des améliorations : Méthodes de calculs et hypothèses

Le chiffrage des améliorations est basé sur une évaluation des actions retenues à la fois en termes environnementaux qu'économiques. Dans un premier temps l'impact sur les émissions de GES a été estimé, par conséquent, l'expression des gains environnementaux se basera sur cet indicateur et tentera d'estimer la quantité d'émissions de GES évitée par la mise en place d'une action d'optimisation.

Deux indicateurs peuvent être établis pour exprimer les gains environnementaux :

- **le Gain en émissions de GES :**
Définition : expression des émissions de GES liées à la mise en place de l'action choisie
Unité : t éq. CO₂ / action
- **l'Efficiences carbone :**
Définition : réalisation d'un calcul d'éco-efficience, représentant le gain en émission de GES par rapport au coût financier de la mise en œuvre de l'action
Unité : t éq. CO₂ évité / k€ investi

De plus, il est également important d'avoir un troisième indicateur pour décider d'une solution à appliquer :

- **Durée de retour sur investissement**

Définition : temps nécessaire pour que les coûts engendrés par la mise en œuvre d'une solution soient compensés par les économies réalisées par la mise en place de cette solution

Unité : année

Pour le volet économique, les solutions retenues feront l'objet d'un calcul de retour sur investissement (ROI : *Return on investment*). Ce calcul permet de tenir compte de l'amortissement des équipements en divisant la somme des économies financières réalisées sur la durée de vie de la solution par le coût d'investissement de mise en œuvre de cette solution.

Le détail des calculs est donné par les équations mentionnées au § 2.5.3 relatif aux méthodes des calculs (Équation 26, Équation 27 et Équation 29).

Rappel :

$$G_{Ea} = \sum_{i=1}^d I_{a(situation\ initiale)} - \sum_{i=1}^d I_{a(situation\ 1)} \quad \text{Équation 26}$$

Avec :

- G_{Ea} = Gain environnemental potentiel pour l'impact environnemental a
- d = durée sur laquelle les calculs sont réalisés (en années)
- $I_{a(situation\ initiale)}$ = Impact environnemental a de la situation initiale
- $I_{a(situation\ 1)}$ = Impact environnemental a lors de l'application de la situation 1

Si $G_E > 0$ alors la situation 1 a un impact environnemental moindre que la situation initiale. Il s'agit donc bien d'un gain si la solution 1 est mise en application.

En revanche, si $G_E < 0$ alors la situation 1 a un impact environnemental plus important que la situation initiale. La solution proposée n'est donc pas une solution d'optimisation du système et ne peut pas être retenue dans le cadre d'une optimisation du système.

$$Coût\ (\text{€}) = Coût_{(situation\ initiale)} - Coût_{(situation\ 1)} \quad \text{Équation 27}$$

Avec :

- Coût (€) = le coût financier potentiel de l'application de la solution 1
- $Coût_{(situation\ initiale)}$ = coût financier de fonctionnement de la situation initiale
- $Coût_{(situation\ 1)}$ = coût financier de fonctionnement de la situation 1

Avec la même logique que pour l'Équation 26, si coût (€) > 0 alors la situation 1 a un coût financier moindre que la situation initiale. Il s'agit donc bien d'un gain si la solution 1 est mise en application.

En revanche, si coût (€) < 0 alors la situation 1 a un coût financier plus important que la situation initiale.

$$EcoEff = \frac{\sum G_E}{\sum Coût\ (\text{€})} \quad \text{Équation 29}$$

Avec :

- EcoEff = Eco Efficience
- $\sum G_E$ = Somme des gains environnementaux
- $\sum Coût\ (\text{€})$ = Somme des coûts financiers (exprimés en euros)

De plus, pour réaliser l'ensemble des calculs, des hypothèses communes aux différentes actions d'amélioration sont établies (Tableau 27). Il s'agit :

- du taux d'augmentation annuel du coût du kWh d'électricité : 5 % par an sur 5 ans
- du facteur d'émission du kWh en France : 0,084 kg éq. CO₂ (Coefficient donné par la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME), stable sur 5 ans.
Le coefficient retenu est celui du kWh français afin d'être cohérent avec le Bilan Carbone® réalisé par le groupe Casino.
- la durée d'amortissement des équipements (Information fournie par le groupe Casino) : 5 ans pour les équipements présents en informatique centralisée, 3 ans pour le reste des équipements (ordinateurs, serveurs, imprimantes, ...)

- à titre indicatif, il a également été décidé de prendre en compte la mise en place de la contribution climat-énergie (plus connue sous le nom de « taxe carbone ») dans les calculs en termes financiers. Bien qu'elle ait été retirée depuis, son application était d'actualité lors du début du projet et il a été choisi de la conserver dans les calculs. Avant son retrait, son coût avait été estimé entre 2010 et 2014 : de 32 à 37 €/T de CO₂. Néanmoins, le coût de la taxe carbone a été introduit dans les tableaux uniquement pour information. En effet, l'assiette de la taxe évoquée en 2009 ne portait pas sur l'électricité consommée.

Toutes ces hypothèses sont paramétrables dans un tableau de calcul Excel® (Tableau 27) qui est fourni avec le tableau de bord environnemental.

Tableau 27 : Hypothèses de calcul communes aux différentes actions

Coût du kWh année 1	0,05 €				
Taux d'augmentation par an du coût d'électricité	5 %				
Facteur d'émission du kWh	0,084 (kg CO ₂ éq.)				
Durée d'utilisation	5 ans				
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Coût du kWh (€)	0,050	0,053	0,055	0,058	0,061
Coût de la taxe carbone (€ / tonne de CO ₂)	32	33	35	36	37

Dans, le tableau de bord environnemental, chacune des solutions proposées a fait l'objet de calculs afin de déterminer les gains environnementaux et économiques réalisables. Chaque action est présentée sous la forme d'une fiche (comme présenté dans la Figure 47) permettant le détail des calculs sur les cinq années à venir. Ces calculs tiennent compte des hypothèses établies dans le Tableau 27.

Solution : "Remplacement de 50 PC par 50 terminaux légers + 1 serveur en Data Center" par rapport à "Remplacement de 50 PC par 50 PC Energy Star"					
Consommation annuelle d'un serveur classique (KWh)	3 008				
Consommation annuelle d'un PC (KWh)	482				
Consommation annuelle d'un PC Energy Star (KWh)	307				
Consommation annuelle d'un client léger (KWh)	44				
Coûts de Fonctionnement	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Gain en consommation annuelle (KWh)	-16 148	-16 148	-16 148	-16 148	-16 148
Gain en consommation annuelle avec PUE sur serveur (KWh)	-19 156	-19 156	-19 156	-19 156	-19 156
Gain annuel en électricité (€)	-958	-1 006	-1 056	-1 109	-1 164
Gain en émissions liées à la consommation électrique (T eq CO ₂ par an)	-1,615	-1,615	-1,615	-1,615	-1,615
Cout d'achat et de mise en place (€)	24 000 (1 serveur + 50 terminaux légers)				
Achats évités de 50 PC Energy Star	-40 000				
Emissions liées à la fabrication du serveur (T eq CO ₂)	2,438				
Emissions liées à la fabrication de 50 clients légers (T eq CO ₂)	14,67				
Emissions évitées par la non fabrication de 50 PC Energy Star (T eq CO ₂)	-29,33				
Coûts d'investissement	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Amortissement annuel de coûts d'achat et de mise en place	-3 200	-3 200	-3 200	-3 200	-3 200
Amortissement annuel des émissions (T eq CO ₂ par an)	-2,446	-2,446	-2,446	-2,446	-2,446
Bilan	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Emissions (T eq CO ₂ par an)	0,830	0,830	0,830	0,830	0,830
Gain liés à la taxe carbone pour info non pris en compte dans le bilan (€)	27	28	29	30	31
Bilan Financier (€)	2 242	2 194	2 144	2 091	2 036
Tableau de bord de l'action sur la durée d'utilisation					
Gains de consommation électrique (KWh)	-95 780				
Gain sur facture d'électricité (€)	-5 292				
Gain en émission CO ₂ (T eq CO ₂)	4,151				
Efficiency Carbone (T eq. CO ₂ par K€ d'investissement)	0,17				
Bilan financier	10 708				
ROI financier	45%				

Figure 47 : Fiche concernant l'action "Client léger renouvellement"

Exemple de fiche action élaborée pour chiffrer les gains réalisables, la Figure 47 permet de visualiser les coûts et les économies financières potentielles ainsi que les émissions de GES évitées suite à l'application de l'action. Les calculs sont réalisés pour les cinq années futures et sont centralisés dans la partie basse de la figure afin de visualiser rapidement les gains réalisables sur la totalité des cinq années. Pour des raisons de simplification des calculs et pour améliorer la compréhension, les gains exprimés négativement correspondent à une économie et les gains positifs à une dépense ou une émission supplémentaire.

1.4.3 Comparaison des possibilités d'amélioration : Eco-efficience

Après l'identification des possibilités d'amélioration et le chiffrage des gains pouvant être réalisés lors de leur application sur le périmètre étudié, la dernière étape de la méthodologie consiste à établir une comparaison de ces actions afin d'aider le décideur dans ses choix.

Pour cela, les différents gains calculés lors de l'étape précédente vont être croisés et exprimés visuellement pour apporter une meilleure compréhension. L'indicateur d'éco-efficience est alors utilisé pour permettre la comparaison des solutions les unes aux autres en fonction à la fois d'un axe environnemental ainsi que d'un axe financier.

- **Comparaison des actions en termes environnementaux et économiques**

Dans un premier temps, les calculs ont été réalisés pour la mise en œuvre d'une action. Puis, dans un second temps, il a été analysé le nombre de fois où l'action pouvait être appliquée sur l'ensemble du périmètre d'étude donc en fonction du nombre d'établissements et du nombre d'équipements concernés. Ainsi, sont rendus compte l'applicabilité des actions envisagées ainsi que des gains pouvant être réalisés, tant sur le plan environnemental qu'économique.

Tout d'abord, les actions peuvent être comparées sur le plan des économies qu'elles peuvent générer au niveau de la consommation électrique (Figure 48).

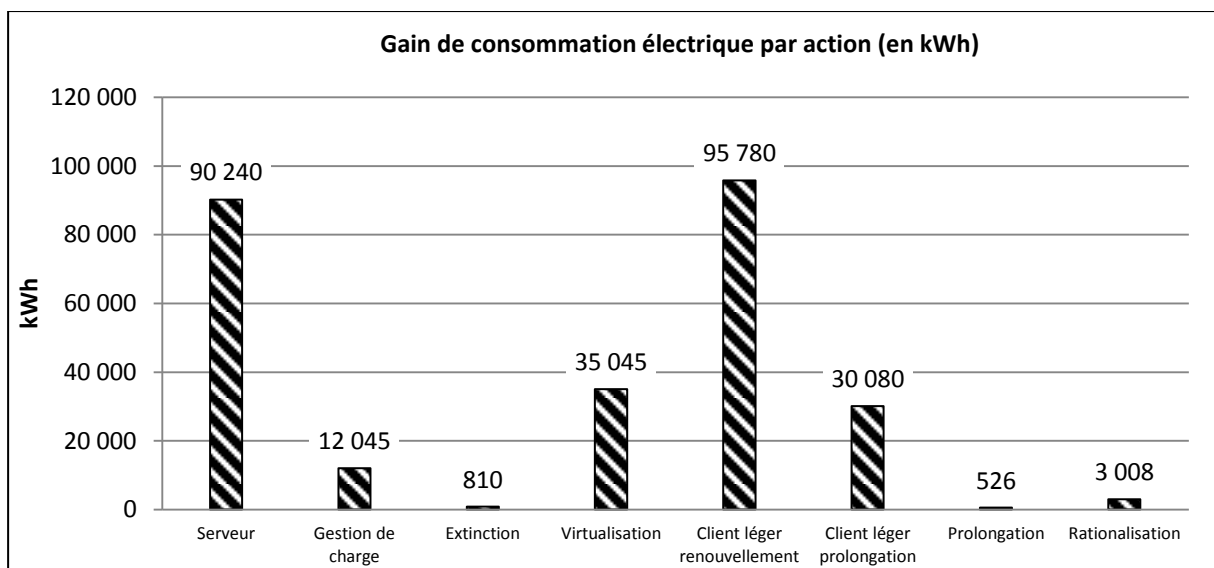


Figure 48 : Economie d'électricité (en kWh) pour chaque action d'amélioration

En considérant les kWh évités, les actions « client léger renouvellement » et « serveur » semblent les plus pertinentes. Ces deux actions permettent respectivement des économies de 95 780 et 90 240 kWh. L'action « virtualisation » permettrait d'économiser 35 045 kWh et l'action « client léger prolongation » une économie de 30 080 kWh.

Sur le plan environnemental, les calculs tiennent compte à la fois de la différence de consommation électrique des équipements nécessaires ainsi que des émissions liées à la fabrication des équipements acquis pour la mise en place de la nouvelle situation. Les résultats sont présentés dans la Figure 49.

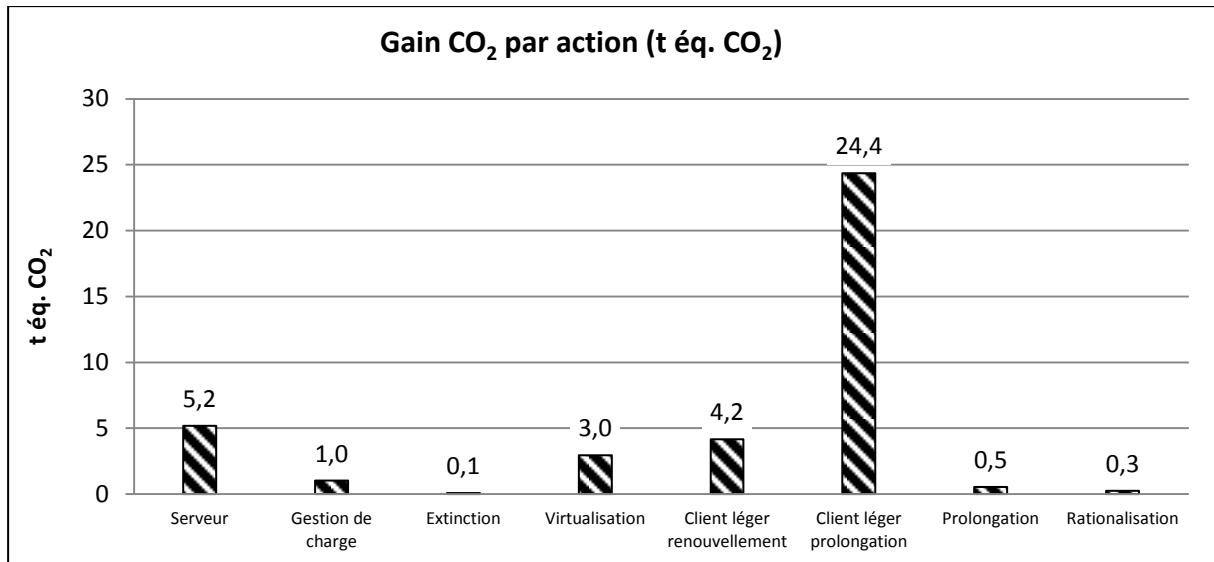


Figure 49: Gains environnementaux (exprimés en t eq. CO₂) pour chaque action

L'action « client léger prolongation » se distingue nettement et apparaît comme l'action permettant de réduire le plus les émissions de GES avec une économie de 24,4 t eq. CO₂ dans les cinq années à venir. L'autre action relative aux clients légers (« client léger renouvellement ») permettrait une réduction des émissions de GES de 4,2 t eq. CO₂. L'action « serveur » permet une économie de 5,2 t eq. CO₂ et l'action « virtualisation » économise 3 t eq. CO₂. Les actions « gestion de charge, extinction, prolongation et rationalisation » génèrent de faible gain d'émission de GES, avec une économie maximale de 1 t eq. CO₂.

Les actions peuvent être très différentes de nature et engendrer des gains environnementaux. La comparaison de leur coût peut être difficile. En revanche, un calcul de durée de retour sur investissement permet d'exprimer le temps nécessaire pour récupérer l'argent investi dans la mise en place de cette nouvelle solution.

Pour tenir compte des évolutions de coût de l'énergie, les gains économiques de chaque action ont été calculés pour les cinq prochaines années. Le calcul de la durée de retour sur investissement, explicité dans l'Équation 28, prend en considération ce paramètre.

Rappel :

$$D_{ROI} = \frac{\text{Coût d'investissement (€)}}{\text{Gain (€)}} \quad \text{Équation 28}$$

Avec :

- D_{ROI} = Durée de retour sur investissement
- *Coût d'investissement (€)* = Coût financier lié à la mise en place de la solution (exprimé en euros)
- *Gain (€)* = économie financière réalisée avec la mise en place de la solution par rapport à la situation existante (exprimé en euros)

Les résultats des calculs sont présentés dans la Figure 50.

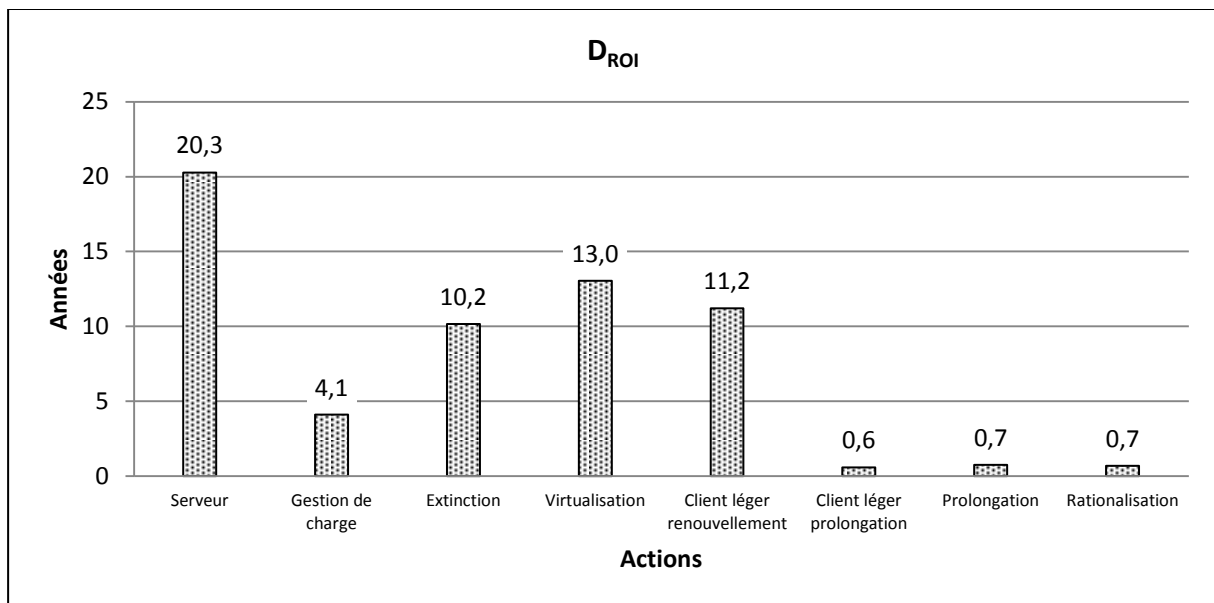


Figure 50: Durée de retour sur investissement (exprimée en années) pour chaque action d'amélioration

Les actions « client léger prolongation, prolongation et rationalisation » possèdent la durée de retour sur investissement la plus courte soit moins d'un an. La durée de ROI pour l'action « gestion de charge » est de 4 ans et de 10 ans pour l'action « extinction ». Les actions « client léger renouvellement » et « virtualisation » sont rentabilisées en respectivement 11 et 13 ans alors que l'action « serveur » obtient la durée de ROI la plus longue avec plus de 20 ans.

Les résultats précédents, permettent de déduire une « efficacité carbone » (Figure 51). Cette dernière permet de mettre en évidence, à l'aide d'un indicateur unique quelle est l'action qui permet d'éviter un maximum d'émissions de CO₂ tout en minimisant les coûts pour la mettre en place.

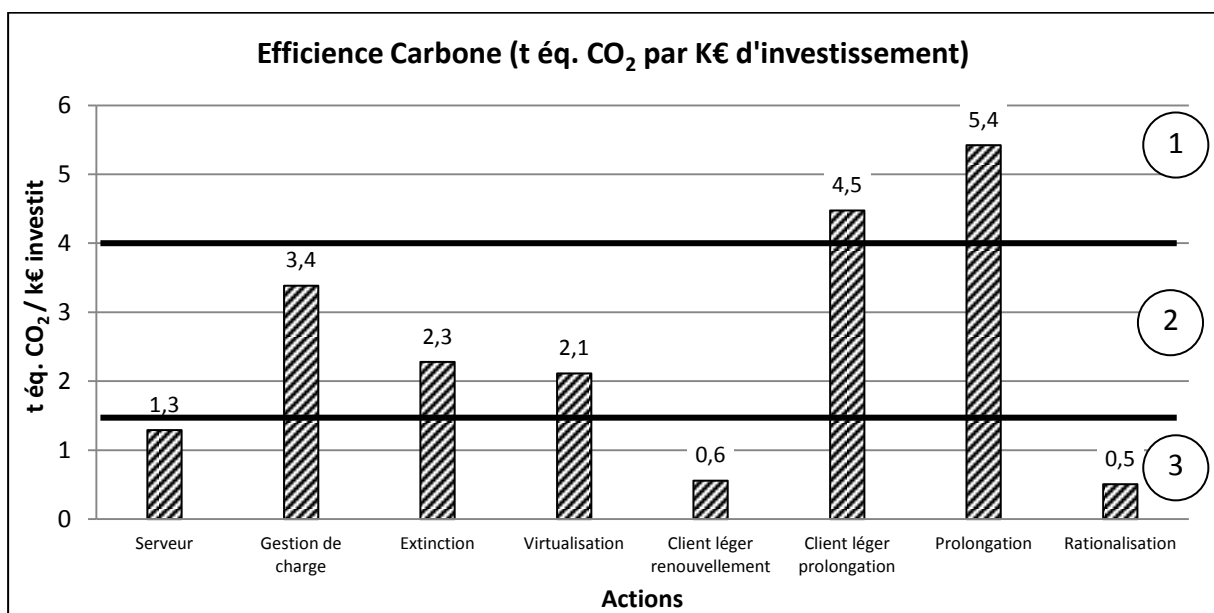


Figure 51: Efficacité carbone (en t éq. CO₂ économisées par K€ d'investissement) calculée pour chaque action d'amélioration

A la vue des résultats de notre étude, trois groupes d'actions peuvent être identifiés (Figure 51). Des actions ayant une forte efficacité carbone (classe 1) telles que les actions « client léger prolongation » et « prolongation » qu'il semble pertinent de mettre en place. Les actions « gestion de charge, extinction et virtualisation » ayant une efficacité carbone moyenne (classe 2) et enfin les actions *a priori* non prioritaires telles que les actions « serveur, client léger renouvellement et rationalisation » avec une efficacité carbone faible (classe 3).

Mais avant de conseiller l'application d'une action plutôt qu'une autre, il est nécessaire de connaître le gain possible en considérant le nombre de fois où l'action peut être appliquée. Il faut ainsi tenir compte du périmètre de l'applicabilité de la solution à l'ensemble des établissements.

- **Comparaison des gains totaux en T eq CO₂ de chaque action selon le périmètre**

La Figure 52 permet de comparer (en termes de réductions de GES) les impacts des différentes actions sur chaque périmètre d'application.

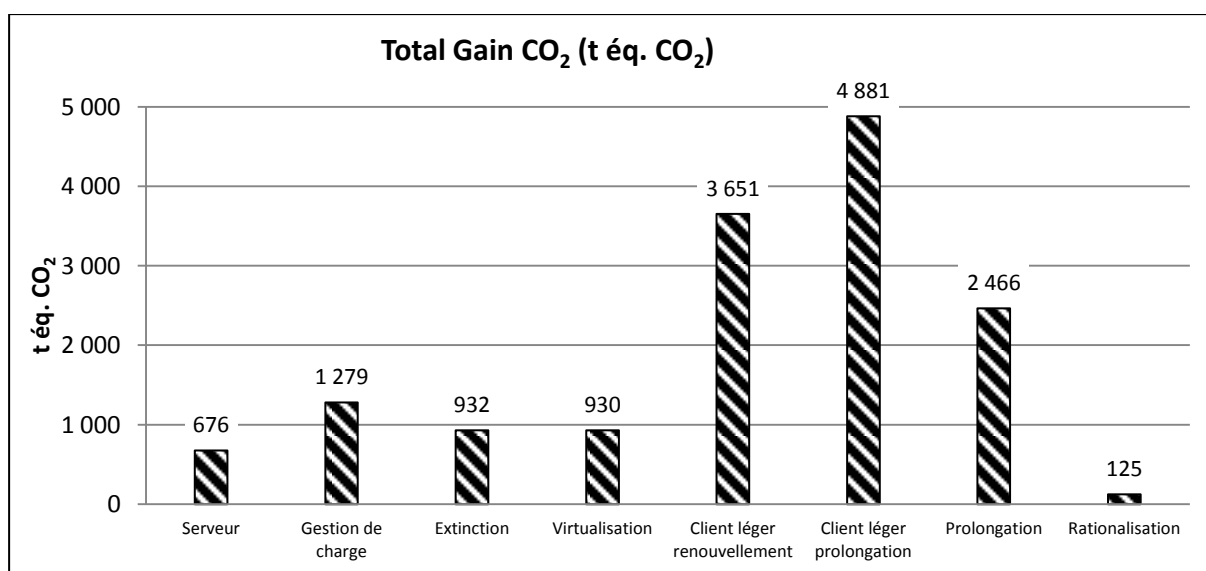


Figure 52: Gain maximum (en t eq. CO₂) de chaque action appliquée au périmètre d'étude

Parmi les actions retenues précédemment, les actions « client léger prolongation » et « prolongation » sont dans le peloton de tête en termes de réduction de GES. L'action « client léger renouvellement » semble intéressante également.

- **Comparaison combinée des indicateurs environnementaux, financiers et des volumes de réduction de GES par périmètre**

La Figure 53 et la Figure 54 permettent de rendre compte à la fois du retour sur investissement des actions envisagées et des possibilités de réduction des impacts environnementaux liées à leur application. Pour cela, l'efficacité carbone calculée précédemment et la durée de retour sur investissement sont mentionnées sur le même graphique.

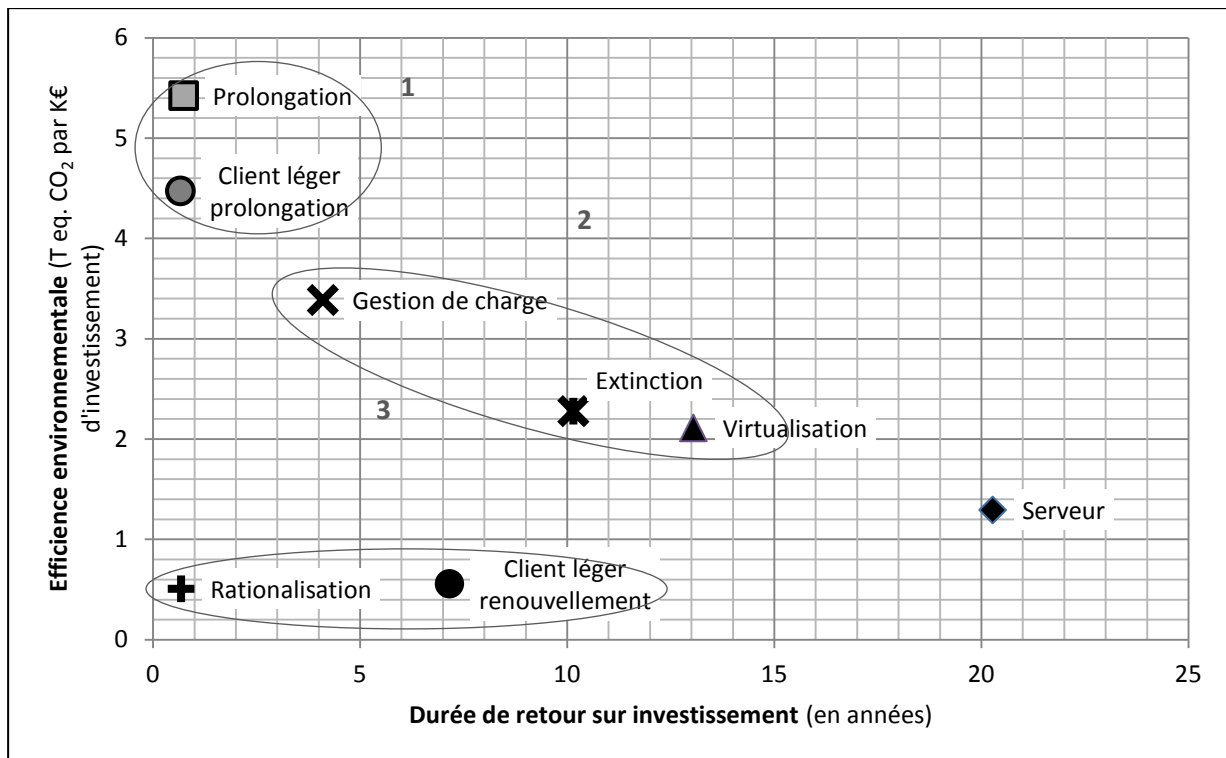


Figure 53: Synthèse des actions (inspiré de [ENSM-SE, 2010])

Pour rendre ce graphique pédagogique, il a été décidé de faire mention de la quantité de CO₂ équivalent évitée et des établissements concernés par l'utilisation de diagrammes en secteurs. Le diamètre du cercle représente la quantité d'émissions de CO₂ équivalent évitée lors de la mise en place de l'action et les portions du cercle représentent la part de chaque catégorie d'établissement dans les émissions évitées. La Figure 54 permet ainsi de distinguer rapidement l'efficacité carbone et le retour sur investissement d'une action ainsi que le périmètre concerné (les établissements) et la quantité de CO₂ équivalent évitée.

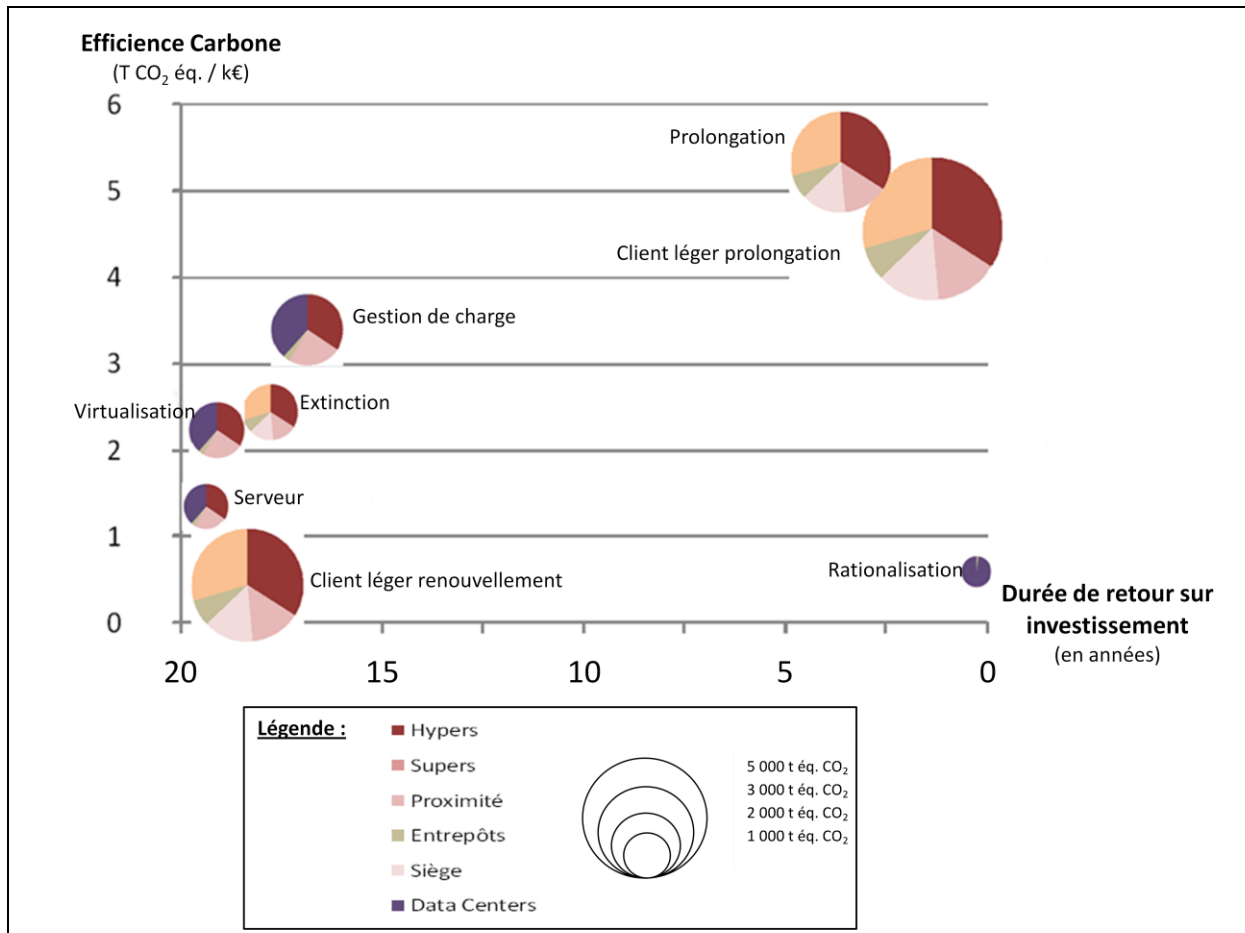


Figure 54 : Synthèse des actions en fonction de l'efficacité carbone et de la durée de retour sur investissement [ENSM-SE, 2010]

La Figure 53 et la Figure 54 montrent que les actions « prolongation », « client léger prolongation » et « client léger renouvellement » permettent la plus grande quantité d'émissions de CO₂ équivalent évitées. De plus, ces trois actions interviennent sur les mêmes catégories d'établissements.

La Figure 53 permet de valider la conclusion précédente ayant mis en avant les actions « client léger prolongation » et « prolongation » comme celles ayant à la fois une efficacité carbone importante et une durée de retour sur investissement faible (groupe 1 Figure 53). De plus, comme vu précédemment (Figure 45 page 153), l'amortissement des équipements est plus impactant sur l'environnement que l'utilisation. Ces deux actions sont celles qui encouragent à conserver les équipements le plus longtemps possible en prolongeant leur durée de vie. Ainsi l'action « prolongation » vise à prolonger la durée de vie des ordinateurs, le point délicat de cette solution est qu'elle ne tient pas compte de l'évolution des équipements qui peuvent devenir plus compliqués à entretenir en vieillissant ou présenter des risques de pannes. Pour pallier à ce problème, l'action « client léger prolongation » a été envisagée et permet de conserver les anciens équipements en les transformant en client léger. Cette dernière solution permet alors d'éviter les contraintes liées au vieillissement des équipements. Le traitement de l'information a permis de chiffrer les gains (en % des émissions de la situation initiale). Ainsi, l'application pourrait générer une économie de près de 5,4% des émissions de GES liées à l'ensemble des services informatiques par rapport à la situation actuelle.

Un second groupe d'actions a été identifié (groupe 2 Figure 53) comme possédant une efficacité carbone moyenne et une durée de retour sur investissement intéressante. Ainsi, les actions « gestion de charge », « extinction » et « virtualisation » forment ce second groupe et permettraient de réduire les émissions de GES de 2,3 % par rapport à la situation initiale.

Enfin, le troisième groupe (groupe 3 Figure 53) composé des actions « rationalisation » et « client léger renouvellement » montre une faible efficacité carbone et ne nous paraît pas particulièrement pertinent. De même que la dernière action « serveur » qui, en plus d'avoir une faible efficacité carbone, possède également une durée de retour sur investissement longue (supérieure à 20 ans).

L'avantage principal de ces représentations est d'exprimer l'ensemble des résultats obtenus précédemment sous un seul graphique et de manière pédagogique. Cependant, elles engendrent une perte de précision au niveau du positionnement exact des actions selon les axes principaux.

L'analyse environnementale du système informatique actuel avait pour objectif de quantifier les différents impacts environnementaux afin d'identifier les parties de l'activité informatique qui sont à l'origine des impacts environnementaux les plus importants. Dans un second temps, l'étude a permis d'identifier des améliorations pouvant être apportées au système informatique actuel afin de réduire les principaux impacts environnementaux identifiés. Ces propositions pourraient notamment être mises en œuvre dans le cadre du nouveau projet de centre informatique ou de renouvellement du parc d'informatique décentralisée.

Bien que les résultats de l'étude aient fortement intéressés les mandataires du projet, aucune des solutions proposées n'a encore fait l'objet d'une mise en œuvre au sein du groupe Casino. En effet, les actions proposées nécessitent d'importants bouleversements parmi les services informatiques comme le remplacement de matériels, la rationalisation des applications ou le transfert de données sur les serveurs. Ces changements dans l'organisation d'une telle structure ne peuvent se faire sans réflexion préalable avec l'ensemble des services concernés. Ainsi, ces solutions sont actuellement encore débattues en interne avec les services techniques et la hiérarchie pour définir les modalités d'applications et les contraintes techniques pouvant freiner leur mise en œuvre.

Néanmoins, au cours du projet avec Casino IT, de petites actions concernant le data centre ont pu voir le jour comme la mise en place de caches sur les baies de serveurs afin d'éviter les mélanges de flux d'air (air chaud et air froid). Ces caches ont été mis en place à l'automne 2009. Les gains relatifs à cette action ne peuvent être quantifiés car ils n'ont pas permis une économie en termes de consommation électrique. Cependant, le rendement du système de climatisation s'en est trouvé amélioré.

Enfin, suite à ce projet et notamment aux mesures qui ont été réalisées sur les différents équipements, il a été envisagé d'utiliser un logiciel pour connaître de manière plus précise les modes d'utilisation des équipements. En effet, les informations recueillies par les boîtiers de mesures ont été considérées comme pertinentes, notamment pour identifier les sources de consommations électriques inutiles comme les postes allumés mais sans activité durant plusieurs jours.

L'intérêt de la mise en place de ce logiciel est d'obtenir le rythme d'utilisation des équipements (tel qu'il a été décrit précédemment dans notre étude) de manière quasi automatique et transparente pour l'utilisateur. De plus, l'ensemble des équipements du parc du groupe Casino sont équipés de ce logiciel mais son déploiement et son utilisation remonte à quelques mois pour environ 800 postes. L'importante quantité de données pouvant être acquises pourrait permettre de réaliser une étude plus précise et ainsi diminuer les incertitudes relatives à la généralisation des résultats.

La méthodologie ainsi appliquée au sein de Casino a permis d'aboutir à une série de bonnes pratiques à mettre en place pour réduire les impacts environnementaux des systèmes informatiques d'un site. A ce stade de développement, la méthodologie ne considère pas les différents impacts environnementaux mais se concentre sur les émissions de GES exprimées en CO₂ équivalent. Néanmoins, les compléments apportés à la méthodologie permettant, entre autres, d'exprimer ces différents impacts ont également fait l'objet d'une application sur le périmètre de Casino (après la clôture du projet). Ces résultats sont présentés en Annexe 6.

Cette première validation de la méthodologie a permis de mettre en évidence des lacunes qui sont présentées dans la partie suivante et pour lesquelles des améliorations sont proposées.

Partie 2 Retour d'expérience et évolution de la méthodologie

Le retour d'expérience de l'application de la méthodologie chez Casino a permis de valider son déploiement mais aussi de mettre en lumière certains points pour lesquels des améliorations sont nécessaires. Il est notamment question de la phase de collecte de données et de sélection des indicateurs environnementaux.

2.1 Collecte des données

Cette partie de la méthodologie, préalable à la constitution du tableau de bord environnemental est une phase essentielle de la méthodologie afin d'avoir une évaluation spécifique à l'organisation étudiée. Ainsi, il s'avère indispensable de renforcer cette étape pour permettre une meilleure prise en compte des caractéristiques spécifiques de l'organisation d'une part via des enquêtes approfondies et, d'autre part, via la représentativité de l'échantillonnage.

2.1.1 Des enquêtes approfondies

Les enquêtes réalisées lors de la première étude de cas ont permis d'interpréter les courbes de puissances des équipements ayant fait l'objet de mesures. Cependant, cette première application a mis en évidence les lacunes de cette phase d'enquêtes.

Dans ce contexte, le questionnaire doit être enrichi suivant trois points :

- Dans un premier temps, le **paramétrage de l'équipement** doit être connu afin de garantir une bonne interprétation des courbes de mesures. Par exemple, sur les courbes de mesures d'un ordinateur les mises en veille sont facilement identifiables mais en connaissant la durée au bout de laquelle cette veille se met en route, il est alors possible de connaître si l'ordinateur a été mis en veille par l'utilisateur ou non. La présence d'un palier précédant la veille est en effet synonyme d'une mise en veille automatique et non provoquée par l'utilisateur.
- Dans un second temps, une **fiche de suivi de l'activité de l'utilisateur** peut être associée aux mesures (exemple de fiche de suivi proposé en Annexe 7). Cette fiche a pour objectif de connaître très précisément les différentes utilisations des équipements afin d'expliquer les variations de puissances visibles sur les courbes de mesures. L'intérêt est de pouvoir identifier la nature des activités générant des modifications de puissances, par exemple l'utilisation d'un logiciel de modélisation en trois dimensions engendre une puissance (et par conséquent une consommation électrique) plus importante car les processeurs de l'ordinateur sont plus sollicités que lors de tâches « simples » telles que de la bureautique.
Donc, si un utilisateur indique dans le questionnaire que son équipement est utilisé uniquement pour réaliser des travaux bureautiques de type traitement de texte, consultation messagerie et internet, la fiche de suivi couplée aux résultats des mesures permettront d'estimer les temps moyens hebdomadaires sur chaque activité. Ces résultats seront essentiels pour annualiser les résultats.
- Dans un troisième temps, la question de la **représentativité des données** constitue un élément clef de la méthodologie. En effet, les mesures sont réalisées sur une durée d'une semaine, les résultats obtenus servent alors de base pour annualiser les valeurs : période plus significative pour le calcul des consommations, des impacts environnementaux ainsi que du retour sur investissement des solutions d'optimisation proposées. Par conséquent, bien que la question : « cette semaine est-elle représentative de votre activité ? » existe dans la première version de

l'enquête, elle est renforcée par la fiche de suivi qui permet de connaître plus précisément les temps moyens hebdomadaires passés sur chaque type d'activité. De même, des tests sur des périodes plus longues seront réalisés afin de s'assurer de la représentativité des données obtenues par l'intermédiaire des boîtiers de mesures.

2.1.2 Quantité de mesures réalisées

Pour l'application « groupe Casino », un nombre limité d'équipements a pu faire l'objet de mesures. En effet, des contraintes liées à la durée du projet, au périmètre de l'étude et à la diversité des équipements présents, n'a pas permis la réalisation de plus de mesures.

Néanmoins, afin que l'évaluation représente le plus fidèlement possible la réalité, les mesures doivent être réalisées sur un panel d'équipements représentatif en nombre et en qualité. Ce panel étendu permettant ainsi de tenir compte :

- des spécificités des équipements : deux équipements d'une même marque, du même modèle et de la même année peuvent être configurés différemment et donc ne pas avoir les mêmes puissances dans les différents statuts ;
- de la variabilité liée à l'utilisation qui en est faite : deux ordinateurs identiques peuvent être utilisés totalement différemment, un pour de la bureautique et l'autre pour du travail web. Une variation de consommation électrique peut être liée à ces deux utilisations distinctes et seules des mesures sur des modèles identiques mais avec des utilisations différentes pourront mettre en évidence cette variation.

Par conséquent, le nombre de mesures choisi doit considérer ces différentes variations potentielles au sein d'un même équipement. Ainsi, avant de réaliser les mesures il est nécessaire de connaître à la fois les équipements présents (inventaires du matériel) mais aussi les différents profils utilisateurs pouvant exister au sein de la structure.

Enfin, dans une optique de fiabilité des données obtenues lors des campagnes de mesures, il peut être utile de réaliser des mesures comparatives. Ces dernières consisteront en la réalisation de mesures multiples : au minimum deux équipements ayant les mêmes caractéristiques (mêmes équipements et mêmes types d'utilisation).

2.2 Indicateurs environnementaux supplémentaires

Dans un premier temps, seule l'expression de l'impact sur le changement climatique avec une estimation des émissions de gaz à effet de serre (exprimées en kg CO₂ équivalent) a été réalisée lors de l'application de la méthodologie au cas de Casino IT. En effet, le choix d'un indicateur unique s'est fait en accord avec l'entreprise du fait de sa stratégie actuelle et la réalisation de son Bilan Carbone® (selon la méthode ADEME). Néanmoins, des indicateurs environnementaux complémentaires doivent être ajoutés afin d'obtenir une vision plus complète des impacts environnementaux de service informatique d'une entité.

Le choix des indicateurs environnementaux supplémentaires est basé à la fois sur les enjeux principaux liés au secteur informatique ainsi que ceux les plus utilisés dans les méthodes d'évaluation environnementale. Ces indicateurs ont pour objectif de représenter les impacts environnementaux dans les différents compartiments naturels : l'air, l'eau et le sol.

Les indicateurs venant enrichir l'évaluation environnementale réalisée sont :

- **l'épuisement des ressources abiotiques** (kg Sb-Eq) : les équipements informatiques utilisent de nombreux matériaux et substances fossiles (voir chapitre 1 § 1.1.3). Cet indicateur paraît donc pertinent pour évaluer les impacts relatifs à ce secteur.
- **l'épuisement de l'ozone stratosphérique** (kg CFC-11-Eq) : bien que l'impact environnemental sur le compartiment air ait déjà été évalué par la contribution au changement climatique (exprimé en kg CO₂-Eq), l'indicateur relatif à l'épuisement de l'ozone stratosphérique semble pertinent à évaluer en raison de l'importance du phénomène naturel que cette couche d'ozone dans l'atmosphère représente.
- **l'acidification** (kg SO₂-Eq) est un phénomène pouvant affecter les trois compartiments (air, eau et sol) par l'intermédiaire des diverses émissions résultantes des activités humaines. Ainsi, il apparaît pertinent d'estimer la contribution du secteur informatique à cet impact, notamment par le fait que ce secteur soit omniprésent dans la société actuelle, comme indiqué précédemment.
- **l'écotoxicité** (kg 1,4-DCB-Eq) : de part les nombreuses substances chimiques contenues dans les équipements informatiques, la toxicité qui en résulte s'avère être un impact environnemental pertinent à évaluer. De plus, cette écotoxicité est évaluée dans différents compartiments par cinq indicateurs exprimés en kg 1,4-DCB-Eq :
 - **écotoxicité d'eau douce** (FAETP)
 - **écotoxicité d'eau marine** (MAETP)
 - **écotoxicité des sédiments d'eau douce** (FSETP)
 - **écotoxicité des sédiments d'eau marine** (MSETP)
 - **écotoxicité terrestre** (TETP)
- la **toxicité humaine** (kg 1,4-DCB-Eq) : cet indicateur représente l'impact des substances chimiques contenues dans les équipements informatiques sur l'être humain.
- les **radiations ionisantes** (DALYs) sont révélatrices des impacts résultant de rejets de substances radioactives ainsi que l'exposition directe à leurs radiations. Par conséquent, elles permettent d'exprimer les impacts liés à la production d'électricité par le secteur nucléaire. Cet indicateur est particulièrement pertinent en France qui puise une grande majorité de son électricité dans le nucléaire.

Afin de respecter le déroulement des étapes d'élaboration et d'application de la méthodologie dans ce manuscrit, les résultats de ces indicateurs pour la première application (Casino IT) sont présentés en annexe (Annexe 6).

2.3 Conclusions sur les apports

Le premier retour d'expérience de l'utilisation de la méthodologie développée dans le cadre de l'étude Casino a mis en évidence des lacunes. Les trois principales qui ont été intégrées pour la seconde application sont :

- L'enrichissement de l'étape de collecte des données tout d'abord par l'intermédiaire d'**enquêtes plus approfondies** auprès des utilisateurs dont les équipements font l'objet de mesures ;
- Puis par une **plus grande quantité de mesures** réalisées. Afin de constituer un échantillon d'équipements représentatif de l'ensemble des équipements présents, il est nécessaire d'avoir plus de mesures. Les résultats ainsi obtenus sont plus robustes et peuvent ainsi être généralisés et annualisés avec une plus faible incertitude.
- L'expression d'une plus grande diversité d'**indicateurs** permet d'avoir une vision plus complète des impacts environnementaux [Jullien et al., 2010]. De plus, les émissions de gaz à effet de serre ne sont représentatives que d'une part du secteur informatique. Secteur dont les impacts comme l'épuisement des ressources ou encore l'acidification paraissent plus pertinent à analyser.

Partie 3 Application 2 : Centre SITE de l'Ecole des Mines

Le deuxième cas concerne l'utilisation du matériel informatique du centre SITE de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne (EMSE).

L'EMSE est une école d'ingénieur créée en 1816. Après plusieurs déménagements, elle prend place sur le cours Fauriel et s'agrandit tout d'abord au niveau de l'Espace Fauriel puis en créant une antenne à Gardanne, en Provence. Bien que de nombreux laboratoires soient désormais présents dans son enceinte, elle est composée en grande partie de bureaux. L'informatique représente ainsi une grande part de la consommation électrique de l'établissement. C'est le cas du centre SITE qui ne comprend pas de laboratoire d'expérimentation mais des bureaux munis d'équipements informatiques classiques (ordinateurs, imprimantes, serveurs). Par conséquent, ce centre de recherche peut être assimilé au siège social de Casino en termes d'équipements présents. Le périmètre de l'étude comprend donc l'ensemble des équipements informatiques du centre SITE.

3.1 Etape 1 : Identification du système et des enjeux

L'objectif de l'application au sein de l'Ecole des Mines est de valider la méthodologie avec un site pouvant être comparé à un des sites de Casino mais aussi de valider l'intérêt des compléments apportés suite à la première application. Enfin, elle permettra de renforcer les conclusions obtenues via la première application notamment sur les impacts environnementaux prépondérants à l'activité informatique.

3.1.1 Le système

Le périmètre du système tient compte de l'organisation des équipements informatiques au sein du centre SITE. La Figure 55 permet de schématiser l'ensemble de ce périmètre d'étude.

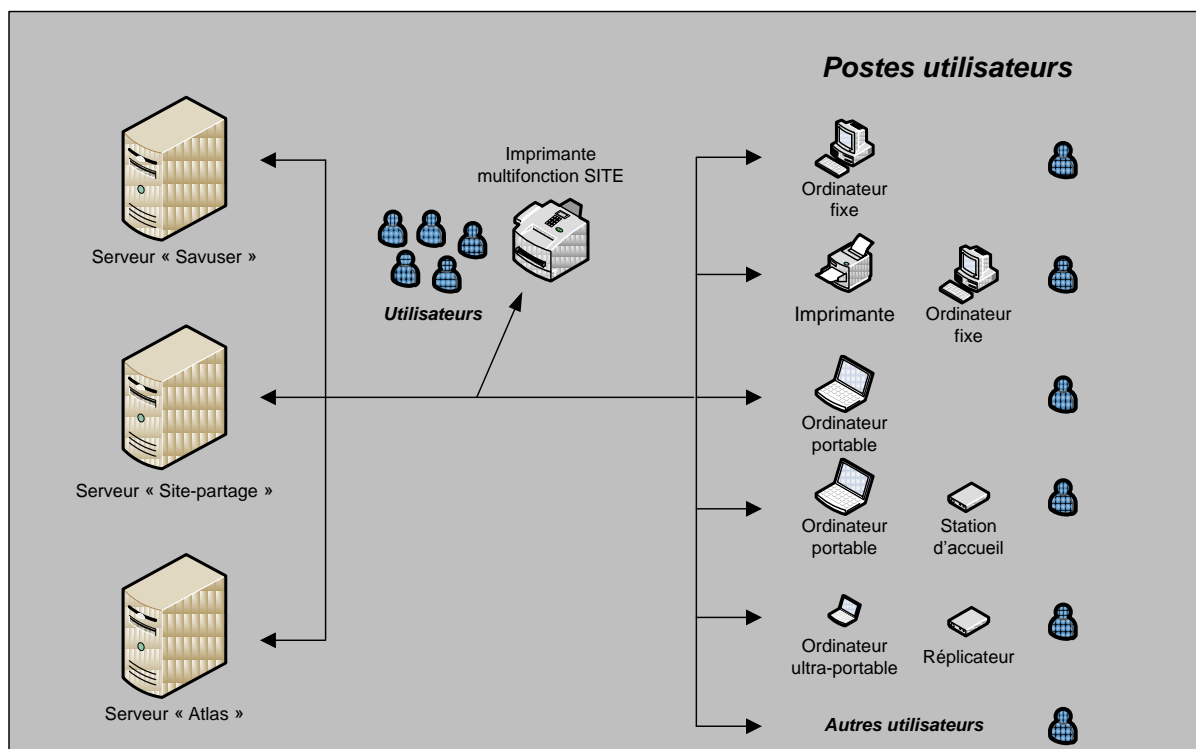


Figure 55: Représentation du système étudié lors de l'application 2

La partie gauche de la Figure 55 présente les trois serveurs qui supportent la structure informatique du centre SITE. Sur la partie droite sont présentés les différents postes utilisateurs identifiés et qui feront l'objet d'une analyse approfondie dans la suite de l'étude. L'imprimante multifonction est présentée au centre de la Figure 55. Elle est accessible par l'ensemble des personnels du centre SITE.

3.1.2 Les enjeux

Depuis 2008, l'école s'est engagée dans une politique de développement durable. Les actions qui sont mises en place à ce titre s'appliquent tout aussi bien aux membres du personnel qu'aux élèves de l'école. Ainsi, les élèves suivent un enseignement en environnement de base en première année mais aussi des modules plus approfondis lors de leur spécialisation. De plus, il est important pour les ingénieurs qui sont formés au sein de l'EMSE de voir leur établissement engagé dans des actions en faveur de l'environnement, notamment au sein d'un laboratoire spécialisé en environnement. L'enjeu managérial relatif à cette étude est également visible au niveau du personnel de l'établissement par la mise en place de groupes de travail concernant le développement durable et notamment axés sur des thématiques telles que l'énergie, l'eau, les bâtiments, les achats et les services tertiaires ou encore le Bilan Carbone®. L'application de cette méthodologie au sein de l'EMSE permet alors **d'obtenir des informations concernant les consommations électriques des équipements informatiques ainsi que des solutions de gestion de ces équipements afin d'en diminuer la consommation électrique**. Ces solutions pouvant être techniques (équipements plus performants) et/ou comportementales (de la part des utilisateurs).

En qualité d'établissement d'enseignement supérieur et de recherche, l'Ecole des Mines est un établissement public administratif fonctionnant à la fois par l'intermédiaire de budgets attribués par l'Etat français via les ministères de l'enseignement et de l'industrie, mais aussi via des contrats avec d'autres organismes, publics ou privés. Les frais de fonctionnement de cette institution sont supportés par les fonds de l'Etat, par conséquent, l'achat des équipements informatiques se doit de respecter les règles du code des marchés publics [Code des marchés publics, 2011] ainsi que du registre du domaine de l'Etat [Code du domaine de l'Etat, 2011] établies par l'état envers lui-même afin d'assurer une bonne gestion de l'argent public. Ainsi, la circulaire du 3 décembre 2008 dénommée « exemplarité de l'état » [Journal Officiel de la République Française, 2008] a mis l'accent sur les actions qui devaient être mises en place afin de permettre aux établissements publics de diminuer leurs impacts sur l'environnement. L'exemplarité de l'Etat en matière de développement durable est un enjeu important du Grenelle et l'article 48 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement [Journal Officiel de la République Française, 2009b] précise les objectifs à atteindre pour les services de l'état. Cette démarche est basée sur la réalisation de fiches thématiques (une vingtaine) et permet aux administrations de se lancer dans une démarche de progrès avec des objectifs chiffrés portant sur les achats publics durables, sur l'éco responsabilité de l'Etat et sur sa responsabilité sociale. Pour répondre à ces objectifs, les achats sont un des thèmes abordés parmi les groupes de travail établi par l'EMSE. Au sein de ce groupe achats, une réflexion importante est actuellement en cours pour insérer des clauses environnementales dans les marchés avant diffusion afin que les futurs achats de l'EMSE soient éco-responsables. L'application d'une méthodologie comme celle proposée permet de **sélectionner les critères à insérer dans les marchés publics en les adaptant aux points sensibles identifiés**.

Enfin, dans la logique d'exemplarité de l'Etat, il paraît intéressant d'**appliquer au sein de l'EMSE des bonnes pratiques dans l'utilisation des équipements informatiques**. Ces bonnes pratiques pouvant être appliquées individuellement et dans un cadre privé, il s'avère alors pertinent de sensibiliser les membres du personnel à de telles actions afin qu'ils puissent les reproduire dans la sphère privée.

3.2 Etape 2 : Collecte des données

Comme lors de la première application, la phase de collecte des données constitue un point essentiel de la méthodologie. Toujours décomposée en quatre parties, cette première étape permet d'obtenir l'ensemble des informations nécessaires pour constituer le tableau de bord environnemental, véritable axe central de l'évaluation environnementale.

3.2.1 L'échantillonnage

Comme expliqué précédemment, un focus sur le centre SITE de l'EMSE a été réalisé de par ses similitudes avec le siège social de Casino : les deux entités étant essentiellement composées de bureaux munis d'équipements classiques. La méthodologie peut alors être transposée directement, permettant de valider la méthodologie ainsi que l'intérêt des compléments apportés.

En coopération avec le correspondant informatique du centre SITE, un panel d'équipements le plus représentatif de l'activité du centre a alors été constitué selon trois critères :

- la **représentativité** du parc informatique du centre de recherche : les différentes catégories d'équipements constituées sur la base de l'inventaire devaient être représentées dans le panel d'équipements constituant l'échantillon.
- les membres du personnel du centre SITE travaillent majoritairement sur des logiciels de bureautiques classiques ainsi que quelques logiciels spécifiques plus ou moins gourmands en énergie de part la réalisation de cartographie ou de la modélisation en trois dimensions pour certains. Par conséquent, **le panel d'équipements doit tenir compte de cette variabilité d'utilisation ainsi que des spécificités métiers** de certains postes comme le secrétariat ou le webmestre du centre.
- les **utilisateurs dont les équipements ont fait l'objet de mesures devaient être volontaires pour l'étude**. En effet, un des compléments de la méthodologie concerne le remplissage d'une fiche de suivi de la part des utilisateurs. Il est alors essentiel que ces utilisateurs remplissent cette fiche le plus précautionneusement possible afin que les données recueillies soit fiables.

La collecte des données réelles sur le terrain a permis de valider et de corriger les informations récupérées sur les documentations fournies par les constructeurs.

3.2.2 Inventaires

Tout d'abord, un inventaire de l'ensemble du matériel informatique a été effectué en collaboration avec le correspondant informatique du centre. Cet inventaire a consisté à récupérer les références exactes et les quantités précises de chaque équipement présent.

La Figure 56 présente le nombre d'équipements de chaque catégorie du centre.

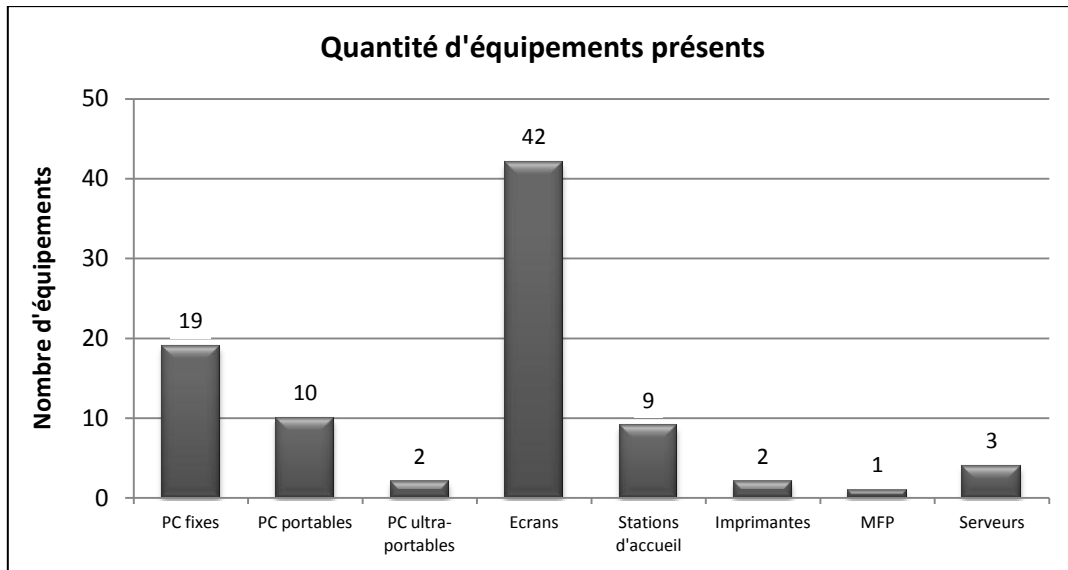


Figure 56: Nombre d'équipements de chaque catégorie présents au centre SITE

Sur les 89 équipements près de la moitié sont des écrans. Cette répartition peut s'expliquer par l'utilisation multiple qui peut être faite de ces écrans. En effet, chaque ordinateur fixe est équipé d'au moins un écran, de même que les serveurs. Le centre de recherche est composé de deux équipes dont une spécialisée en modélisation en deux et trois dimensions (systèmes d'information géographiques). Les personnes ayant ce type d'activité sont donc très souvent équipées d'un ordinateur fixe de calculs nécessitant une grande capacité de calculs et munis de deux voire trois écrans. L'utilisation de plusieurs écrans s'avère nécessaire pour ce genre d'activité qui nécessite de travailler avec un fichier de traitement des données et une visualisation des résultats.

De plus, depuis 2008, afin d'améliorer les conditions de travail des stations d'accueils ont été installées pour les ordinateurs portables. Ainsi, parmi les 12 utilisateurs d'ordinateurs portables et ultra-portables, 9 se trouvent également munis d'un écran supplémentaire. Ces utilisateurs ne travaillent pas systématiquement avec les deux écrans simultanément, celui de leur ordinateur portable et l'écran complémentaire. L'ensemble des informations concernant ces spécificités d'utilisation seront détaillées dans les enquêtes réalisées.

Les ordinateurs occupent la seconde place en nombre d'équipements avec 35 % de l'effectif total répartis en 22% pour les ordinateurs fixes (19 unités), 11 % pour les ordinateurs portables (10 unités) et 2 % pour les ultraportables (2 unités).

Bien que leur utilisation ne soit pas négligeable, la quantité d'imprimantes reste faible au sein de l'établissement avec une imprimante multifonction (MFP) et deux imprimantes individuelles. Ces équipements ne représentent que 3 % de la quantité des équipements.

3.2.3 Enquêtes

Cette enquête avait pour objectif de connaître plus en détail les modalités d'utilisation du matériel informatique. Les questions portaient sur les pratiques d'utilisation, les durées d'utilisation, les modalités de mise en veille des différents équipements,... De même, des éléments d'informations relevant de la gestion des consommables et des déchets ont été recueillis.

De plus, le questionnaire a été complété par un suivi des activités des utilisateurs dont les équipements ont fait l'objet de mesures. Ce point sera détaillé dans le paragraphe suivant relatif à la description des mesures réalisées.

Suite à ces enquêtes, plusieurs profils utilisateurs (Tableau 28) ont pu être établis selon les paramètres suivants :

- le type de logiciels utilisés : une partie des activités du laboratoire est centrée sur la modélisation cartographique (utilisation de logiciels nécessitant des cartes graphiques plus performantes) ;
- le poste (fonction) occupé par l'utilisateur : des chercheurs permanents ou contractuels, des fonctions supports (assistantes et webmaster), des chercheurs en formation ;
- le temps de présence sur le site : temps plein, 80%, mi-temps

Tableau 28 : Profils utilisateurs obtenus sur la base des enquêtes

Profil	Poste	Type d'activité
Profil utilisateur 1	Chercheur en formation	Logiciels de modélisation en deux et trois dimensions Logiciel de cartographie (SIG) Bureautique
Profil utilisateur 2	Chercheur	Logiciels de modélisation en deux et trois dimensions Logiciel de cartographie (SIG) Bureautique
Profil utilisateur 3	Assistante	Bureautique : traitement de texte et tableur, messagerie
Profil utilisateur 4	Webmaster	Web : création, maintenance, mise à jour de plateformes internet Bureautique
Profil utilisateur 5	Chercheur en formation	Logiciels spécifiques ne nécessitant que peu de mémoire vive Bureautique
Profil utilisateur 6	Chercheur	Logiciels spécifiques ne nécessitant que peu de mémoire vive Bureautique

De manière unanime, les utilisateurs enquêtés déclarent éteindre systématiquement leurs équipements (poste de travail, écran(s)) la nuit et les week-ends mais pas durant les pauses ou lors d'une absence du bureau (un seul utilisateur affirme mettre en veille prolongée son poste de travail et éteindre son écran durant les pauses ou réunions). Ces affirmations sont confirmées par les résultats des mesures réalisées.

De plus, aucune consigne exceptée les consignes de sécurité de verrouillage de session ne sont connues par les utilisateurs. Ainsi, ils agissent avec leurs équipements comme ils le feraient à leur domicile dans le cas d'un équipement personnel.

Il apparaît donc important de prendre en compte ces principaux résultats dans la suite de l'étude et travailler sur le comportement des utilisateurs ou le paramétrage de leurs équipements afin de limiter la consommation électrique liée à leurs équipements.

3.2.4 Mesures

Afin de compléter l'ensemble des informations recueillies, des mesures de consommations électriques des équipements ont été réalisées à l'aide des boîtiers de mesures. Au total 29 équipements ont fait l'objet de mesures sur une durée d'une semaine chacun. Le Tableau 29 indique le nombre de ces équipements ainsi que leur répartition selon les catégories.

Tableau 29: Nombre d'équipements et pas-de-temps retenu pour chaque catégorie ayant fait l'objet de mesures au centre SITE.

	Nombre d'équipements mesurés	Pas de temps retenus (en minutes)	Explication du choix retenu
Ordinateurs fixes	5	5	De manière générale, les actions réalisées sur les ordinateurs durent plusieurs minutes (lecture de mail, bureautique, internet, ...). Un pas de temps de 1 minute aurait abouti à un trop grand nombre de données pour peu d'informations supplémentaires. De même, un pas de temps de 10 minutes aurait impliqué une trop grande perte d'informations. Le même pas de temps a été retenu pour les trois catégories d'ordinateurs.
Ordinateurs portables	3	5	
Ordinateurs ultra-portables	1	5	
Ecrans	11	5	Le pas de temps retenu pour les écrans doit être cohérent avec celui retenu pour les ordinateurs car les actions entre les deux équipements sont corrélées.
Stations d'accueil	3	5	Le pas de temps retenu pour les stations d'accueil doit être cohérent avec celui retenu pour les ordinateurs car les actions entre les deux équipements sont corrélées.
Imprimantes	1	1	L'action d'impression peut être courte (si le document imprimé ne comporte qu'une ou deux pages), le pas de temps le plus petit possible a donc été retenu pour les imprimantes. Même si le nombre de données sera important, seul ce pas de temps permet d'obtenir l'ensemble des informations nécessaires. Le même pas de temps a été retenu pour les deux catégories d'imprimantes.
Imprimantes multi fonctions	1	1	
Serveurs*	3	15	Après des essais à 5 et 30 minutes, les serveurs feront l'objet d'une prise de mesure toutes les 15 minutes. Un pas de temps plus fin abouti aux mêmes résultats mais implique un plus grand nombre de données à traiter.

* Les serveurs ont fait l'objet de plusieurs séries de tests de mesures pour savoir s'il était pertinent de conserver le même pas de temps que durant la première application. Ainsi, les premiers serveurs ont été mesurés avec un pas de temps de 5 et 30 minutes, puis il a été décidé de choisir un intervalle de 15 minutes.

De plus, les serveurs possèdent une double alimentation qui a été testée lors des premiers essais pour connaître la répartition de la consommation sur les deux alimentations. Il s'avère que les deux courbes sont superposables, par conséquent lorsque les mesures seront réalisées sur une seule alimentation, la consommation électrique mesurée sera doublée pour obtenir la véritable consommation du serveur.

Ces équipements correspondent aux postes complets de huit utilisateurs différents. Un poste complet rassemble l'ensemble des équipements d'un utilisateur (UC, écrans, ...), excepté les équipements communs installés en réseaux tels que les imprimantes et les serveurs. Ces deux dernières catégories ont également fait l'objet de mesures.

Pour des raisons techniques et de sécurité, notamment concernant les serveurs, la responsable informatique a réalisé les raccordements électriques nécessaires à l'installation et à la récupération des boîtiers.

Les informations relevées permettent d'établir le rythme d'utilisation des différents équipements en fonction des utilisateurs mais aussi d'identifier des points forts ou des points perfectibles dans les comportements. Ainsi, les consommations varient au cours de la journée et en fonction de l'utilisation qui en est faite. Les mesures permettent de mieux comprendre le fonctionnement de chaque équipement. Les pas de temps de prises de mesures varient entre une et quinze minutes (Tableau 29). Les campagnes de mesures se sont déroulées de janvier à mars 2011.

Les résultats des mesures sont analysés en respectant la méthodologie décrite dans le chapitre 2. Ces informations sont ensuite venues renseigner le tableau de bord environnemental pour aboutir aux résultats présentés dans le paragraphe 3.3 suivant.

3.3 Etape 3 : Tableau de bord environnemental

Comme suivant la méthodologie développée, deux types d'indicateurs ont été calculés :

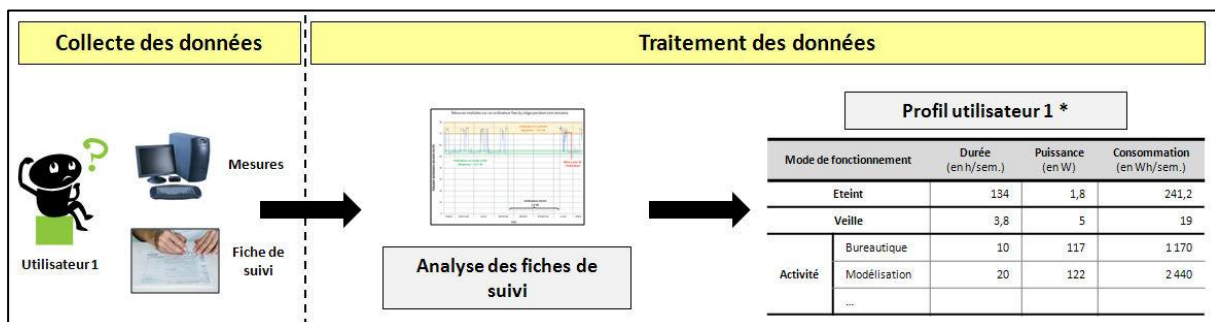
- les indicateurs de suivi,
- les indicateurs d'impact environnemental.

3.3.1 Indicateurs de suivi

- **Consommations électriques par équipement**

A partir des mesures réalisées sur un échantillon du parc informatique, une généralisation a pu être opérée pour obtenir des résultats sur l'ensemble du centre de recherche. Cette généralisation s'est déroulée de la manière suivante :

- Les courbes de puissances obtenues sur les différents équipements ont été décomposées comme lors de la première application (Figure 33). Les différentes puissances ainsi obtenues ont été analysées en parallèle de la fiche de suivi renseignée par l'utilisateur. Le traitement de l'ensemble de ces données a permis d'aboutir à un **profil d'utilisateur** concernant les durées, puissances et donc les consommations en mode éteint, veille et en activité (Figure 57).



* (le profil utilisateur est donné à titre d'exemple)

Figure 57: Schéma de principe du passage des mesures au profil utilisateur

- Sur la base de l'inventaire des équipements et des profils utilisateurs établis précédemment, il a été possible de généraliser les résultats à l'ensemble des équipements informatiques présents au centre SITE.

La généralisation des mesures à l'ensemble des équipements présents au centre SITE permet de connaître les consommations électriques associées à chaque catégorie d'équipements (Figure 58).

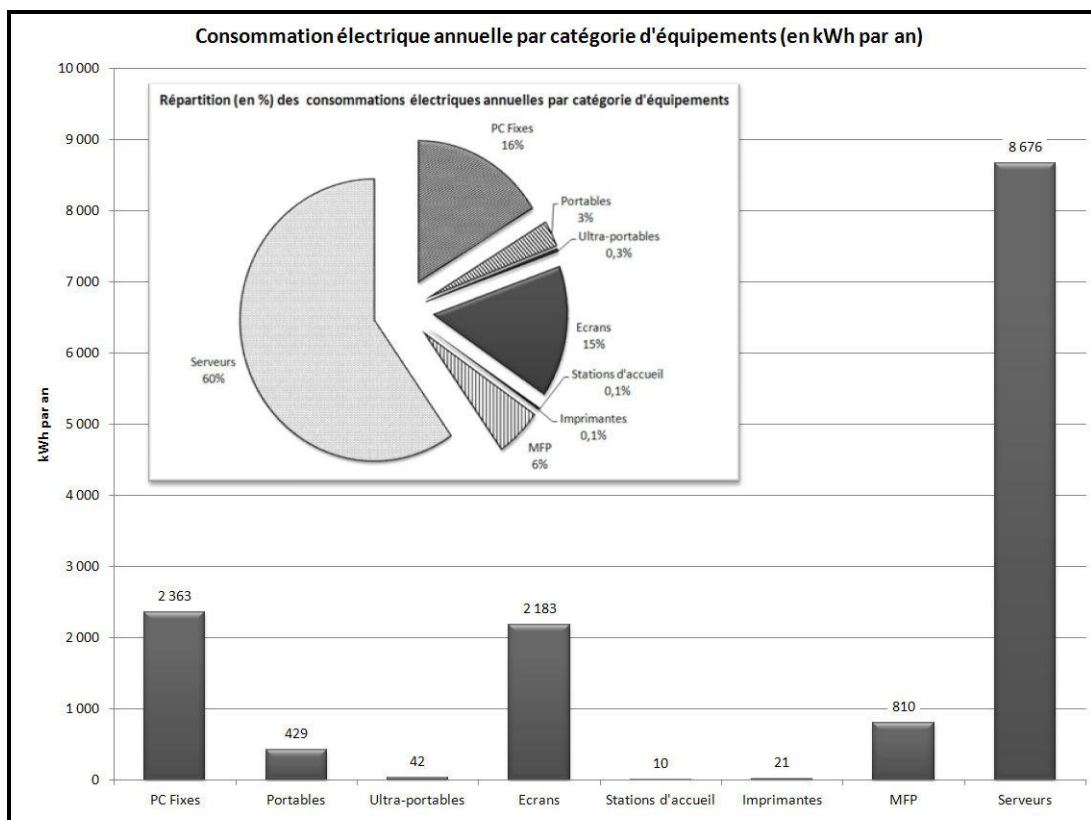


Figure 58 : Consommations électriques totales (en kWh/an) par catégorie d'équipements et pour l'ensemble des équipements

La Figure 58 montre que 60 % de la consommation électrique du parc informatique est dédiée aux trois serveurs qui fonctionnent en permanence soit 8 676 kWh par an. Bien que peu nombreux, ces équipements très consommateurs d'électricité représentent la catégorie la plus importante. Les profils de consommations des serveurs sont proches malgré des variations de puissances ne se produisant pas au même moment. Les services rendus par ces trois serveurs sont différents et indispensables :

- Le serveur « Savuser » est utilisé à des fins de sauvegardes pour l'ensemble des membres du personnel du centre de recherche. Il assure également l'adressage dynamique des adresses IP des divers équipements ainsi que la gestion du domaine (utilisateurs et machines).
- Le serveur « Site-partage » assure également la gestion dynamique du domaine mais son utilisation principale réside dans la plateforme d'échange et de travail collaboratif qu'il propose à l'ensemble du personnel du centre de recherche.
- Le serveur « Atlas » gère les licences et les données des logiciels de cartographie (SIG).

Les ordinateurs (fixes, portables et ultra-portables), 31 unités répertoriées, représentent 19,3 % de la consommation électrique du parc informatique avec respectivement 2 363, 429 et 42 kWh par an pour les ordinateurs fixes, les portables et les ultra-portables.

Les écrans représentent le troisième poste de consommation électrique avec 2 183 kWh par an soit 15 % de la consommation électrique informatique totale. Ce résultat est à mettre en parallèle avec le nombre d'écrans en fonctionnement présents au sein du centre de recherche (catégorie la plus importante en nombre avec 43 unités).

Les imprimantes et les stations d'accueil sont minoritaires de part leur nombre ainsi que par leur consommation électrique, 0,1 % de la consommation électrique informatique pour chacune de ces deux catégories. Une faible utilisation pour les imprimantes et une faible consommation électrique unitaire pour les stations d'accueil peuvent expliquer ces résultats.

En revanche, l'imprimante multifonction représente 6 % de la consommation électrique soit 810 kWh par an. Cet équipement est celui qui atteint les puissances les plus importantes mesurées au cours de cette étude, la puissance maximale atteinte au démarrage étant de 1 556 W. De plus, sa puissance moyenne en activité est de 204 W et sa durée d'activité supérieure à 10 heures par jour.

- **Consommations électriques par poste de travail**

L'ensemble de ces consommations annuelles peuvent également être exprimées en fonction des postes complets de chaque utilisateur (Figure 59). L'ensemble des équipements employé par un utilisateur compose son poste de travail complet (écran, unité centrale, imprimante, ...) ainsi que les équipements communs à l'ensemble du personnel du centre SITE (MFP et serveurs) dont il faut répartir la consommation par le nombre total d'utilisateurs.

Ainsi, la consommation électrique annuelle de ces deux catégories d'équipements (MFP et serveurs) a été divisée par le nombre d'utilisateurs soit le nombre de personnes présentes au sein du centre SITE. L'utilisation des serveurs est variable en fonction des utilisateurs cependant, l'ensemble du personnel est susceptible de les utiliser par conséquent, nous avons choisi de répartir la consommation électrique de manière équivalente entre les différents membres du personnel. La consommation électrique de l'imprimante multifonction est également répartie sur l'ensemble des utilisateurs.

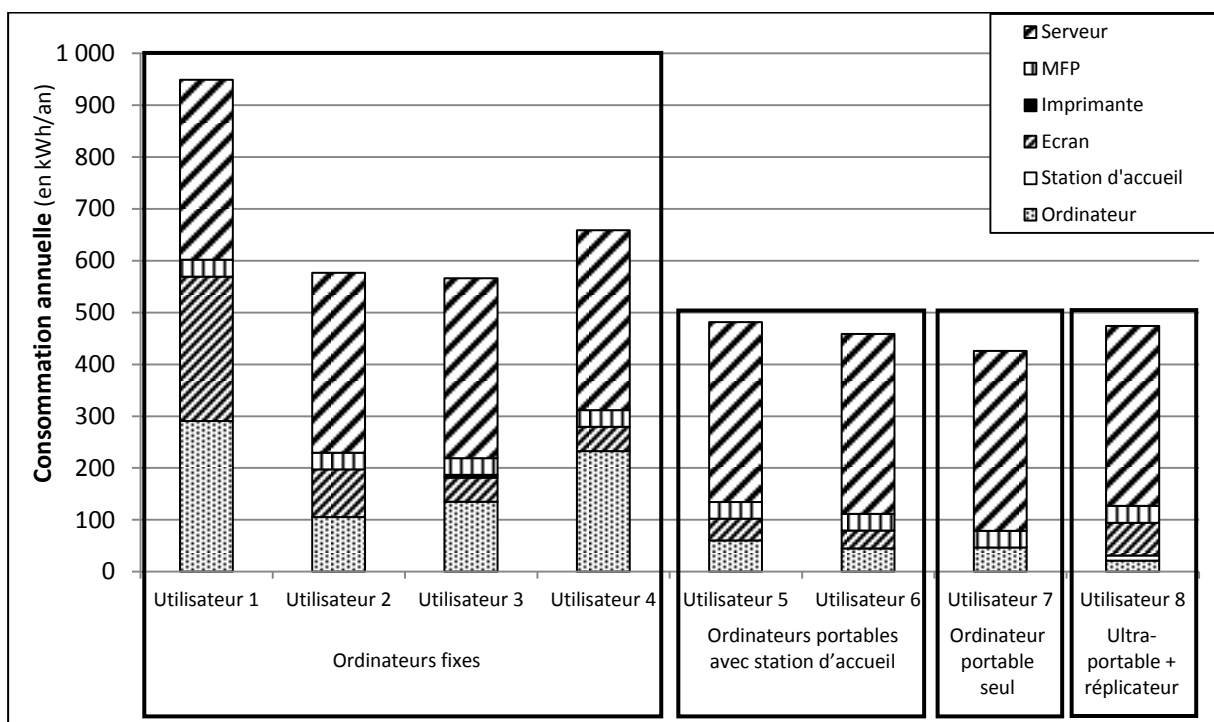


Figure 59: Expression des consommations électriques annuelles des postes complets ayant fait l'objet de mesures

La première conclusion réside dans l'importance que représente la consommation des serveurs sur le poste de travail de chaque utilisateur. Avec 347 kWh annuel par utilisateur, cet équipement est le plus consommateur pour l'ensemble des postes de travail.

La catégorie écran obtient sa consommation électrique annuelle la plus importante sur le profil de l'utilisateur 1. Ceci peut être expliqué par le fait que cet utilisateur utilise deux écrans dont un cathodique contrairement à l'utilisateur 2 qui utilise deux écrans LCD. Ainsi, **les écrans cathodiques sont plus consommateurs d'électricité que les écrans LCD**, si on fait l'hypothèse du même temps d'utilisation.

Les utilisateurs 2 et 4 possèdent le même ordinateur mais n'ont pas les mêmes activités (l'utilisateur 2 est un chercheur utilisant des logiciels de modélisation alors que l'utilisateur 4 est le webmaster du centre SITE). **L'influence de l'activité joue donc un rôle sur la consommation électrique.**

Le poste de l'utilisateur 3 est celui d'une assistante. Elle est la seule à posséder une imprimante individuelle, cette consommation reste minime en comparaison avec les autres composants de son poste de travail.

Les utilisateurs 5 et 6 ont sensiblement le même profil (chercheur), les consommations annuelles s'avèrent proches. Cependant, la légère variation pourrait s'expliquer par les modèles de matériel. En effet, alors que l'utilisateur 5 est équipé de composants datant de 2008, l'utilisateur 6 est équipé des mêmes composants mais de la génération 2010. Ainsi, il semblerait que **les modèles récents consomment légèrement moins que les modèles plus anciens.**

Le poste de l'utilisateur 7 ne comporte ni écran, ni station d'accueil, d'où la consommation électrique totale légèrement inférieure aux autres postes équipés de portables.

Enfin, concernant le poste de l'utilisateur 8, sa consommation électrique principale (excepté les équipements communs) est celle de l'écran.

- ***Répartition des temps et des puissances selon les modes de fonctionnement***

La répartition du temps passé par chaque catégorie d'équipements en fonction des modes activité, veille et éteint peut aider à l'identification des points forts et points sensibles dans leur utilisation. Ces résultats sont présentés sur le graphique a de la Figure 60. De plus, ces résultats de temps doivent être analysés en parallèle des puissances moyennes de chaque catégorie d'équipements selon ces mêmes modes de fonctionnement : mode activité (graphique b de la Figure 60), mode veille (graphique c de la Figure 60) et mode éteint (graphique d de la Figure 60). Les calculs de ces puissances moyennes sont réalisés sur la base des résultats des mesures effectuées sur les différents équipements. L'écart-type est mentionné par l'intermédiaire d'une barre d'erreur pour chacune des valeurs. Cet écart-type n'est cependant pas présenté pour les catégories d'équipement où une seule unité a fait l'objet de mesures (c'est le cas pour les catégories ultra-portables et MFP).

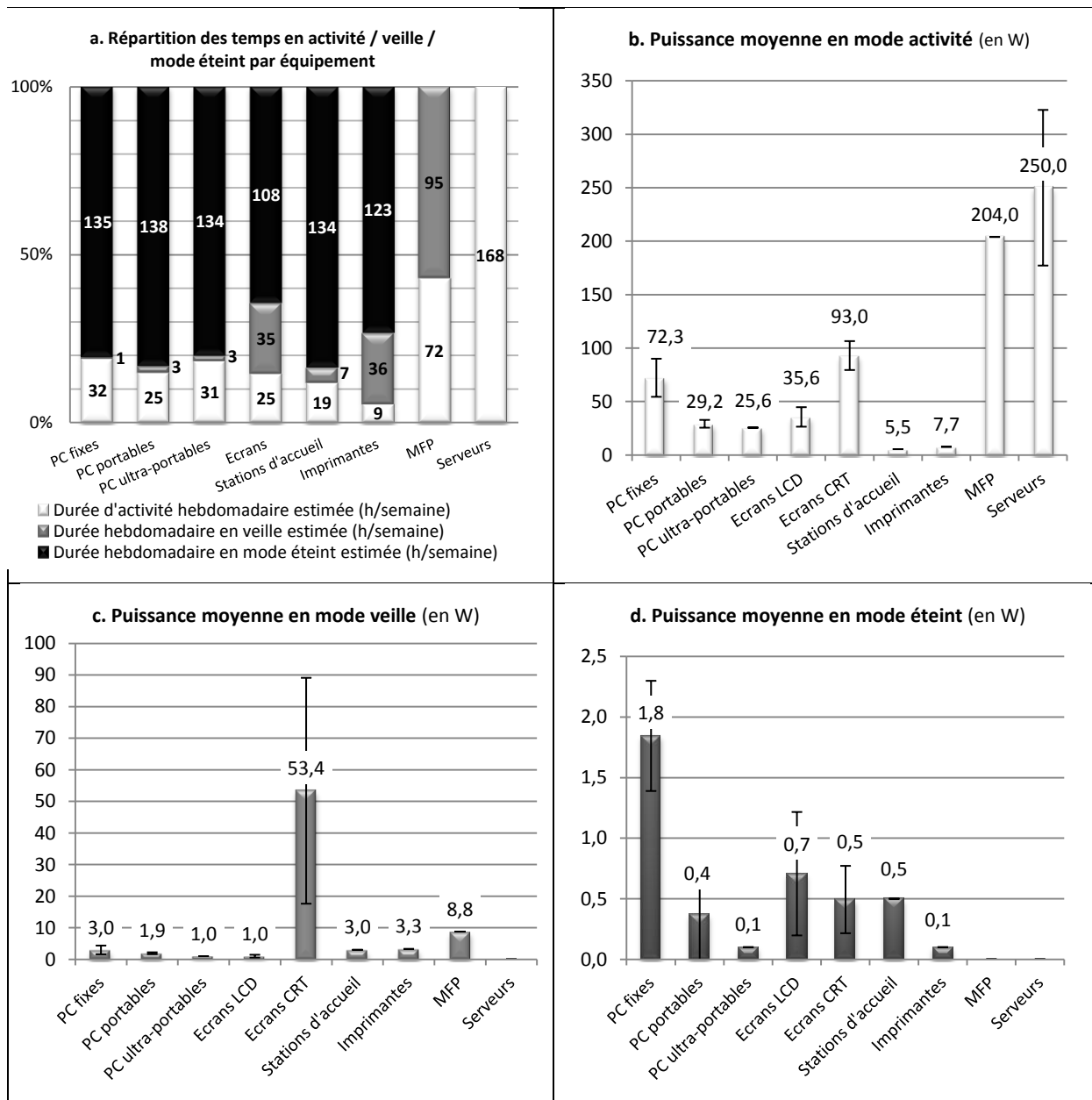


Figure 60: Répartition des temps (a) et des puissances (b, c, d) selon le mode de fonctionnement et les catégories d'équipements

La première constatation à la lecture de la Figure 60 est que, excepté les serveurs et l'imprimante multifonction, tous les équipements sont éteints plus de 50% du temps. Les questionnaires remplis par les utilisateurs ainsi que les mesures réalisées indiquent que ce fort pourcentage est lié à une extinction des équipements durant la nuit et le week-end. Que cet arrêt soit automatique (programmation des équipements) ou lié aux utilisateurs, il s'agit d'un point fort de l'organisation actuelle du système informatique.

De plus, au fait que les serveurs ne soient jamais éteints s'ajoutent le fait qu'ils possèdent la puissance moyenne en activité la plus élevée. Ces deux éléments combinés pourraient expliquer que ce sont les serveurs qui représentent la catégorie d'équipement la plus consommatrice d'électricité (60% de la consommation électrique informatique – Figure 58).

Les trois catégories d'ordinateurs (fixes, portables et ultra-portables) suivent le même profil en termes de répartition de temps selon les trois modes, avec $\pm 20\%$ du temps en activité, 1 à 2 % du temps en veille et $\pm 80\%$ en mode éteint ou utilisé hors du bureau pour les portables et ultra-portables (cours, réunions, déplacements, maison), ce qui n'a pas fait l'objet de mesures. Néanmoins, les ordinateurs portables et ultra-portables pouvant être utilisés à l'extérieur, la charge de la batterie s'effectue parfois lors du retour au bureau. Dans ce cas, une partie de l'activité des équipements est prise en compte dans les mesures réalisées. L'analyse du profil des écrans doit être réalisée en parallèle de l'analyse des profils des ordinateurs. Les résultats obtenus pour les écrans sont très révélateurs des pratiques des utilisateurs. En effet, alors que les ordinateurs ont une durée moyenne d'activité de 29 heures par semaine, celle des écrans est de 25 heures. Cette différence s'explique par le fait que le paramétrage de la mise en veille engendre une mise en veille de l'écran avant la mise en veille de l'ordinateur. De même, les ordinateurs sont éteints ± 135 heures par semaine en moyenne alors que les écrans ne sont éteints que 108 heures par semaine. Cette différence peut trouver une double explication : (1) l'extinction de l'écran n'est pas systématique lors de l'arrêt de l'ordinateur (l'utilisateur éteint son ordinateur mais pas son écran à chaque fois, ce dernier se mettant alors en mode veille) ou, (2) sur certains modèles, l'arrêt de l'ordinateur génère l'arrêt de l'écran mais avec un temps de latence plus ou moins long. De plus, alors que les puissances moyennes en mode veille de ces trois catégories d'ordinateurs sont voisines (respectivement 3W, 1,9W et 1 W pour les fixes, portables et ultra-portables), une distinction peut être faite entre les ordinateurs fixes et les portables et ultra-portables pour les deux autres modes de fonctionnement. En effet, en mode activité, les ordinateurs fixes ont une puissance moyenne de 72,3 W alors que celles des portables et ultra-portables sont respectivement de 29,2 et 25,6 W. Il en va de même pour le mode éteint, bien que les puissances soient faibles. Les ordinateurs fixes ont une puissance moyenne de 1,8W alors que les portables sont à 0,4 W et les ultra-portables à 0,1 W. Enfin, l'analyse des puissances pour les écrans montre que les puissances moyennes en activité sont de 35,6 W pour les écrans LCD et de 93 W pour les écrans CRT. Cette différence est plus grande pour les puissances en mode veille : 1W pour les LCD contre 53,4W pour les écrans CRT. L'écart-type pour cette dernière valeur est important, il peut s'expliquer par la taille des différents écrans CRT présents sur le site d'étude. Les grands moniteurs ont une puissance en veille mesurée à 78W alors que celle des petits écrans CRT sont mesurés à 2,8W.

Le profil des stations d'accueil est lié à celui des ordinateurs portables avec une durée en veille plus importante. Ce phénomène peut s'expliquer par le non décrochage immédiat de l'ordinateur lors de sa mise en veille ou de son arrêt, l'ordinateur influant alors sur la station d'accueil à laquelle il est relié.

L'analyse des imprimantes (hors MFP) révèle que ces dernières sont peu utilisées (9 heures cumulées par semaine à une puissance moyenne en activité de 7,7W) mais qu'elles restent allumées durant l'ensemble de la journée de travail soit ± 36 heures par semaine (puissance moyenne en veille de 3,3W). En revanche, en étudiant les réponses aux questionnaires ainsi que le détail des mesures, il est possible de conclure de ce graphique qu'elles sont éteintes durant la nuit et les week-ends avec une puissance moyenne en mode éteint de 0,1W.

Pour comprendre le rythme d'utilisation de l'imprimante multifonction, il est nécessaire de connaître son paramétrage. Ainsi, ce dernier indique que l'imprimante se met en veille au bout de 4 heures de non utilisation. Le système de veille est très différent sur ce type d'équipement, un plateau ne

s'observe pas contrairement aux autres équipements, mais les pics de puissances sont moins élevés. Ainsi, parmi les heures passées en activité, se trouvent également les 4 heures qui s'écoulent chaque soir avant que cette imprimante s'éteigne toute seule (soit 20 heures par semaine). Par conséquent, le profil de l'imprimante multifonction pourrait être traduit par 72 heures d'activité (puissance moyenne de 204W) dont 20 heures de latence avant mise en veille et 95 heures en mode veille (8,8W de puissance en moyenne). Le point négatif révélé par cette analyse est que l'imprimante n'est jamais éteinte. Elle est parfois mise en veille le soir par un membre du personnel ou plus généralement après 4h de non fonctionnement (la programmation permet la mise en veille mais pas l'extinction), cependant il peut être facilement envisageable d'optimiser ce système en réduisant le laps de temps précédent la veille.

Les **serveurs** constituent la catégorie d'équipement avec la plus forte consommation électrique, la puissance en activité la plus élevée et ne sont jamais éteints. Par conséquent, il s'agit d'un véritable point sensible du système informatique actuel sur lequel des solutions d'amélioration seront recherchées et une évaluation des gains en termes de consommation électrique sera réalisée, tout en prenant en considération les contraintes techniques.

Il en va de même pour les **écrans**, second poste de consommation électrique, et dont les possibilités d'arrêt devront être étudiées afin de réduire leur consommation électrique totale. De même, les écrans CRT dont les puissances en veille et en activité sont largement supérieures aux écrans LCD devront faire l'objet d'une étude quant à leur remplacement.

- **Déchets**

Comme indiqué précédemment, l'EMSE est un établissement public administratif, à ce titre elle est soumise au code des marchés publics lors de l'achat de nouveaux équipements. Les équipements deviennent donc propriété de l'état et l'école ne peut s'en séparer sans suivre certaines règles.

Ainsi, lorsque les équipements ne sont plus en état de fonctionner ou deviennent trop anciens, plusieurs possibilités sont alors envisagées par le responsable informatique. Dans la situation où l'équipement ne fonctionne plus, il peut alors devenir un équipement source de pièces détachées pour le personnel du service informatique et ainsi permettre l'entretien et la maintenance des autres équipements. Ensuite, ces équipements seront stockés dans un local dédié avant d'être récupérés par un prestataire extérieur qui assure la gestion des DEEE (prestataire défini lors de l'attribution du marché après appel d'offre). Dans le cas où les équipements peuvent encore être utilisés mais leur fonctionnement devient trop lent pour les utilisateurs ou incompatibles avec l'évolution des logiciels et applications nécessaires, alors deux scénarii sont envisageables :

- Les équipements sont stockés dans l'enceinte de l'EMSE afin de servir de matériel de secours en cas de panne d'un autre équipement,
- Les équipements sont cédés à des associations ou à des écoles afin d'être réutilisés. Pour cela, un document doit être fourni pour expliquer la transmission. Il s'agit d'un document de mise à disposition signé à la fois par le responsable informatique de l'école et l'acquéreur (ou son représentant).

Dans le cadre d'une évaluation environnementale globale, il est indispensable d'identifier les proportions de matériels démantelés / recyclés et ceux qui sont réutilisés dans d'autres sociétés, par exemple. Ainsi, des estimations indiquant la quantité (en kg/an) et un pourcentage d'équipements

retraités et réutilisés devraient être intégrées dans le tableau de bord. Mais ces quantités étant très aléatoires d'une année sur l'autre, il est difficile de définir un profil type et une répartition précise entre les différents scénarii de fin de vie. Par conséquent, dans l'attente d'une quantification plus précise, il a été décidé d'aborder les quantités annuelles de déchets générés chaque année et devant être traités en qualité de DEEE. Pour cela, des hypothèses de poids de chaque matériel ont été faites sur la base des fiches des constructeurs des modèles présents. Ces poids sont présentés dans la Figure 61.

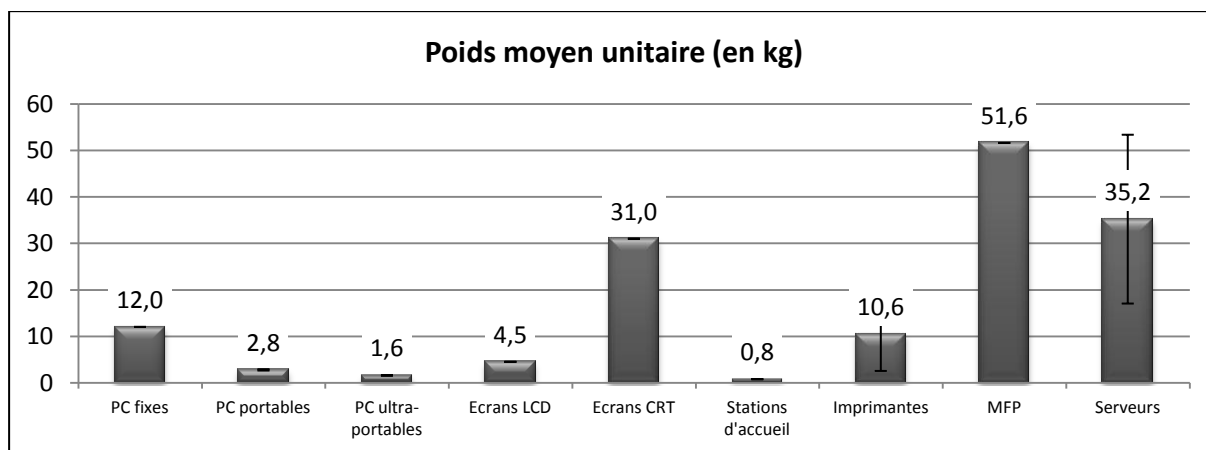


Figure 61: Poids moyen unitaire (en kg) des équipements représentés

Ainsi, les catégories dont les équipements sont les plus lourds unitairement (51,6 kg par unité) sont les imprimantes multifonction, les serveurs avec 35,2 kg en moyenne et enfin les écrans cathodiques avec un poids moyen supérieur à 30 kg par unité. A l'inverse, les stations d'accueil sont les équipements les plus légers avec un poids moyen de 800 grammes. Les portables et ultra-portables ont, par définition, pour point commun d'être mobiles. Leurs poids sont donc parmi les plus faibles du panel d'équipements présents avec respectivement des poids moyens de 2,8 kg et 1,6 kg.

La quantité de ces déchets informatiques générés varie selon les équipements présents. La Figure 62 indique les quantités de déchets informatiques recensées pour le centre SITE en 2010.

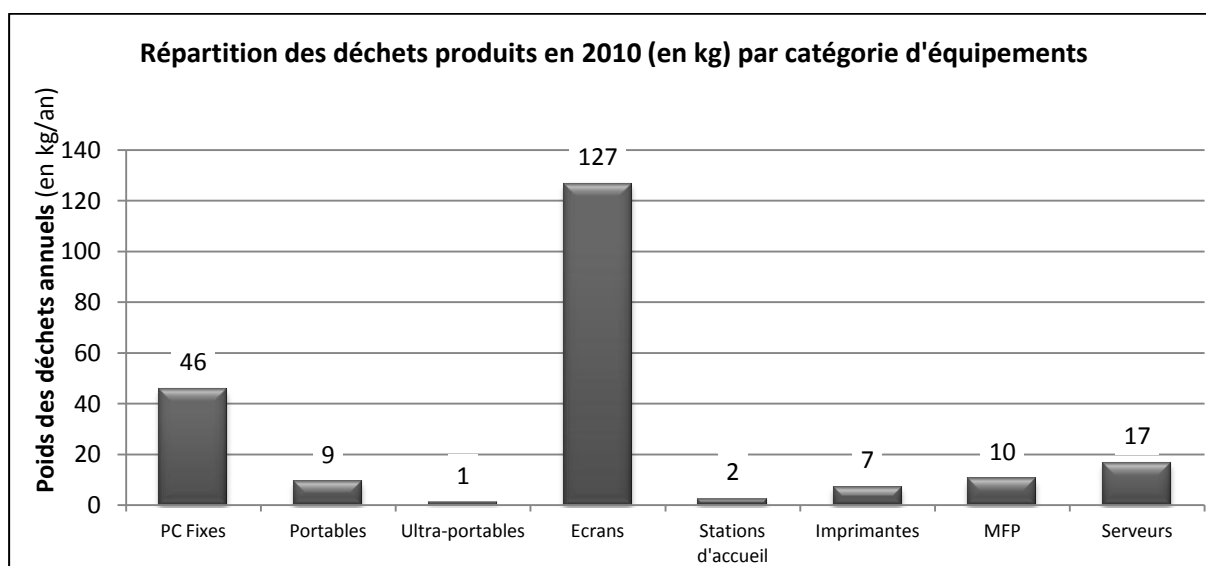


Figure 62 : Répartition de la quantité de déchets recensées par catégorie d'équipements (en kg par an)

Sur les 219 kg de DEEE recensés au total pour l'année 2010 au centre SITE, plus de la moitié étaient des écrans (127 kg). Cette quantité peut s'expliquer par le renouvellement du parc des écrans. En effet, en 2005 il avait été décidé de conserver les écrans CRT pour les personnes travaillant sur des logiciels de cartographie car la qualité de l'image rendue par les écrans LCD ne satisfaisait pas les utilisateurs. En 2009, il a été décidé de remplacer l'ensemble de ce parc par des écrans LCD. Par conséquent, les plus vieux écrans et les plus endommagés ont été remplacés en 2010, alors que les autres sont stockés pour palier à d'éventuels pannes ou besoins ponctuels.

Une grande différence est visible entre les écrans CRT et LCD. En effet, les écrans CRT, très peu produits aujourd'hui, sont de vieux écrans, dont la technologie est ancienne et nécessite à la fois beaucoup d'éléments mais aussi une puissance importante pour leur fonctionnement. La technologie LCD a vu le jour depuis quelques années et est en pleine expansion. En effet, les écrans sont plus performants, facilement maniables, moins encombrants sur les espaces de travail et nécessitent une puissance plus faible pour leur fonctionnement.

Les derniers CRT présents au centre de recherche sont des écrans qui fonctionnent peu car installés sur les postes serveurs. Il est rare d'installer des écrans neufs à ces postes, par conséquent, les vieux écrans CRT fonctionnant toujours mais étant peu confortables pour l'utilisateur sont maintenus à leur niveau, afin de prolonger leur durée d'utilisation et d'éviter des achats pour des équipements qui servent en moyenne moins d'une heure par semaine.

Ainsi, les écrans CRT restent en quantité marginale et ont vocation à disparaître. Par conséquent, aucune étude portant sur leur gestion ne sera menée contrairement aux écrans plats qui feront l'objet de scénarii d'amélioration.

A l'inverse, les écrans LCD sont très répandus et constituent la catégorie d'équipements comprenant le plus d'unités. De ce fait, bien qu'unitairement ils ne soient pas très lourds, la quantité de déchets produite reste importante.

La seconde catégorie d'équipements produisant le plus de déchets sont les ordinateurs fixes avec près de 20 % du poids restant (46 kg). Enfin, les autres catégories d'équipements se partagent le reste des déchets. Ces catégories concernent soit les équipements les plus lourds tels que les serveurs ou l'imprimante multifonction mais qui ont une durée de vie plus élevée (minimum 5 ans) soit les équipements les plus légers comme les stations d'accueil et les ultra-portables, mais avec un amortissement moyen de 3 ans.

Ces résultats concernant les quantités de déchets doivent ainsi être analysés en parallèle de l'analyse du poids unitaire de chaque équipement (Figure 61) ainsi que de la quantité d'équipements présents au sein de l'établissement (Figure 56).

Il est important de noter que les équipements les plus lourds (MFP et serveurs) sont également les équipements dont la durée de vie au sein de l'établissement est la plus longue. Les directives de la direction des services informatiques ont fixé leur durée de vie à 5 ans minimum mais il est fréquent que leur durée de vie soit de 6 ans en moyenne. Ces mêmes directives encouragent une durée de vie de 5 ans pour les ordinateurs fixes et de 3 ans pour les ordinateurs portables et ultra-portables. Ainsi, les impacts liés à l'amortissement de ces équipements sont répartis sur plus d'années que les autres d'équipements. Néanmoins, un scénario d'augmentation de la durée de vie de ces équipements sera étudié pour quantifier les gains potentiels.

De plus, à ces DEEE, viennent s'ajouter les consommables tels que les cartouches d'encre qui regroupent les toners pour le MFP et les cartouches pour les petites imprimantes de bureau. Ainsi, durant l'année 2010, 16 toners ont été nécessaires pour le MFP pour l'activité du centre de recherche soit 11 toners noirs, 2 toners cyan, 2 toners magenta et 1 toner jaune. De même, 14 cartouches pour les petites imprimantes ont été utilisées (8 cartouches d'encre noire et 6 cartouches d'encre couleur) sur les deux imprimantes petits modèles présentes.

La consommation annuelle de papier a été estimée à 780 ramettes de feuilles A4 et 4 ramettes de feuilles A3. Soit un total de 392 000 feuilles A4 imprimées annuellement représentant un poids total de 1,97 tonne papier. Nous estimons que 70% de ce papier est conservée sous forme d'archives, les 30% restants correspondent donc aux déchets papiers produits soit **1,38 tonne de déchet papier**.

3.3.2 Indicateurs d'impacts environnementaux

Les impacts environnementaux évalués lors de cette seconde application sont plus nombreux que lors de la première application présentée précédemment suite aux compléments apportés à la méthodologie. Ainsi, à l'évaluation des émissions en gaz à effet de serre viennent s'ajouter :

- la contribution à l'épuisement de l'ozone stratosphérique
- la contribution à l'épuisement des ressources fossiles
- l'acidification
- l'écotoxicité (terrestre, aquatique et marine) au niveau des eaux et des sédiments
- la toxicité humaine
- les radiations ionisantes

Les facteurs de caractérisation pour ces impacts sont extraits de la base de données Ecoinvent, la méthode de comptabilisation des impacts sélectionnée est CML 2001 pour trois raisons :

1. il s'agit d'une méthode de calculs fréquemment utilisée lors de la réalisation d'ACV ;
2. elle permet d'exprimer l'ensemble des impacts environnementaux retenus pour l'étude ;
3. elle a été utilisée pour exprimer les impacts du plus grand nombre d'équipements informatiques, parmi les données disponibles dans Ecoinvent.

Néanmoins, la base de données ne recense pas l'ensemble des équipements présents au centre de recherche. Par conséquent, des hypothèses ont dû être établies afin de permettre l'expression des différents impacts environnementaux et pour toutes les catégories d'équipements. Ces hypothèses sont mentionnées dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Hypothèses ayant permis l'expression des impacts environnementaux des différentes catégories d'équipements présents

	Hypothèses
Ordinateurs fixes	Facteurs d'émissions disponibles dans la base de données.
Ordinateurs portables	Facteurs d'émissions disponibles dans la base de données.
Ordinateurs ultra-portables	Hypothèse basée sur les émissions liées à la production d'un ordinateur portable, au <i>pro rata</i> du poids d'un ultra-portable. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations des constructeurs pour les modèles d'ultra-portables présents.
Ecrans	Facteurs d'émissions disponibles dans la base de données.
Stations d'accueil	Hypothèse d'équivalence entre les stations d'accueil et les imprimantes de part la taille des équipements et la complexité du système.
Imprimantes	Facteurs d'émissions disponibles dans la base de données.
Imprimantes multi fonctions	Application du coefficient multiplicateur existant entre les facteurs d'émission d'un ordinateur fixe et une MFP dans la méthode Bilan Carbone®
Serveurs	Hypothèse basée sur les émissions liées à la production de l'unité centrale d'un ordinateur, au <i>pro rata</i> du poids d'un serveur. Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations des constructeurs pour les modèles de serveurs présents.

- **Résultats pour les émissions de gaz à effet de serre**

La contribution au changement climatique a été évaluée par deux méthodes d'une part à l'aide des facteurs de caractérisation de CML 2001 et, d'autre part, avec la méthode Bilan Carbone®. Les facteurs d'émissions utilisés pour réaliser les calculs sont présentés dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Facteurs d'émissions et de caractérisation utilisés pour l'expression de l'impact sur le changement climatique

	Facteur d'émission Méthode Bilan Carbone® ADEME (Guide FE v6.1 juin 2010)		Facteur de caractérisation Climate change (GWP 100a) CML 2001 (Ecoinvent v2.1 2009)
	kg C éq.	Kg CO ₂ éq. *	kg CO ₂ éq.
Ordinateur fixe	350,6	609,8	270,3
Ordinateur portable	67,8	248,0	249,8
Ordinateur ultra-portables	38,6	141,3	142,4
Ecran	186,3	681,9	562,3
Station d'accueil	30,0	109,8	67,1
Imprimante (couleur)	30,0	109,8	67,1
Imprimante (noir & blanc)	30,0	109,8	67,1
MFP	800,0	2 928,0	616,8
Serveurs	580,7	2 125,4	447,7
Consommation de 1 kWh d'électricité (mix français)	0,023	0,084	0,087

* 1 kg C éq. = 3,67 kg CO₂ éq.

Les résultats obtenus avec ces deux approches sont présentés dans la Figure 63a pour l'amortissement des équipements et dans la Figure 63b pour la phase d'utilisation.

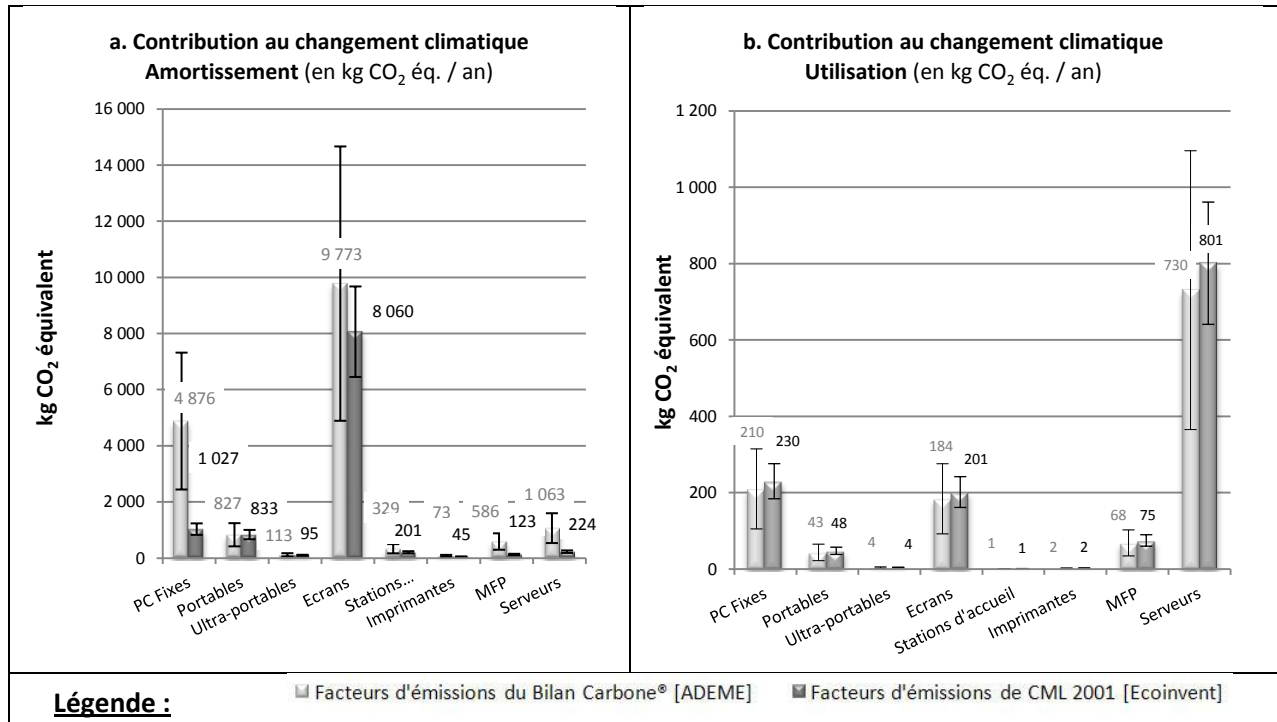


Figure 63 : Expression de l'impact « contribution au changement climatique » exprimé en kg CO₂ équivalent lors de la phase de fabrication (amortissement) et d'utilisation des équipements.

Alors que pour la majorité des équipements les résultats obtenus par les deux méthodes sont sensiblement identiques, ils peuvent grandement différer pour d'autres. C'est le cas pour les ordinateurs fixes dont l'impact final relatif à la contribution des équipements au changement climatique diffère selon si les coefficients de conversion proviennent du Bilan Carbone® de l'ADEME ou de la méthode CML 2001. Cette dernière attribue des coefficients plus faibles pour l'amortissement de la majorité des catégories d'équipements (ordinateurs fixes, écrans, station d'accueil, imprimantes, MFP et serveurs). L'explication principale de cette différence réside dans le périmètre d'étude considéré. En effet, alors que le périmètre d'étude des facteurs d'émissions calculés dans Ecoinvent (dont CML 2001) s'intéresse aux matériaux utilisés, au processus de fabrication et à l'emploi d'énergie au cours de ce processus, le Bilan Carbone® intègre la part des émissions liées à la fabrication de l'usine de production.

Les catégories ordinateurs portables et ultra-portables ont des coefficients d'émissions très proches ce qui nous permet de dire qu'il n'existe pas de différence pour ces équipements entre la méthode Bilan Carbone® et CML 2001. Il en va de même pour le facteur d'émission relatif à l'utilisation de 1 kWh : 0,084 kg CO₂ équ. pour la méthode Bilan Carbone® et 0,087 kg CO₂ équ. pour CML 2001.

Ainsi, pour un même équipement, les facteurs peuvent être proches alors qu'ils seront sensiblement différents pour un autre équipement. La problématique des méthodes de calculs permettant d'aboutir à ces facteurs est analysée dans le chapitre 4. De même, l'influence du choix des facteurs de conversion sera analysée plus en détail dans le Chapitre 4.

Ainsi, bien que l'écart entre les deux sources utilisées diffère selon les équipements, les impacts estimés à l'aide des coefficients de la méthode CML 2001 restent inférieurs à ceux évalués par la méthode Bilan Carbone® pour l'amortissement des équipements. L'explication provenant probablement du périmètre d'étude considéré lors de la phase d'évaluation des impacts. Le Bilan Carbone® intégrant un périmètre plus grand exprime un impact plus important. De plus, il existe de fortes incertitudes sur les valeurs attribuées à ces coefficients.

- ***Les autres indicateurs d'impacts environnementaux***

Les impacts environnementaux ajoutés lors de cette seconde application concernent :

- la contribution à l'épuisement de l'ozone stratosphérique
- la contribution à l'épuisement des ressources fossiles
- l'acidification
- l'écotoxicité (terrestre, aquatique et marine) au niveau des eaux et des sédiments
- la toxicité humaine
- les radiations ionisantes

Le Tableau 32 recense les résultats des calculs pour les différents facteurs de caractérisation. Les facteurs extraits de la base de données sont mentionnés en écriture normale alors que les facteurs issus des hypothèses et des calculs sont mentionnés en écriture italique. Ainsi, les facteurs de caractérisation des équipements relatifs aux indicateurs d'impacts environnementaux sont soit extraits de la base de données Ecoinvent, soit calculés sur la base des hypothèses du Tableau 30.

Tableau 32 : Facteurs de caractérisation utilisés dans l'étude

	Epuisement de l'ozone stratosphérique	Epuisement des ressources fossiles	Acidification	Ecotoxicité					Toxicité humaine	Radiation ionisante
				Ecotoxicité d'eau douce	Ecotoxicité des sédiments d'eau douce	Ecotoxicité d'eau marine	Ecotoxicité des sédiments d'eau marine	Ecotoxicité terrestre		
				kg CFC-11-Eq	kg antimoine-Eq	kg SO ₂ -Eq	kg 1,4-DCB-Eq			
Ordinateur fixe	4,18 ^E -05	1,96	1,82	564,34	1 121,00	2 024,90	2 052,30	0,21	303,03	2,45 ^E -06
Ordinateur portable	3,75 ^E -04	1,20	1,15	336,04	675,39	1 200,70	1 229,20	0,11	190,51	1,48 ^E -06
Ordinateur ultra-portables *	2,14 ^E -04	0,68	0,65	191,51	384,90	684,27	700,51	0,06	108,57	8,46 ^E -07
Ecran LCD	2,57 ^E -05	2,14	2,12	313,09	613,82	1 142,10	1 131,50	0,16	278,06	1,93 ^E -06
Ecran CRT	3,00 ^E -05	1,87	1,84	442,50	883,10	1 610,70	1 618,00	0,18	655,25	1,80 ^E -06
Station d'accueil *	2,38 ^E -06	0,35	0,23	52,53	119,94	185,93	214,52	0,02	146,70	2,50 ^E -07
Imprimante	2,38 ^E -06	0,35	0,23	52,53	119,94	185,93	214,52	0,02	146,70	2,50 ^E -07
MFP *	9,53 ^E -05	4,48	4,16	1 287,71	2 557,90	4 620,42	4 682,94	0,47	691,45	5,59 ^E -06
Serveurs *	6,92 ^E -05	3,25	3,02	934,74	1 856,76	3 353,93	3 399,32	0,34	501,92	4,06 ^E -06
Consommation de 1 kWh d'électricité (mix français)	6,40E-09	5,91E-04	5,06E-04	3,70E-02	7,98E-02	1,44E-01	1,51E-01	3,15E-05	8,80E-02	2,33E-08

* Les facteurs d'émissions mentionnés en italique sont issus des calculs basés sur les hypothèses présentées précédemment (Tableau 30).

Les résultats de la quantification des impacts potentiels sont présentés dans la Figure 64. Les unités étant différentes, les résultats ne peuvent pas être directement comparés entre eux. Néanmoins, pour chaque impact, il est possible d'établir quelle est la catégorie d'équipement la plus impactante ainsi que les proportions entre les différentes catégories d'équipements (Figure 64). De plus, ce graphique permet également de distinguer la contribution de chaque catégorie d'équipement en fonction de l'amortissement (fabrication) des équipements et de leur utilisation.

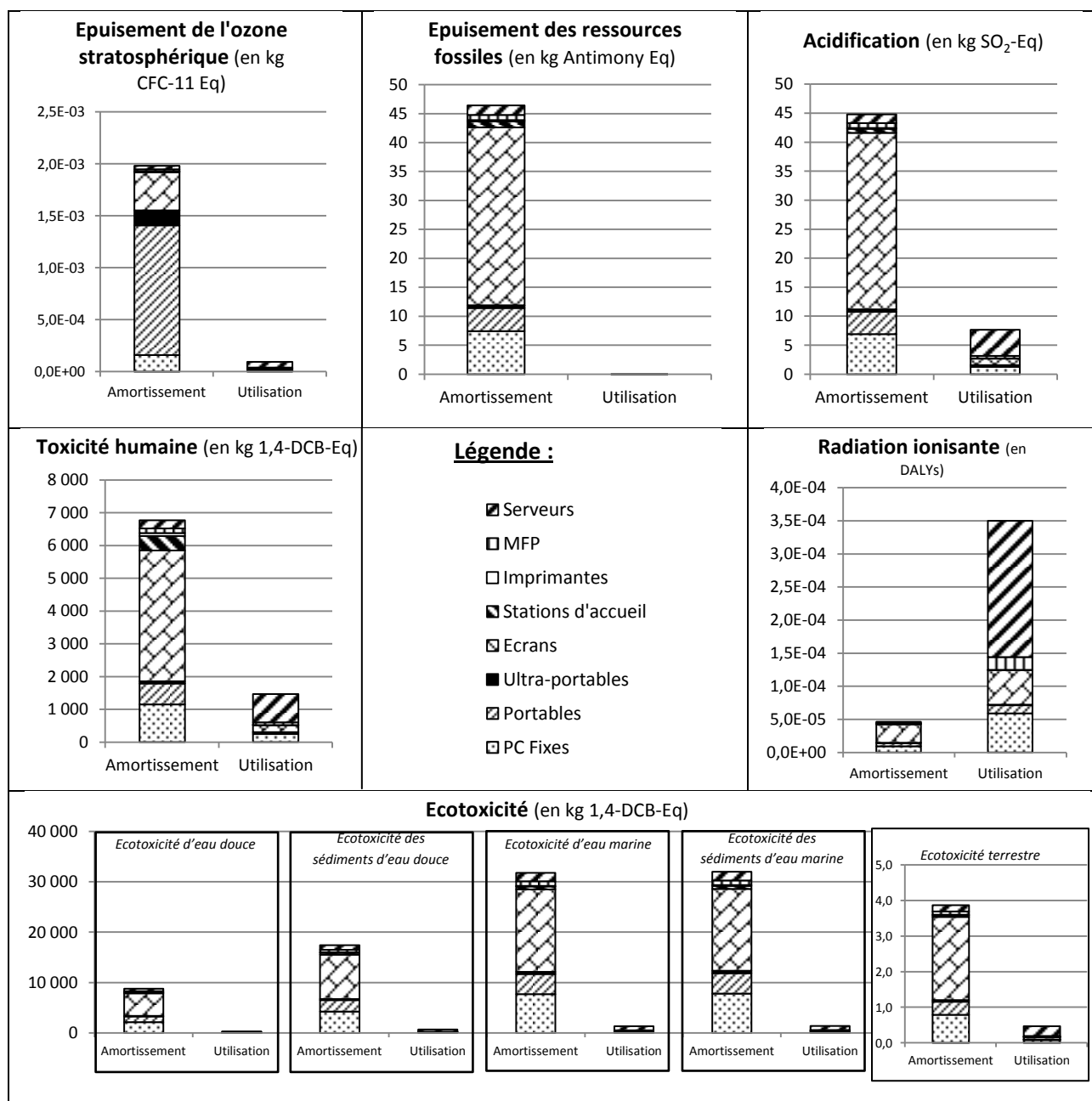


Figure 64: Impacts environnementaux potentiels liés à l'ensemble du parc informatique du centre SITE.

Impacts liés à l'amortissement des équipements :

Ainsi, comme pour les émissions de GES, les écrans sont les équipements ayant le plus d'impacts. Ils représentent entre 40 et 57 % de quatre d'entre eux : l'épuisement des ressources fossiles, l'acidification, l'écotoxicité et la toxicité humaine). Notons que la fabrication d'un écran émet moins

qu'un ordinateur (Tableau 32) (valable pour tous les impacts exceptés l'épuisement des ressources fossiles et l'acidification). Cependant, ce chiffre est rapporté au nombre (l'inventaire donne deux fois plus d'écrans que d'ordinateurs), l'impact des écrans est plus important que celui des ordinateurs.

La seconde catégorie concerne les ordinateurs fixes avec 23 à 32 % des impacts. La plus faible catégorie étant représentée par les ultra-portables (0,2 % en moyenne).

Ainsi, ces résultats doivent être mis en perspectives avec la quantité d'équipements présents dans chaque catégorie (présentée précédemment dans la Figure 56). Les écrans appartiennent à la catégorie la plus nombreuse alors que seulement deux ultra-portables sont présents.

Par conséquent, les résultats obtenus pour les impacts « épuisement des ressources fossiles », « acidification », « écotoxicité totale » et « toxicité humaine » sont cohérents avec les quantités respectives des équipements dans chaque catégorie.

En revanche, ces résultats ne sont pas les mêmes concernant les deux autres impacts environnementaux. Ainsi, l'impact « épuisement de l'ozone stratosphérique » laisse apparaître les ordinateurs portables comme la catégorie ayant le plus d'impact (60% de l'impact total). Les écrans représentent la seconde catégorie avec 19% des impacts et les ordinateurs fixes la troisième catégorie avec 9%. Les ultra-portables, bien que seulement deux unités soient présentes contribuent à hauteur de 7% de cet impact. Une explication de cette hiérarchie dans les catégories d'impact trouve sa source dans la présence de lampes sur ces équipements pour constituer les écrans. Ces lampes renferment des composés pouvant interagir avec les composés de l'atmosphère et ainsi dégrader la couche d'ozone. Une seconde explication réside dans l'existence de batteries sur les modèles d'ordinateurs portables et d'ultra-portables. Ces dernières peuvent varier en composition mais contiennent des composés chlorés et fluorés pouvant engendrer un impact sur la couche d'ozone. Les imprimantes, avec seulement 0,1 % de l'impact constituent la catégorie d'équipement contribuant le moins au phénomène d'épuisement de l'ozone stratosphérique.

Enfin, le dernier profil concerne l'impact sur les radiations ionisantes où ce sont les écrans qui constituent la catégorie ayant le plus d'impact (60% de l'impact). Les ordinateurs fixes et les portables sont respectivement seconde (20%) et troisième (11%) catégorie. Les imprimantes sont une nouvelle fois la catégorie la moins impactante avec 0,2% de l'impact total.

Pour conclure, les résultats concernant la contribution de chaque catégorie d'équipements aux impacts environnementaux varient en fonction de l'impact considéré. Un profil commun à cinq des sept impacts environnementaux (« contribution au changement climatique », « épuisement des ressources fossiles », « acidification », « écotoxicité totale » et « toxicité humaine ») indique que pour la phase d'amortissement, ce sont les écrans qui ont le plus d'impact, suivis des ordinateurs fixes puis des ordinateurs portables.

Pour l'impact « épuisement de l'ozone stratosphérique », ce sont les ordinateurs portables qui représentent l'impact le plus important, puis les écrans et enfin les ordinateurs fixes.

Enfin, pour l'impact relatif aux « radiations ionisantes », les écrans sont la catégorie d'équipements ayant le plus d'impact suivis par les ordinateurs fixes et les portables.

Impacts liés à l'utilisation des équipements :

Seul l'impact exprimant les « radiations ionisantes » indique que la phase d'utilisation engendrerait un impact plus important que la phase de fabrication. Ce résultat, bien que surprenant peut trouver une explication dans l'emploi du mix électrique français pour le calcul des impacts liés à la phase d'utilisation. En effet, le mix électrique français est essentiellement basé sur de l'énergie nucléaire (75 % de l'électricité française). Cette composante nucléaire permet ainsi de réduire certains impacts comme les émissions de gaz à effet de serre mais engendre des impacts plus importants sur les radiations ionisantes.

Pour vérifier l'influence de ce mix électrique, les mêmes calculs ont été réalisés en utilisant les coefficients pour le mix européen. Les résultats sont présentés dans la Figure 65.

L'emploi des facteurs de caractérisation du kWh européen, engendre une augmentation de la part des émissions liées à la phase d'utilisation pour l'ensemble des impacts environnementaux évalués exceptés l'impact sur la toxicité humaine et les radiations ionisantes. Pour l'impact relatif à la toxicité humaine, les émissions totales équivalent à 1 300 kg 1,4-DCB Eq avec le coefficient du mix français et de 1 100 kg 1,4-DCB Eq avec le coefficient du mix européen. Ces résultats sont donc très proches. En revanche, pour l'impact sur les radiations ionisantes, le changement de coefficient génère une différence importante au niveau de la valeur de l'impact. Ainsi, $3,43 \cdot 10^{-4}$ DALYs sont issus de l'utilisation avec le facteur d'émission français, le facteur d'émission européen engendrant moitié moins d'impact ($1,17 \cdot 10^{-4}$ DALYs).

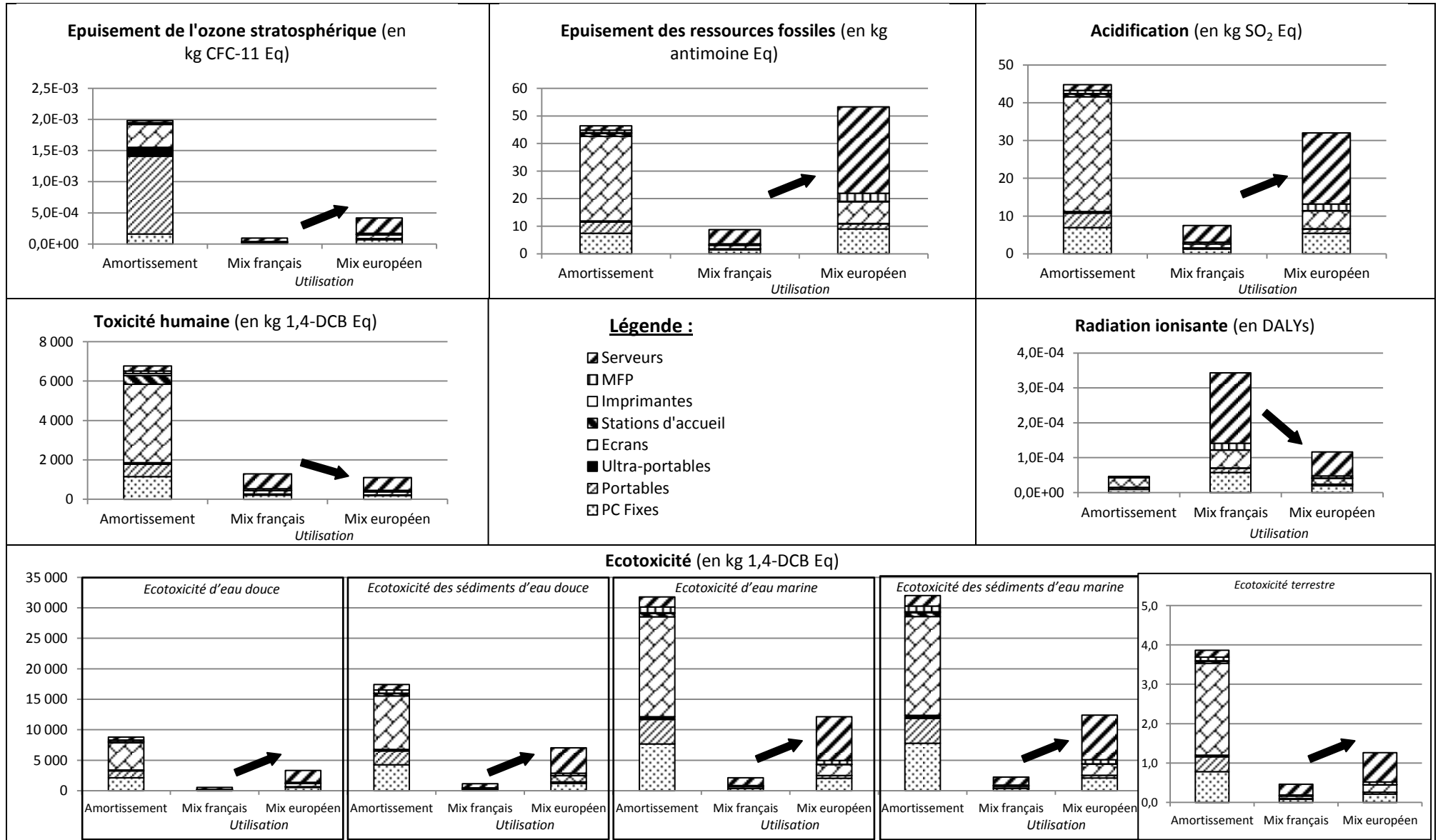


Figure 65 : Expression des impacts environnementaux liés à l'amortissement et à l'utilisation des équipements

Impacts liés aux impressions

La quantité de papier utilisée a pu être estimée précédemment à 1,97 tonne de papier utilisées annuellement. Les impacts liés à cette utilisation ont ainsi pu être quantifiés. Les facteurs d'émissions et les résultats pour chaque impact sont présentés dans le Tableau 33.

Tableau 33: Impacts environnementaux liés à la consommation de papier

	Unités	Facteurs de caractérisation pour 1 kg de papier (CML 2001)	Impacts environnementaux calculés	
Climate change	kg CO ₂ -Éq.	1,56	3 072,63	
Epuisement de l'ozone stratosphérique	kg CFC-11-Eq	1,98E-07	3,91E-04	
Epuisement des ressources fossiles	kg antimony-Eq	1,13E-02	22,18	
Acidification	kg SO ₂ -Eq	6,11E-03	12,03	
Ecotoxicité	Freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	4,97E-01	979,10
	Freshwater sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,08	2 122,91
	Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,81	3 563,54
	Marine sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,95	3 843,20
	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,18E-02	23,20
Toxicité humaine	kg 1,4-DCB-Eq	4,51E-01	889,01	
Radiation ionisante	DALYs	9,29E-09	1,83E-05	

Les unités employées pour exprimer les impacts environnementaux étant différentes, il n'est pas possible d'établir un graphique avec ces différents impacts. De même, s'agissant d'impacts différents, aucune hiérarchie ne peut permettre de dire quel impact est le plus important. Néanmoins, cette quantification des impacts permet d'établir un état de référence qui servira notamment lors de la cinquième étape de la méthodologie visant à évaluer les gains réalisables. Les impacts calculés dans le Tableau 33 seront alors comparés aux impacts estimés suite à l'application de solutions d'amélioration.

3.4 Etape 5 : Evaluation des gains

3.4.1 Améliorations possibles

Lors de la réalisation de cette étude, plusieurs pistes d'amélioration ont été évoquées afin de minimiser les impacts environnementaux des équipements informatiques. Néanmoins, les équipements et le fonctionnement de l'organisation étant totalement différentes du premier cas d'application, les solutions d'amélioration proposées précédemment ne peuvent être appliquées. En effet, les serveurs sont relativement récents et déjà labellisés, les actions visant à les remplacer ou à les virtualiser ne paraissent pas adaptées. Il en va de même pour la transformation des postes en client léger, généralement adaptées pour une grande quantité de postes effectuant des tâches similaires, ce qui n'est pas le cas pour un centre de recherche.

Le matériel présent au sein de l'organisation est dépendant du nombre de personnes présentes ainsi, peu d'équipements en surplus sont comptabilisés sur l'ensemble du périmètre. Les équipements non utilisés restants servant généralement d'équipements de secours en cas de panne ou de matériel de prêt. De plus, le choix des équipements lors de l'arrivée d'un nouveau membre du personnel est dépendant de l'utilisation que ce dernier aura de l'équipement. Ainsi, les personnes réalisant des

calculs ou des modélisations (cartographie en deux et trois dimensions) sont équipées d'ordinateurs puissants et d'écrans adaptés à ce type de travail (minimum deux écrans plats par poste). En revanche, d'autres personnes n'auront pas besoin de ces caractéristiques mais auront intérêt à gagner en mobilité (cours, déplacements,...). Ces dernières seront alors équipées de modèles d'ordinateurs portables voire ultra-portables. La présence de stations d'accueil ou de port réplicator pour ces postes est récente. Les premiers sont apparus à la fin de l'année 2008. Des stations d'accueils (ou port réplicator) sont désormais systématiquement commandées lors de l'achat de nouveaux ordinateurs portables et ultra-portables pour des questions de confort de l'utilisateur.

Par conséquent, si peu d'actions peuvent être envisagées concernant le choix des équipements, les actions qui feront l'objet d'évaluation des gains potentiels porteront essentiellement sur le comportement des utilisateurs.

Ainsi, une liste de bonnes pratiques d'utilisation des équipements a été élaborée. Pour chacune d'elles, le gain potentiel relatif à son application sera évalué afin d'en déterminer la pertinence ou non et quel serait l'intérêt de l'organisation de se lancer dans leur application systématique.

Les actions retenues sont les suivantes :

- **Action veille programmée** : Paramétrage de la veille

L'action consiste à paramétrer la veille le plus efficacement possible.

- **Action veille utilisateur** : Mise en veille de l'ordinateur lors d'une absence prolongée du bureau

L'action est basée sur le comportement de l'utilisateur qui devra mettre son ordinateur en mode veille lorsqu'il s'absente de manière prolongée (au-delà de 15 minutes) de son poste de travail.

- **Action extinction totale** : Eteindre les ordinateurs fixes, débrancher les portables et ultra-portables la nuit et le week-end

L'action consiste à éteindre les ordinateurs fixes systématiquement et à débrancher les portables et ultra-portables ainsi que l'ensemble des périphériques.

- **Action MFP** : Paramétrage de l'imprimante multifonction

L'action consiste à changer le paramétrage de l'imprimante multifonction afin de limiter les temps en veille, phase consommatrice en électricité.

- **Action impression** : Gérer les impressions

L'action consiste à appliquer des bonnes pratiques en gestion de l'impression afin de diminuer les consommations de papier et d'encre.

3.4.2 Chiffrage des améliorations : Méthodes de calculs et hypothèses

Le chiffrage des améliorations est basé sur une évaluation des actions retenues à la fois en termes environnementaux et économiques en utilisant l'indicateur d'éco-efficience. Dans le cadre de la mise en place de la méthodologie, plusieurs impacts environnementaux ont été estimés. Par conséquent, l'expression des gains environnementaux se basera sur ces mêmes indicateurs et tentera d'estimer les gains financiers potentiellement réalisables par la mise en place de ces actions.

Contrairement à l'application précédente, les actions d'amélioration sélectionnées font en majorité référence aux comportements des utilisateurs. Par conséquent, les gains peuvent être cumulés en appliquant simultanément l'ensemble de ces actions. L'évaluation du gain total réalisable, en cumulant l'ensemble de ces actions, conclura cette partie sur le chiffrage des améliorations.

- **Action veille programmée**

La première action est basée sur le paramétrage de la mise en veille, il est donc important de connaître quel mode de mise en veille doit être privilégié pour optimiser la consommation électrique. Des mesures ont donc été réalisées pour comparer les différents fonds d'écran de veille disponibles sous Windows et ainsi définir le mode de veille à choisir. La Figure 66 représente les résultats de ces mesures. Les mesures tiennent compte à la fois de la consommation de l'unité centrale d'un ordinateur fixe et de son écran plat. Les modèles d'ordinateurs et d'écrans pouvant varier, il est important ici de tenir compte des variations pouvant être obtenues pour un même modèle en variant les paramètres de la mise en veille. Les barres d'erreur présentées sur la Figure 66 expriment l'écart-type observé pour le mode de veille étudié. Pour la suite de l'évaluation nous chiffrerons les gains d'énergie potentiellement réalisables en fonction d'un pourcentage de gain d'un paramètre à l'autre.

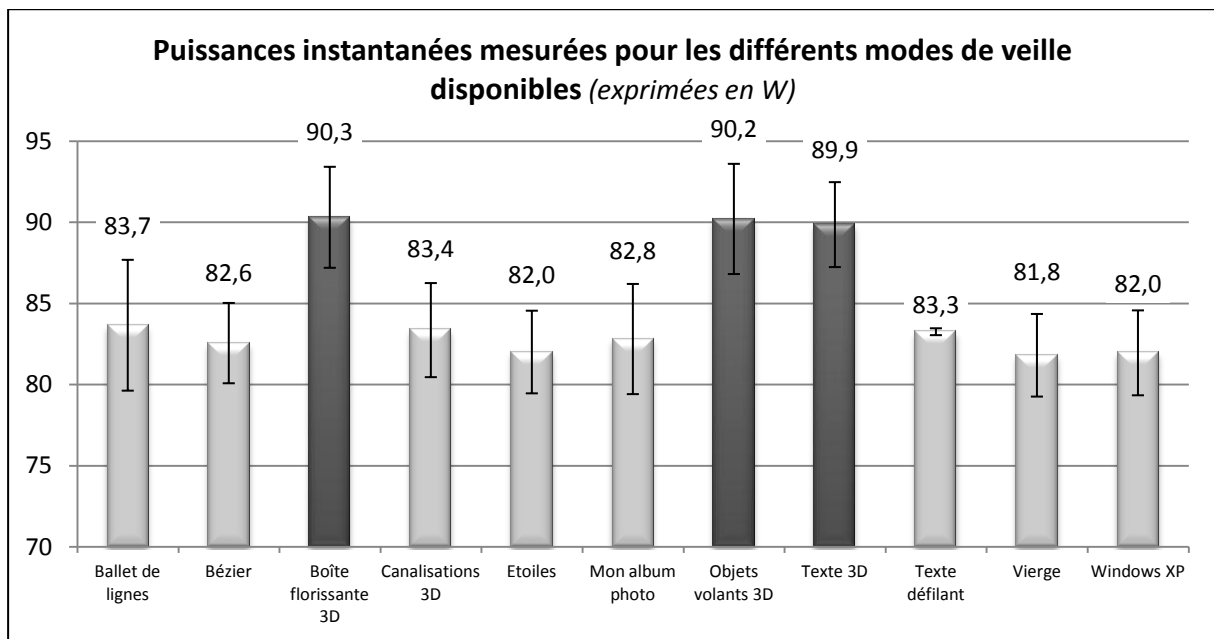


Figure 66: Comparaison des puissances pour les différents modes de veille (puissances moyennes mesurées, exprimées en W)

Bien que les puissances mesurées soient relativement proches les unes des autres, deux groupes de mise en veille se distinguent. Un premier groupe composé des modes en 3D (Boîte florissante, Objets volants et Texte) avec des puissances moyennes mesurées entre 89,9 W et 90,3 W et un second groupe composé des autres modes disponibles dont les puissances instantanées varient de 81,8 W à 83,7 W.

Le passage de la première catégorie de mode veille à la seconde engendre **une économie de 8%** d'énergie (sur les consommations d'électricité relatives aux phases de veille des équipements).

Ces mesures nous permettent donc de recommander le **mode de veille vierge** pour diminuer la consommation électrique liée aux périodes de veille des ordinateurs. En particulier, les modes 3D semblent devoir être évités.

- **Action veille utilisateur**

La seconde action est également en rapport avec la mise en veille. Il s'agit d'encourager les utilisateurs à mettre leur ordinateur en veille lors d'une absence prolongée de leur bureau. En effet, il est courant que lors de pauses (café ou lors du déjeuner) ou de réunions, les équipements soient laissés en l'état en sortant du bureau. La mise en veille, si elle n'a pas été supprimée, se produit alors dans un laps de temps pouvant varier de 15 à 30 minutes. Si l'utilisateur avait basculé son équipement en veille, la consommation électrique aurait été moindre.

Cette solution a été mise en place sur différents postes. En comparant les profils utilisateurs avant et après l'application de cette solution, il a été observé que la durée de la veille augmentait en moyenne de 4 %. Ce même pourcentage étant décompté de la durée d'activité de l'équipement.

Par conséquent dans le chiffrage des améliorations, 4 % du temps en veille a été ajouté au temps mesuré en veille sur l'ensemble des postes utilisateurs et cette durée a été soustraite à la durée d'activité de ces mêmes postes. Cette action représente une **économie de 53 kWh** de consommation électrique annuelle.

- **Action extinction totale**

La grande majorité des utilisateurs éteignent leurs équipements la nuit et les week-ends. Ils peuvent rester allumés de manière occasionnelle lors d'opérations de calculs longues ou de téléchargements lourds mais cela ne représente qu'une dizaine de nuits par an. Cependant, il a été constaté que plusieurs écrans restaient allumés la nuit alors que les ordinateurs étaient éteints. Il semble donc pertinent d'agir sur le comportement des utilisateurs afin que ces derniers les éteignent systématiquement en partant du bureau. L'extinction des écrans la nuit et les week-ends représente une économie énergétique de 0,44 kWh par an et par écran soit 18,92 kWh pour l'ensemble des écrans du centre SITE.

Si cette valeur est faible pour les écrans, cette solution devient beaucoup plus intéressante pour les équipements collectifs qui ne sont pas éteints. Il s'agit notamment des serveurs et de l'imprimante multifonction. L'imprimante multifonction fait l'objet d'un paramétrage spécifique, elle sera évaluée lors de l'action suivante (Action 4 : MFP – Paramétrage de l'imprimante).

Bien que les serveurs soient accessibles la nuit et les week-ends par l'intermédiaire d'une plateforme d'accès à distance protégée, l'hypothèse de leur extinction en dehors des heures de bureau a été évoquée à de nombreuses reprises. Nous calculons donc le gain potentiellement réalisable par cette action.

Considérons que les bureaux sont accessibles de 7h30 à 20h, cinq jours par semaine et que les serveurs doivent être, au minimum, opérationnels durant toute cette période. Posons l'hypothèse

que certaines personnes peuvent travailler le soir à leur domicile et peuvent ainsi avoir besoin de leur fonctionnement jusqu'à minuit. Les serveurs peuvent donc être éteints de minuit à 7h30 en semaine ainsi que le week-end soit 85h30 par semaine ce qui représente près de la moitié du temps (50,9 %). La consommation annuelle des serveurs pourraient ainsi être diminuée de plus de la moitié.

Notons cependant que cette solution engendre un ensemble de considérations techniques à prendre en compte comme par exemple la durée de rallumage ou encore les risques liés à une extinction répétée. A ces contraintes techniques s'ajoutent une utilisation aléatoire des serveurs durant la nuit afin de réaliser par exemple des mises à jour ou des calculs importants nécessitant beaucoup de temps.

L'application de cette solution, d'après les hypothèses ci-dessus, aboutit à une consommation annuelle des serveurs équivalente à environ la moitié de la consommation électrique actuelle soit **4 416 kWh d'électricité économisés par an.**

- **Action MFP**

Tout comme les serveurs, l'imprimante multifonction constitue un poste de consommation énergétique relativement important. Cependant, cette consommation électrique doit être mise au regard du nombre de personnes utilisant cet équipement.

Le MFP représente le 4^{ème} poste de consommation électrique (810 kWh par an) après les serveurs (8 676 kWh par an), les ordinateurs fixes (2 363 kWh par an) et les écrans (2 183 kWh par an) (Figure 58). Mais le MFP est une catégorie d'équipements représentée par un seul poste contrairement aux autres catégories qui regroupent de nombreuses unités. Ainsi, en comparant ces consommations à la quantité d'équipements de chaque catégorie, le MFP se retrouve seconde catégorie après les serveurs.

De plus, tout comme les serveurs, le MFP est un équipement multiutilisateur. Sa consommation doit donc être répartie sur l'ensemble du personnel utilisateur. Du fait de son grand nombre d'utilisateurs, le MFP est géré par l'intermédiaire d'une interface interactive qui permet de programmer ses phases de veille et d'extinction.

Actuellement le paramétrage est fixé à 4h d'inactivité pour un passage en veille. Le MFP n'est jamais éteint, il est en veille prolongée, ce qui lui permet d'être réveillé à tout moment. Nous étudions ici la possibilité du passage en veille après 2 heures d'inactivité au lieu de 4 heures.

Avec les mesures réalisées, la consommation annuelle du MFP était de 810 kWh. En modifiant les paramètres, la consommation annuelle est de 708 kWh soit une économie de **102 kWh par an.**

- **Action impressions**

L'étude ADEME / BioIS de Juillet 2010 [Bio Intelligence Service et ADEME, 2011] présente les bonnes pratiques d'action d'impression. Elle compare les impacts environnementaux liés à l'utilisation de différents modes de communication électronique. Il est alors possible d'avoir des indications relatives à des bonnes pratiques dans le domaine comme l'utilisation de papier recyclé ou encore la limitation des impressions. Les propositions peuvent également s'appuyer sur des ACV réalisées dans différents domaines pour indiquer des solutions à moindre impact environnemental.

Ainsi, concernant les impressions, l'étude indique que la réduction de 10% des courriels imprimés, représente 5 tonnes de CO₂ non émis dans l'atmosphère. Pour notre étude, nous avons quantifié quels seraient les gains si l'organisation atteignait l'objectif de 10% d'impression de papier en moins. Ces 10 % représentent 79 ramettes de papier A4 (par an) soit près de 2 tonnes de papier. Cette diminution ne peut être que bénéfique pour l'environnement. Les gains environnementaux relatifs à ces 10% d'impression en moins sont exprimés dans le Tableau 34.

Tableau 34: Impacts environnementaux évités en réalisant une économie de 10% d'impression

Impact environnemental considéré	Gain environnemental réalisé
Climate change (GWP 100a)	123 kg eq. CO ₂
Epuisement de l'ozone stratosphérique	1,56 ^E -05 kg eq. CFC-11
Epuisement des ressources fossiles	0,89 kg eq. antimony
Acidification	0,48 kg eq. SO ₂
Freshwater aquatic ecotoxicity	39,2 kg eq. 1,4-DCB
Freshwater sediment ecotoxicity	84,9 kg eq. 1,4-DCB
Marine aquatic ecotoxicity	142,5 kg eq. 1,4-DCB
Marine sediment ecotoxicity	153,7 kg eq. 1,4-DCB
Terrestrial ecotoxicity	0,93 kg eq. 1,4-DCB
Toxicité humaine	421,3 kg eq. 1,4-DCB
Radiation ionisante	35,6 DALYs

Notons que bien que nous préconisons une diminution de 10%, les impressions papiers ne peuvent pas être totalement supprimées. De plus, la lecture de documents volumineux pourrait engendrer une consommation électrique de l'ordinateur dont les impacts environnementaux seraient supérieurs à l'impression de ce même document [Bio Intelligence Service et ADEME, 2011].

Financièrement, cette diminution de l'impression représente 4 033 euros sur les cinq années à venir soit **394 ramettes de papier A4 et 56 cartouches d'encre.**

Après l'étude des différentes solutions d'amélioration identifiées, il est désormais important de réaliser une comparaison des gains potentiels afin de définir quelles actions semblent les plus pertinentes à mettre en œuvre.

3.4.3 Comparaison des possibilités d'amélioration : Eco-efficience

L'identification des possibilités d'amélioration et le chiffrage des gains potentiels lors de leur application sur le périmètre étudié est la dernière étape de la méthodologie. Elle consiste en l'établissement d'une comparaison de ces actions afin d'aider le décideur dans ces choix.

Pour cela, les différents gains calculés lors de l'étape précédente vont être comparés et exprimés visuellement pour apporter une meilleure compréhension. Un indicateur d'éco-efficience est alors utilisé permettant la comparaison des solutions les unes aux autres en fonction à la fois d'un axe

environnemental et d'un axe financier. Ainsi, les possibilités d'amélioration identifiées dans la partie précédente sont évaluées à l'aide d'un indicateur d'**efficacité environnementale**. Néanmoins, lors de cette application, les solutions d'amélioration proposées sont de nature comportementale. Par conséquent elles ne nécessitent pas d'investissement et ne peuvent donc faire l'objet d'un calcul de retour sur investissement. En revanche, les économies en termes de consommations électriques et de consommables peuvent être chiffrées de manière monétaire.

Afin de tenir compte des évolutions possibles du coût de l'énergie électrique, les calculs ont été réalisés pour les cinq années à venir. Les résultats présentés ci-dessous représentent donc un cumul de l'ensemble des gains potentiellement réalisables sur les 5 années futures.

- **Comparaison des actions en termes environnementaux**

Le premier point de comparaison des différentes actions proposées peut être les gains que représentent chacune de ces actions en fonction des différents impacts environnementaux évalués.

Le premier d'entre eux, pour être cohérent avec l'application précédente, est la quantité d'émissions de CO₂ équivalent évitées lors de leur mise en place. Les résultats sont présentés dans le graphique a de la Figure 67.

L'action « extinction » qui consiste à éteindre les équipements communs (MFP et serveurs) et individuels (ordinateurs, écrans, imprimante) est l'action permettant le plus grand évitement d'émissions de GES avec 1 862 kg équivalent CO₂ évités sur les cinq prochaines années. L'action « impressions » relative à la gestion des impressions permet d'éviter l'émission de 1 535 kg équivalent CO₂, ce qui la classe seconde action la plus pertinente. Les trois autres actions, « veille programmée », « utilisateur » et le « paramétrage de la MFP » paraissent moins pertinentes et permettent respectivement une diminution des émissions de CO₂ équivalent de 4 ; 22 et 43 kg équivalent CO₂.

Au regard de l'impact « contribution au changement climatique », l'action relative à l'extinction des équipements est la plus pertinente. Bien que l'action impressions le soit également.

Cette conclusion est également valable pour les autres impacts environnementaux : épuisement de l'ozone stratosphérique (Figure 67b) ; épuisement des ressources fossiles (Figure 67c) ; acidification (Figure 67d) ; radiations ionisantes (Figure 67e) ; toxicité humaine (Figure 67f) et écotoxicité (Figure 67g). Cependant, les gains relatifs à l'action impressions restent bien inférieurs aux gains pour l'action « extinction ».

L'extinction des équipements la nuit (action 3) apparaît donc comme l'action permettant la plus grande diminution des impacts environnementaux évalués. La gestion des impressions (action 5), bien qu'inférieure à la précédente, est classée seconde action la plus pertinente vis-à-vis de ces mêmes impacts environnementaux. Les trois actions restantes, avec des gains beaucoup plus faibles, seront à envisager dans un second temps.

Pour aider les décideurs à choisir une action plutôt qu'une autre, il a été défini dans la méthodologie d'évaluer ces mêmes actions d'un point de vue économique. Une nouvelle phase de comparaison a donc lieu en ne considérant que le volet financier des actions d'améliorations proposées.

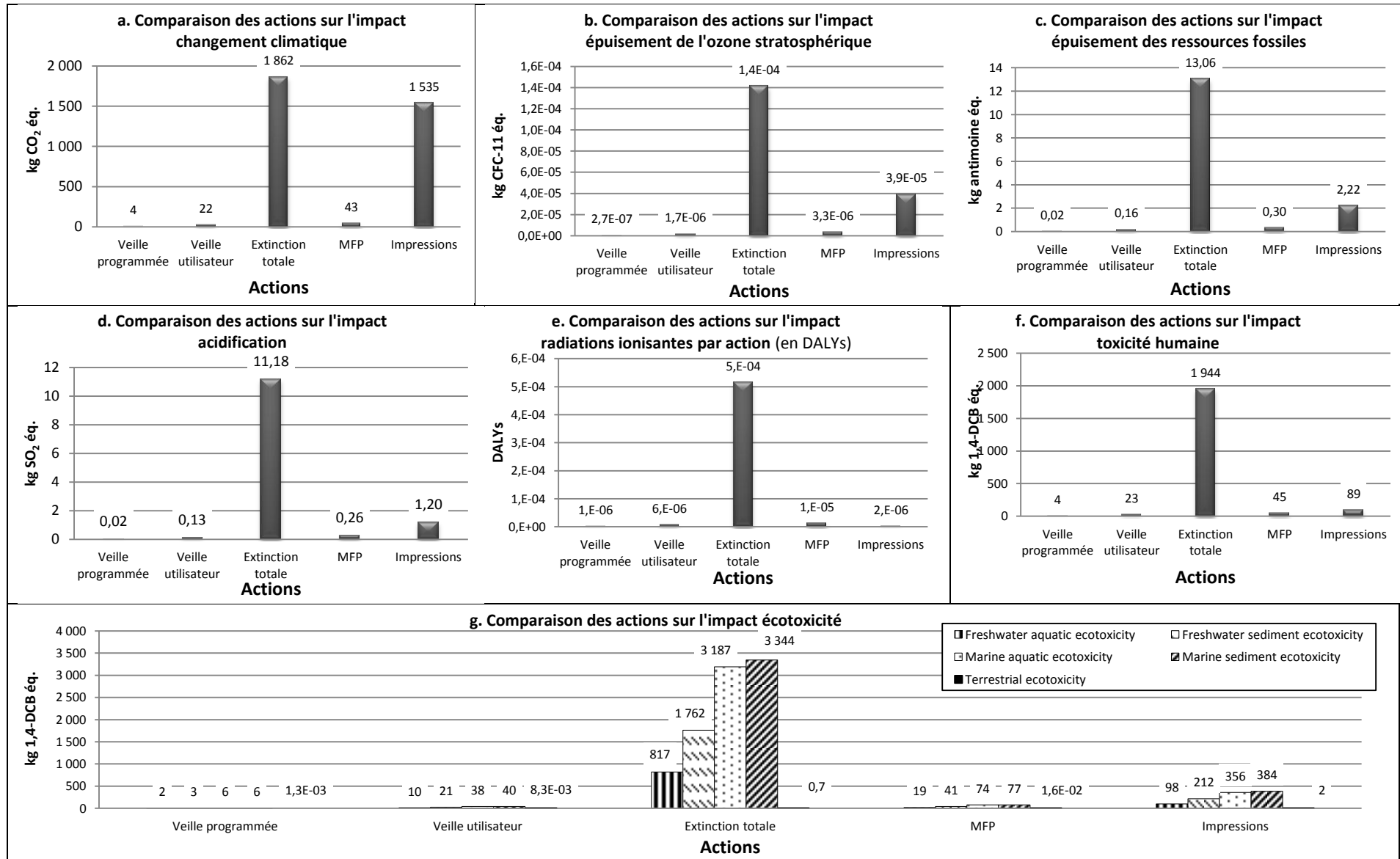


Figure 67: Comparaison des actions d'amélioration en fonction des gains engendrés sur les différents impacts environnementaux considérés

- **Comparaison des actions en termes économiques**

Etant donné que les actions retenues sont essentiellement liées aux comportements des utilisateurs, leur coût de mise en œuvre est évalué par rapport au temps nécessaire pour la mise en place de l'action au sein de l'équipe de recherche. Ces coûts sont donc faibles car ne font pas intervenir l'achat de nouveaux équipements.

De plus, les gains sur une année peuvent s'avérer relativement faibles. Afin d'être cohérent avec l'évaluation des gains environnementaux, il a été convenu d'établir cette comparaison pour les 5 années à venir. Pour réaliser l'ensemble des calculs, des hypothèses communes aux différentes actions d'amélioration sont établies (Tableau 35). Il s'agit :

- du taux d'augmentation annuel du coût du kWh d'électricité : 5 % par an sur 5 ans
- des facteurs de caractérisation indiqués dans le Tableau 32 page 191.
- la durée d'amortissement des équipements (Information fournie par les services informatiques de l'EMSE) : 3 ans pour les ordinateurs portables et ultra-portables, 5 ans pour le reste des équipements (serveurs, imprimantes, ...)

Toutes ces hypothèses sont paramétrables dans un tableau de calcul Excel® (Tableau 35) qui est fourni avec le tableau de bord environnemental.

Tableau 35 : Hypothèses de calcul communes aux différentes actions

Coût du kWh année 1	0,05 €				
Taux d'augmentation par an du coût d'électricité	5 %				
Facteurs de caractérisation du kWh	Voir Tableau 32 page 191				
Durée d'utilisation	5 ou 3 ans				
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Coût du kWh (€)	0,050	0,053	0,055	0,058	0,061

Tout comme précédemment, les actions « extinction » et « impressions » se distinguent des autres actions par la valeur atteinte pour les économies financières réalisables par leur application (Figure 68).

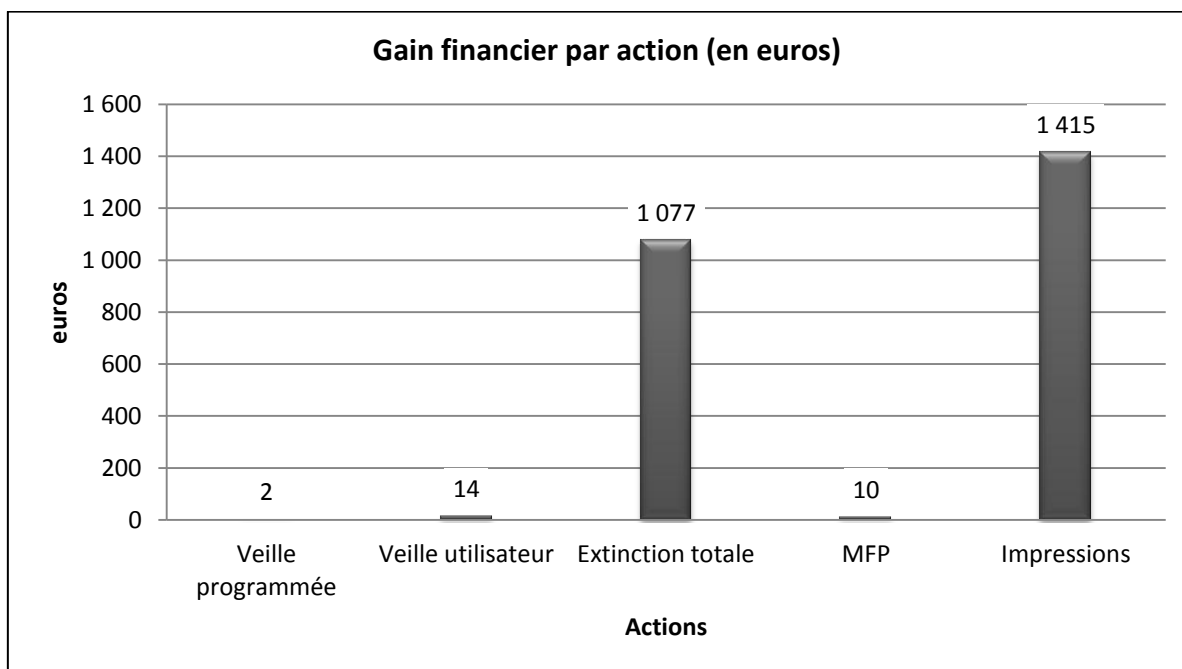


Figure 68: Comparaison des gains des actions en fonction des gains financiers réalisés sur les cinq années à venir.

Avec 1 415 euros économisés en cinq ans, l'action « impressions » (calculée sur les gains en termes de quantité de papier et de cartouches d'encre non utilisés et les économies d'énergie d'un emploi plus faible des équipements d'impressions) est la plus avantageuse financièrement. L'action extinction concernant l'extinction des équipements la nuit permettrait une économie de 1 077 euros sur les cinq futures années.

Les actions « veille programmée », « veille utilisateur » et « MFP » avec respectivement 2 €, 14 € et 10 €, peuvent également être mise en place mais les gains financiers qu'elles généreront seront minimes.

Par conséquent, à la vue des conclusions des gains environnementaux et économiques pouvant être réalisés par la mise en pratique de ces préconisations, les actions « extinction » et « impressions » devront être envisagées en premier.

- **Calcul d'éco-efficience**

Enfin, le calcul d'éco-efficience permet de comparer à la fois les gains environnementaux et les économies financières pouvant être réalisées en appliquant les différentes actions proposées.

Rappel :

Pour rappel l'éco-efficience a été illustré dans la Figure 27 page 122. Les actions situées dans le groupe 1 sont les plus intéressantes à mettre en œuvre car elles permettent d'éviter des impacts environnementaux et sont peu coûteuses à instaurer. Les actions du groupe 2 sont tout aussi intéressantes d'un point de vue environnemental mais sont plus coûteuses à mettre en œuvre.

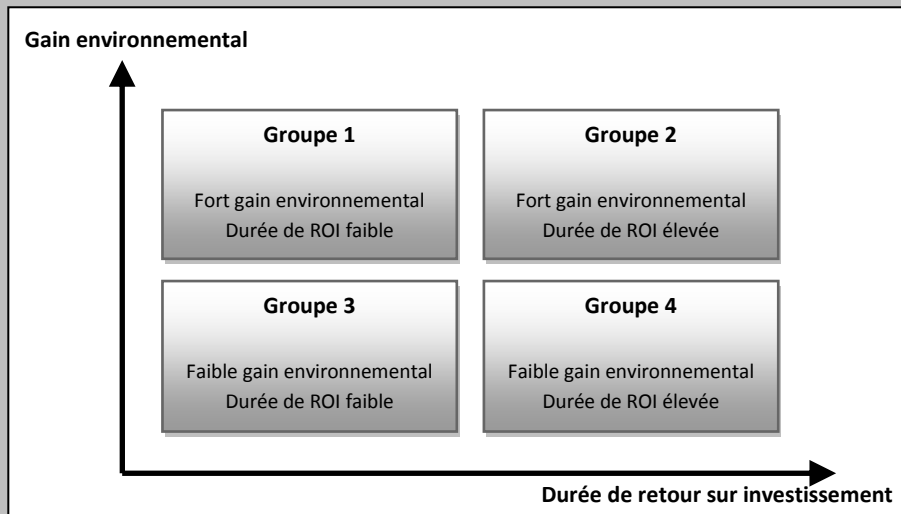


Figure 27: Illustration de l'Eco-efficience (inspiré de [Cha et al., 2008] et [ENSM-SE, 2010])

Un indicateur d'efficience environnementale peut être élaboré pour chaque impact environnemental évalué. De même, pour chaque action, la durée de retour sur investissement a été calculée. Ces deux indicateurs sont représentés graphiquement et permettent d'exprimer l'éco-efficience (Figure 69).

Les six premiers graphiques d'éco-efficience (Figure 69a à f) indique que l'action « impressions » relative à l'application de bonnes pratiques sur les modes d'impressions est l'action la plus éco-efficiente. Pour les impacts sur le changement climatique (Figure 69a), sur l'épuisement de l'ozone stratosphérique (Figure 69b), sur l'épuisement des ressources (Figure 69c), sur l'acidification (Figure 69d), sur la toxicité humaine (Figure 69e) et sur l'écotoxicité (Figure 69f), cette action se distingue des autres par une importante diminution des émissions.

En revanche, pour l'impact sur les radiations ionisantes (Figure 69g), l'action relative à la mise en veille par les utilisateurs est la plus pertinente. L'explication de la bonne position de cette action réside dans le fait qu'il s'agisse de l'action permettant d'économiser une forte consommation d'électricité tout en ne nécessitant qu'un très faible investissement en temps donc un coût financier très faible. L'action « extinction totale » permet une plus grande économie d'électricité mais nécessite plus de temps de mise en place donc un coût plus élevé.

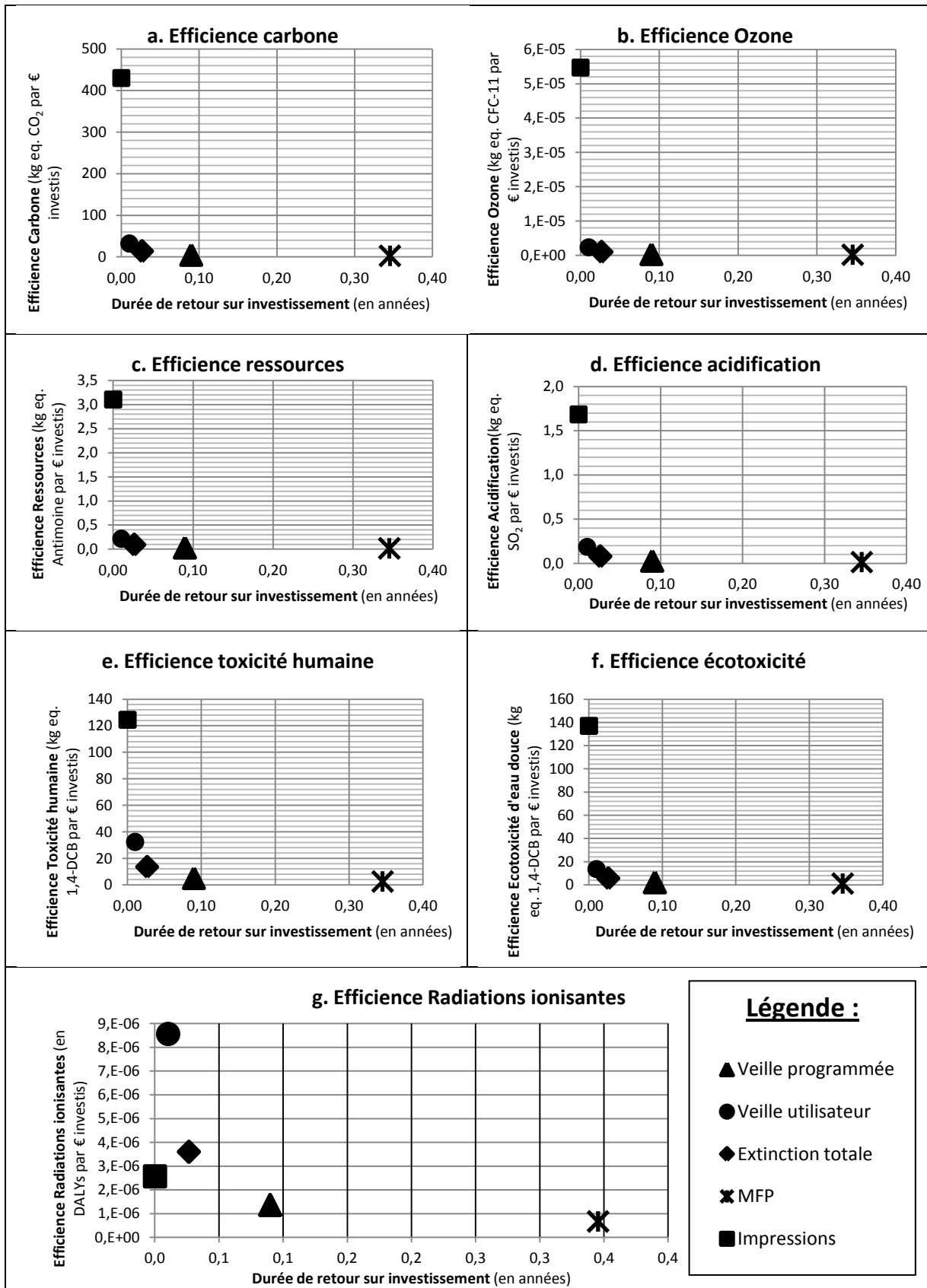


Figure 69: Efficacité environnementale

Ce graphique indique que, l'action relative à la gestion des impressions est celle qui évite une plus grande quantité d'émissions (pour les différents impacts excepté les radiations ionisantes) pour un même gain financier.

Pour les radiations ionisantes, c'est l'action relative à la mise en veille par les utilisateurs qui est la plus intéressante.

Conclusion

Lors de la présentation des actions (paragraphe 3.4.2 page 197), les calculs ont été réalisés en appliquant l'action sur l'ensemble du périmètre. Les gains financiers réalisables tiennent donc compte de ces contraintes.

De plus, l'ensemble de ces actions interviennent essentiellement sur le comportement des utilisateurs, par conséquent le coût financier correspond aux coûts de mise en œuvre de ces actions. Ces coûts de mise en œuvre ont été évalués en fonction du temps nécessaire pour les changements de paramétrage ou de la sensibilisation auprès des utilisateurs.

Enfin, les différentes actions proposées dans le cadre de cette étude agissent sur le comportement des utilisateurs et ne sont pas incompatibles les unes avec les autres. Ainsi, elles peuvent être menées parallèlement et cumulées afin d'augmenter les gains environnementaux et financiers réalisés. L'ensemble de ces gains sont présentés dans le Tableau 36 ci-dessous.

Tableau 36: Gains environnementaux et financiers réalisables sur 5 ans si toutes les actions étaient réalisées en même temps dans l'organisation

	Unités	Valeurs
Climate change	kg eq. CO ₂	2 191
Epuisement de l'ozone stratosphérique	kg eq. CFC-11	1,86 ^E -04
Epuisement des ressources fossiles	kg eq. antimony	16
Acidification	kg eq. SO ₂	13
Freshwater aquatic ecotoxicity	kg eq. 1,4-DCB	946
Freshwater sediment ecotoxicity	kg eq. 1,4-DCB	2 040
Marine aquatic ecotoxicity	kg eq. 1,4-DCB	3 661
Marine sediment ecotoxicity	kg eq. 1,4-DCB	3 852
Terrestrial ecotoxicity	kg eq. 1,4-DCB	3
Toxicité humaine	kg eq. 1,4-DCB	2 104
Radiation ionisante	DALYs	5,35 ^E -04
Consommations électriques évitées	kWh	22 894
Gains financiers réalisables sur 5 ans	Euros	2 518

Les impacts environnementaux évités lors de l'application de l'ensemble des actions proposées ne sont pas négligeables. Financièrement, ce sont environ **2 500 euros** qui pourraient être économisés sur les cinq années à venir.

Depuis cette application, l'ensemble des écrans CRT ont été supprimés. Les serveurs ont ainsi été munis d'écrans LCD récupérés lors du renouvellement des écrans de certains utilisateurs (achat d'un écran plus grand notamment).

De plus, la modification du paramétrage de la veille de l'imprimante multifonction est actuellement en cours de réflexion avec la société assurant la maintenance de l'équipement. En effet, bien que le changement de paramétrage apparaisse intéressant concernant les consommations électriques engendrées, un autre paramètre entre en compte. Cet équipement étant muni d'un écran tactile pour son fonctionnement, il est important de réfléchir aux conséquences qu'un arrêt trop fréquent pourrait provoquer sur sa durée de vie.

De même, l'action liée à l'extinction des serveurs ne prend pas en compte le service rendu par ces serveurs et la nécessité éventuelle de les maintenir allumés. En effet, alors que le serveur assurant la gestion des licences et des données des logiciels de cartographie peut être éteint en dehors des heures d'ouverture du centre de recherche, l'extinction des serveurs permettant les sauvegardes utilisateurs paraît plus contraignante. En effet, ces serveurs sont accessibles via une plateforme sécurisée depuis l'extérieur, permettant aux membres du centre de recherche d'accéder à leur données où qu'ils soient.

Les principales limites et perspectives nécessaires pour améliorer cette méthodologie sont présentées dans le quatrième et dernier chapitre de ce manuscrit. Ce chapitre 4 discutera aussi sur les possibilités de transposition de cette méthodologie à un secteur d'activité autre que l'informatique.

Chapitre 4 Conclusions et Perspectives du travail de recherche

Ce chapitre a pour vocation de présenter les principaux intérêts et limites de la méthodologie développée dans le chapitre 2 ainsi que des pistes de réflexion soulevées par ce travail de thèse. Sur la base de la première application et des premiers résultats, certaines améliorations ont déjà pu être intégrées lors de la seconde application. Néanmoins, certains points peuvent encore être développés afin d'améliorer la méthodologie présentée.

La première partie de ce quatrième chapitre a pour objectif de conclure sur les principaux apports de la méthodologie proposée. Ces apports sont abordés selon deux axes, représentatifs des hypothèses établies dans le premier chapitre de ce manuscrit. Ainsi, nous aborderons dans un premier temps la notion d'impacts environnementaux « délocalisés » et « invisibles ». Puis, dans un second temps, nous discuterons du croisement des données génériques avec les données spécifiques lors de l'évaluation environnementale d'une organisation.

Dans une seconde partie, sur la base de l'analyse du contexte actuel de l'évaluation environnementale du secteur informatique abordée dans le chapitre 1 de ce manuscrit, ainsi que des résultats obtenus lors de l'application de la méthodologie, nous proposons des perspectives d'ordre technique liées à l'applicabilité de la méthodologie comme le développement technique de l'outil sous la forme d'un outil facilement appréhendable et manipulable par les utilisateurs ou encore la prise en compte de la sensibilité des données utilisées ainsi que les incertitudes des résultats obtenus.

Enfin, au regard des diverses problématiques rencontrées lors de l'élaboration de la méthodologie, nous aborderons des perspectives de recherche d'ordre scientifique dans une troisième partie. Cette dernière se concentrera sur quatre points essentiels : la prise en compte de la sensibilité du milieu dans l'évaluation des impacts environnementaux ; les difficultés inhérentes à la détermination des facteurs de caractérisation utilisés pour exprimer les impacts environnementaux ; la notion du périmètre de l'évaluation et de « système produit service » ; enfin, au regard des tendances actuelles dans le domaine de l'évaluation environnementale, une perspective concernant l'évaluation environnementale à l'échelle de l'organisation sera développée et conclura ce chapitre.

Partie 1 Conclusions sur l'apport de la méthodologie proposée

1.1 Notion d'impacts « délocalisés » et « invisibles »

Le premier chapitre nous a permis de poser plusieurs hypothèses dont la première qui porte sur les impacts environnementaux des TIC qui, au regard de la bibliographie effectuée et des résultats d'évaluations environnementales préalablement réalisées, seraient « délocalisés » et « invisibles » aux yeux de l'utilisateur final.

Hypothèse 1 Les impacts environnementaux des TIC sont principalement « délocalisés » et « invisibles » par rapport à l'utilisateur final.

Cette hypothèse représente un premier axe de recherche mené dans le cadre de ce travail de thèse. Ainsi, alors que pour la première application, seul l'impact relatif au changement climatique a été estimé, les premiers compléments de la méthodologie ont porté sur l'expression de plusieurs impacts environnementaux relatifs aux équipements informatiques présents. L'emploi de plusieurs indicateurs permet de préciser les différentes sources d'impacts et d'identifier les potentielles sources de « délocalisation » des impacts environnementaux.

Ainsi, nous avons cherché à différencier les sources de délocalisation de l'impact. En effet, pourquoi pouvons-nous parler d'impact environnemental délocalisé par rapport à l'utilisateur final ? La notion de délocalisation est une notion géographique qui sous-entend que les différents éléments considérés ne se produisent pas au même endroit. Dans le cadre de l'hypothèse 1, le référentiel se trouve être l'utilisateur final. Par conséquent, seuls les impacts se produisant sur le lieu de l'utilisation vont être considérés comme locaux, les autres deviendront alors des impacts « délocalisés ». Ainsi, les impacts liés aux phases de production et de transport de l'équipement avant son arrivée face à l'utilisateur sont considérés comme des impacts « délocalisés ». Il en va de même pour les impacts liés à la production de l'électricité nécessaire pour le fonctionnement de l'équipement. De plus, à l'heure actuelle, les phénomènes de mondialisation de la production et de délocalisation des entreprises contribuent fortement au déplacement de la pollution. L'hypothèse du havre de pollution argumente cette idée en mentionnant le fait que les industries les plus polluantes ont migré depuis les pays développés vers les pays en développement [Akboostanci et Türüt-Asik, 2004]. Ainsi, ces activités ne se font plus sur le territoire national et contribuent à l'augmentation de la pollution sur un autre territoire. Les impacts locaux sont alors déplacés mais leur répercussion au niveau planétaire reste entière.

Les explications concernant les impacts « invisibles » rejoignent la précédente démonstration. En effet, l'utilisateur final n'associe pas systématiquement l'allumage de son équipement informatique au fonctionnement d'un site de production d'électricité comme une centrale nucléaire ou une centrale à charbon. De même, lors de la prise en main d'un équipement, l'utilisateur n'a pas conscience de la quantité de matières premières et d'énergie nécessaire à sa fabrication ni même des émissions relatives au transport de l'équipement depuis l'usine de production. Le Tableau 37 illustre l'ensemble de ces propos.

Tableau 37 : Impacts environnementaux « délocalisés » et « invisibles » aux yeux de l'utilisateur

	Phase du cycle de vie où se produisent les impacts environnementaux			
	Production	Transport	Utilisation	Fin de vie
Matériaux	X	X		X
Produits chimiques	X	X		X
Eau	X	X		X
Papier / Carton	X	X		X
Energie	X	X		X
Déchets	X	X		X

Ainsi, un des points forts de la méthodologie proposée est d'exprimer les résultats d'impacts sous plusieurs indicateurs afin de :

- Tenir compte des interactions éventuelles entre les différentes étapes du cycle de vie
- Considérer les transferts d'impacts potentiels entre les différentes étapes du cycle de vie
- Rendre une image plus complète des phénomènes liés aux émissions évaluées.

1.2 Enrichissement de l'approche organisation par l'approche produit : croisement des données réelles avec les données génériques

L'étude bibliographique réalisée au début de la thèse nous a permis de dresser un état des lieux du domaine de l'évaluation environnementale (chapitre 1). Notre réflexion, basée sur l'analyse de plusieurs outils d'évaluation environnementale nous a amené à poser les deux hypothèses suivantes :

Hypothèse 2 : Les méthodes d'évaluation environnementale actuelles ne se situent pas au croisement des approches sites et produit et ne permettent pas d'exprimer plusieurs impacts environnementaux.

Hypothèse 3 : Les méthodes d'évaluation environnementale actuelles ne permettent pas une évaluation spécifique des systèmes informatiques d'une organisation.

Ainsi, l'analyse de 8 outils d'évaluation environnementale classés en fonction des objectifs de l'étude, de l'objet étudié ainsi que de l'échelle d'impact évaluée (impact locaux et/ou planétaires) (Tableau 38) a abouti à une question de recherche portant sur la possibilité de combiner l'inventaire de données spécifiques à un site géographique avec une approche produit de type ACV. Une synthèse de l'analyse des 8 outils d'évaluation environnementale considérés est récapitulée dans le Tableau 38.

Tableau 38: Approche et impacts environnementaux considérés dans les outils d'évaluation environnementale étudiés

	Approches		Impacts environnementaux	
	Site	Produit	Mono impact	Multi impact
Etude d'impact	X			X
EPE	X			X
ACV		X		X
GHG protocol	X		X	
Bilan Carbone®	X	X	X	
Empreintes Ecologiques (eau et carbone)	X	X	X	
MFA	X			X
MIPS		X		X

Une étude sur l'application des méthodes d'évaluation environnementale aux équipements informatiques a montré qu'aucun outil actuellement disponible permet l'évaluation spécifique de ces systèmes au sein d'une organisation (Hypothèse 3). Pour atteindre cet objectif, il s'agit alors d'effectuer un croisement de plusieurs sources de données afin de renseigner l'ensemble des éléments nécessaires à l'évaluation et de prendre en considération l'utilisation de ces systèmes informatiques au sein d'une organisation.

L'ACV, par la prise en compte des différentes étapes du cycle de vie des produits considère les spécificités de chaque étape, néanmoins, la phase d'utilisation du produit emploie fréquemment des données génériques d'utilisation du produit [ISO 14040, 2006], [Jolliet et al., 2010]. De plus, l'approche site d'étude n'est pas considérée dans le cadre de l'ACV car l'objet de l'étude est un service ou un produit tout au long de son cycle de vie. L'ACV permet donc l'expression de divers impacts environnementaux d'un produit sans considérer l'organisation dans laquelle se trouve ce produit.

L'outil Bilan Carbone®, focalisé sur les caractéristiques de l'organisation étudiée exprime ses résultats selon un seul impact environnemental, le changement climatique. Les résultats présentent par conséquent les émissions de CO₂ équivalent relatives au fonctionnement de l'organisation [ADEME, 2010] [Association Bilan Carbone, 2011].

Les méthodes d'évaluation existantes prennent en compte soit plusieurs impacts environnementaux déconnectés du lieu d'application du système notamment pour la phase d'utilisation soit un seul impact ne permettant pas de visualiser facilement les effets croisés des alternatives. L'analyse de toutes les méthodes étudiées dans la bibliographie (chapitre 1) a montré leurs lacunes quant à la prise en compte des conditions spécifiques des utilisateurs de systèmes. Dans un objectif de suivi, d'aide à la décision quant à des stratégies d'amélioration prenant en compte les impacts environnementaux, il est indispensable d'intégrer les usages (types, modalités,

contraintes) et les utilisateurs (comportements) du système d'étude. Ainsi, cela demande de les prendre en compte dans les approches produits, services et site.

- **Données spécifiques**

Pour cela, notre approche originale est de prendre en compte les données spécifiques au site, en complément de l'utilisation de base de données. Ces données spécifiques permettent d'intégrer le contexte local comprenant les inventaires précis et détaillés des équipements informatiques présents, les conditions d'utilisation et les fréquences de renouvellement. Ces données réelles ont été obtenues par l'intermédiaire d'une importante phase de collecte de données sur le site d'étude déroulée en trois temps : les inventaires, les enquêtes et questionnaires ainsi que les mesures.

Comme indiqué sur la Figure 70, cette phase de collecte de données permet de centraliser les données issues du site étudié. Un processus itératif de collecte de la donnée permet de compléter et de valider les différentes informations recueillies lors des inventaires, des enquêtes et des mesures. La partie inventaire est réalisée dans un premier temps, elle permet de mieux connaître le contexte local et d'identifier les flux qui devront être évalués. Comme nous l'avons vu lors du descriptif de la méthodologie et des applications, la phase d'enquêtes vient renforcer cette étape d'inventaire. Elle permet d'obtenir des données plus spécifiques au site d'étude en interrogeant les utilisateurs et responsables des services informatiques au sujet des consignes et des rythmes d'utilisation des équipements informatiques. Les entretiens avec les différents membres du personnel des sites d'étude a également pour but une meilleure compréhension et interprétation des résultats des mesures réalisées sur un panel d'équipements considérés comme échantillon représentatif de l'ensemble du site étudié.

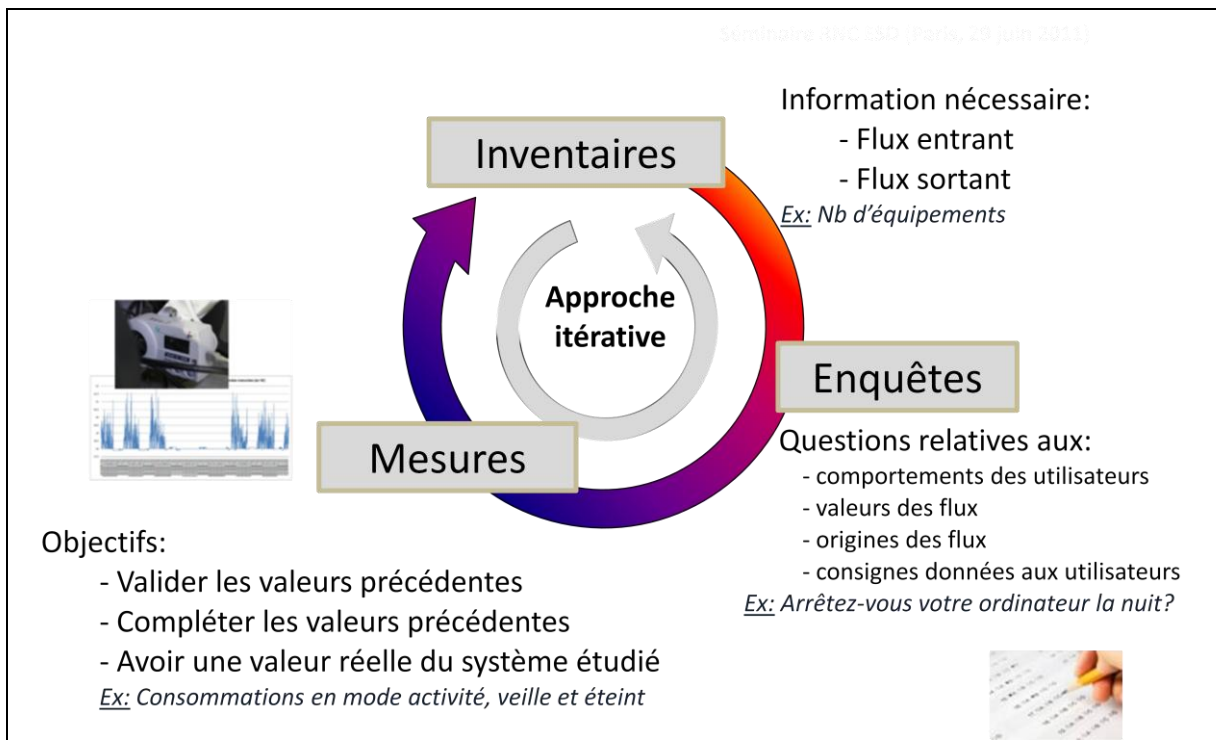


Figure 70: Représentation de la phase de collecte de données

L'intérêt de compléter cette phase de collecte de données par des enquêtes et des mesures permet notamment d'être plus proches de la réalité de la situation dans l'organisation étudiée et ainsi réaliser une réelle approche spécifique au site d'étude. De plus, si seuls les inventaires avaient été considérés, il aurait été nécessaire de considérer ces résultats avec prudence car il n'est pas rare que les évolutions rapides des services ne permettent pas une mise à jour régulière des fichiers d'inventaire. Néanmoins, même en considérant que les inventaires fournis soient fidèles à la réalité, d'autres éléments viennent plaider en faveur de compléments lors de la phase de collecte de données :

- Les données d'inventaires permettent d'obtenir uniquement des informations concernant les références présentes ainsi que leur quantité et leur répartition au sein de l'organisation.
- Les données issues des fiches constructeurs auraient alors pu être utilisées afin de connaître les puissances des équipements et ainsi estimer les consommations électriques des différents équipements. Les données des constructeurs sont particulièrement intéressantes lors du choix d'un modèle par rapport à un autre. Cependant, les puissances mentionnées sont obtenues lors de tests qui ne tiennent pas compte de la charge de l'équipement. Elles ne reflètent donc pas les puissances réelles lors de leur utilisation sur site.
- Les mesures effectuées permettent d'être plus fidèle à la réalité en relevant les puissances électriques effectives des équipements au sein de l'organisation et donc en attribuant des puissances électriques réelles aux équipements présents dans le tableau de bord environnemental. Dans le cadre de la première application (Casino IT), l'ensemble des équipements n'a pas pu faire l'objet de mesures néanmoins l'estimation de la consommation électrique totale des équipements informatiques semble plus proche de la réalité en utilisant les résultats des mesures plutôt que les données issues des fiches constructeurs.
- Enfin, en réalisant des mesures et en combinant les résultats obtenus aux enquêtes auprès des différents utilisateurs et responsables informatiques, il a été possible d'en déduire des rythmes d'utilisation spécifiques à l'organisation étudiée. Certes des hypothèses d'extrapolation ont été nécessaires pour établir des profils d'utilisateurs et les généraliser à l'ensemble des utilisateurs au sein de l'organisation néanmoins, ces hypothèses sont basées sur des situations réellement rencontrées au sein de l'organisation et tiennent compte des spécificités (charte d'utilisation, consignes de sécurité, contraintes métiers, ...).

Au sein d'une même entité, certaines caractéristiques peuvent varier d'un site à un autre. Cette étape de collecte de données permet alors de prendre en considération ces différences et de les insérer dans l'évaluation environnementale globale de l'organisation étudiée.

- ***Données génériques et facteurs de caractérisation***

La conversion des flux (résultats d'inventaire en impacts environnementaux) se fait via des facteurs de caractérisation disponibles dans diverses bases de données. Dans le cadre de ce travail de thèse, ce sont les facteurs de caractérisation de la base de données Ecoinvent qui ont été utilisés. Ces facteurs de caractérisation ont été quantifiés sur la base de modèles et sont donc indépendants de

l'application réelle du système étudié. Néanmoins, ces facteurs sont déterminés et utilisés de façon consensuelle par les experts du domaine. Dans l'idéal, il faudrait réaliser une ACV pour l'ensemble des équipements rencontrés au sein de l'organisation étudiée, ce travail étant beaucoup trop long à exécuter, la transcription des flux en impacts environnementaux dans la méthodologie proposée fait appel à des facteurs de caractérisation génériques issues de bases de données.

Cependant, le couplage de données d'inventaires, usage (approche site) et facteurs de caractérisation générique permet d'obtenir des résultats exploitables, basés sur des informations réelles, réutilisables et consensuelles. Elles peuvent ensuite être exploitées dans le cadre de benchmark. La bibliographie a permis de récupérer un ensemble de données concernant à la fois des bonnes pratiques ou encore des résultats d'ACV sur des équipements informatiques. Ces données ont été intégrées au tableau de bord environnemental afin de compléter les résultats et de proposer des solutions d'amélioration adaptées à la situation rencontrée.

Partie 2 Perspectives techniques

2.1 Sensibilité et incertitudes

2.1.1 Précision et incertitudes des appareils de mesures

Les boîtiers ayant permis de réaliser les mesures sur les divers équipements informatiques sont des économètres de la marque NZR (SEM-Log 16). Ils permettent de réaliser des mesures de puissances instantanées, de voltage, d'intensité et de stocker les données (à hauteur de 18 000 valeurs). Le pas de temps choisi (ou écart entre deux prises de données) peut varier de une à trente minutes.

L'objectif de l'utilisation de ces économètres est d'acquérir des données sur les consommations électriques des divers équipements informatiques. Par conséquent, il est important d'évaluer la variabilité potentielle liée à l'utilisation de ces boîtiers. Ainsi, les boîtiers ont fait l'objet de mesures préalables afin de déterminer les incertitudes liées à leur utilisation.

Dans un premier temps, des mesures concernant la consommation électrique des économètres ont été réalisées. Pour cela, il était indispensable de mesurer un équipement électrique dont la puissance ne varie pas au cours du temps. Une lampe de bureau a donc fait l'objet de mesures sur une période d'une heure avec un pas de temps d'une minute (Figure 71a). Les résultats (Figure 72a) mettent en évidence que la puissance électrique de la lampe est fixe durant la période de mesures soit 24,8W. Lorsque la lampe est éteinte, la puissance instantanée relevée est de 0W. La même série de mesures a été réalisée en raccordant un économètre à l'installation précédente (Figure 71b) afin de quantifier la consommation électrique engendrée par l'économètre. Les résultats sont présentés dans le Figure 72b.

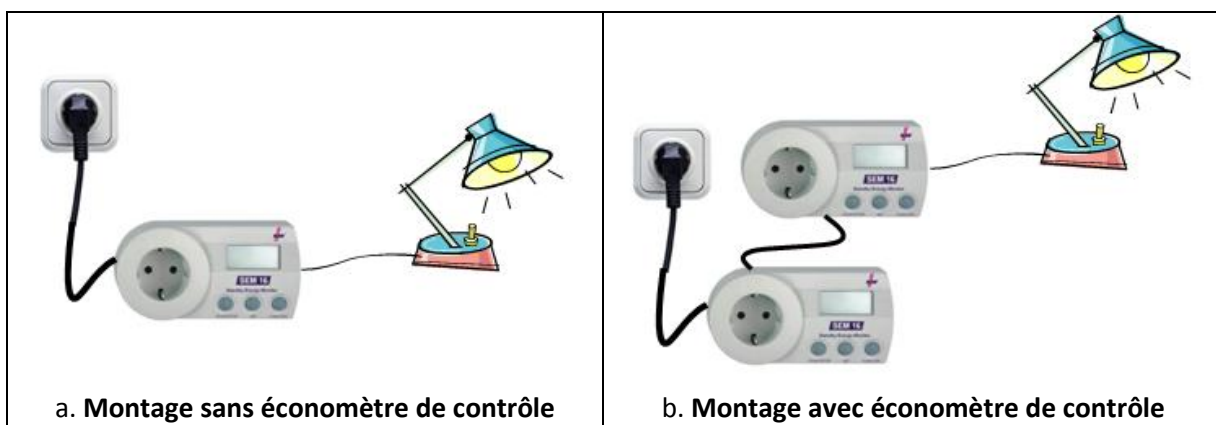


Figure 71 : Schémas de principe des montages réalisés avec (a) et sans (b) économètre de contrôle

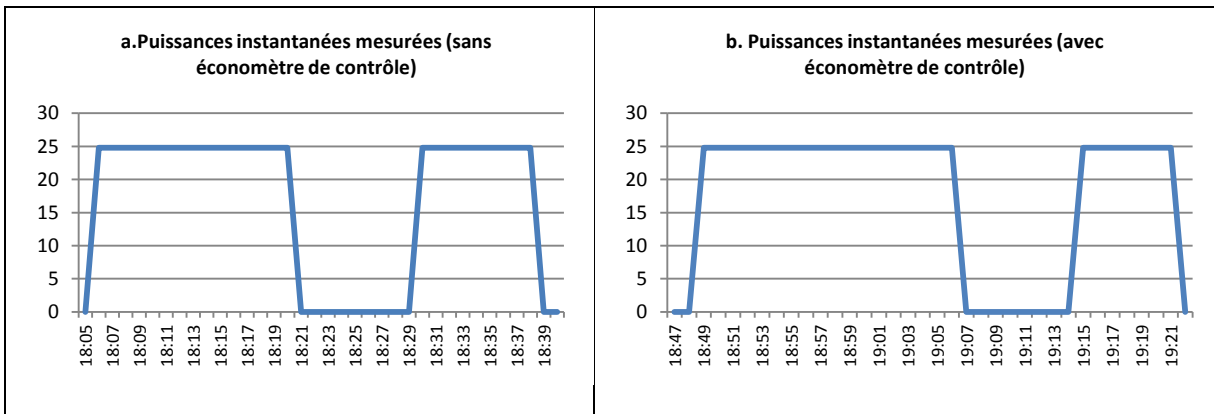


Figure 72 : Résultats des mesures de puissances instantanées sur une lampe de bureau avec économètre (graphique a) ou sans économètre (graphique b)

Lorsque la lampe est éteinte, l'économètre affiche une puissance instantanée de 0W. Le raccordement du second économètre indique le même résultat (0W) sur les deux économètres. Par conséquent, **l'économètre ne consomme pas d'électricité ou, plus exactement, sa consommation est inférieure à son propre seuil de détection.**

De même, aucune différence dans les puissances instantanées mesurées n'a été détectée. Par conséquent, il est possible de conclure que **la présence des économètres n'engendre pas une consommation électrique supplémentaire des équipements mesurés** ou la consommation électrique engendrée par la présence des économètres n'est pas détectable par les économètres (variation inférieure au seuil de sensibilité de l'appareil). La précision d'un appareil de mesures, également appelée sensibilité, correspond à la plus petite valeur qu'un instrument est capable de mesurer. La sensibilité du boîtier est de 0,1 W (données constructeur) pour les puissances, 0,001 A pour les intensités et 1 V pour le voltage. Toute variation inférieure à ces valeurs ne peut donc être détectée.

Ces mesures ont également permis de mettre en évidence qu'**il n'existe pas de différence selon les boîtiers**. En effet, pour réaliser la deuxième série de mesures, deux boîtiers ont été nécessaires or les résultats de puissances mesurés sont identiques sur les deux économètres (Figure 72).

Les résultats des mesures sur les économètres permettent de conclure que :

- la consommation électrique du boîtier est inférieure à sa propre sensibilité
- le boîtier n'engendre pas de consommation détectable supplémentaire d'électricité à l'équipement faisant l'objet de mesures
- il n'existe pas de variabilité significative entre les boîtiers

La variation que peut prendre une valeur lors de la mesure est nommée incertitude. Afin de connaître cette incertitude, une estimation sur l'ensemble des consommations de l'étude de cas EMSE a été réalisée. Pour cela, nous avons repris les valeurs des puissances mesurées dans le tableau de bord environnemental en les augmentant de 0,1 W dans un premier temps puis en les diminuant de 0,1W dans un second temps. Suite à ces modifications, la variation de consommation électrique totale a été notée et constitue l'incertitude sur la valeur précédemment obtenue dans le

tableau de bord. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le Tableau 39, les incertitudes sont mentionnées sous deux unités : en kWh et en %.

Tableau 39 : Estimation de l'incertitude relative aux boîtiers de mesures sur l'étude de cas EMSE, pour l'ensemble des équipements d'une catégorie.

Catégorie d'équipements	Valeurs obtenues dans l'étude de cas	Incertitudes (en kWh)	Incertitudes (en %)
PC fixes	2 490	16	0,65%
Portables	516	9	1,69%
Ultra-portables	42	1	2,07%
Ecrans	2 183	38	1,73%
Station d'accueil	10	1	8,25%
Imprimante	21	2	8,31%
MFP	810	1	0,11%
Serveur	8 676	4	0,04%

Ces calculs montrent que l'incertitude liée à la sensibilité des boîtiers de mesures atteint au maximum 8% de la consommation électrique de la catégorie d'équipements sur l'ensemble de l'étude de cas soit 72 kWh sur la consommation électrique annuelle de cet établissement. Les incertitudes les plus fortes sont obtenues pour les catégories d'équipements ayant les plus faibles consommations électriques, ce qui donne donc un poids plus fort aux variations liées à la sensibilité du boîtier de mesure (sensibilité qui est fixe quelle que soit la puissance mesurée).

2.1.2 Sensibilité des hypothèses effectuées

Lors de l'application de la méthodologie, plusieurs catégories d'hypothèses ont dû être émises pour pouvoir mener l'étude à son terme. Bien qu'il semble difficile d'estimer la variation potentielle des résultats liée à la variation des données d'entrées, il est intéressant de se poser la question de l'influence de ces choix sur les résultats de l'évaluation du système.

- ***Généralisation du comportement des usagers testés avec les économètres à l'ensemble des usagers***

L'ensemble des postes usagers n'ayant pas pu faire l'objet de mesures, il a été nécessaire d'établir des hypothèses d'équivalence de comportements entre différents usagers et ainsi généraliser les résultats obtenus sur un panel d'utilisateurs à l'ensemble des utilisateurs de l'organisation étudiée.

Dans le cadre de la première étude de cas auprès de Casino IT, le nombre d'équipements informatiques présents est très élevé (plus de 50 000 unités). Par conséquent, nous avons choisi de réaliser les mesures sur un échantillon réduit, le plus représentatif possible de la totalité des équipements. Une réflexion a alors été menée avec les membres du personnel de CIT afin de sélectionner les équipements qui ont fait l'objet de mesures. L'échantillon représente une faible part de la totalité des équipements, de 0,05 à 0,42%. Le Tableau 40 montre les pourcentages de l'échantillon pour les catégories d'équipements présentes.

Ces pourcentages faibles nous amènent à la conclusion que l'échantillonnage effectué est petit : il représente 0,09% de l'ensemble des équipements présents. Par conséquent, il n'est pas exhaustif [Gy, 1998] et possède une incertitude de 60% (voir Annexe 8) [Jourdon, 2009].

Tableau 40: Part de l'échantillon constitué chez Casino par rapport à l'ensemble des équipements au sein du groupe Casino.

CASINO			
	Total	Echantillon	Part de l'échantillon
Ordinateurs	13 385	11	0,08%
Serveurs	1 425	6	0,42%
Imprimantes	3 824	5	0,13%
MFP	2 889	7	0,24%
Équipements spécifiques	28 546	15	0,05%

Pour l'application au sein de l'EMSE, la quantité d'équipements présents est plus faible. De plus, nous n'avons considéré qu'un seul centre de recherche. L'échantillon a été constitué après réflexion avec le technicien informatique afin que l'ensemble des équipements et des différents profils d'utilisateurs soit représenté. L'échantillon représente une part variable de la totalité des équipements allant de 26 à 100% selon la catégorie considérée. Les résultats sont présentés dans le Tableau 41.

Ces pourcentages nous amènent à la conclusion que l'échantillonnage effectué représente 31,8% de l'ensemble des équipements présents. Par conséquent, il est considéré comme exhaustif (supérieur à 15%) [Gy, 1998] et possède une incertitude de 10% (voir Annexe 8) [Jourdon, 2009].

Tableau 41 : Part de l'échantillon constitué au sein de l'EMSE par rapport à l'ensemble des équipements.

EMSE			
	Total	Echantillon	Part de l'échantillon
Ordinateurs fixes	19	5	26,32%
Ordinateurs portables	10	3	30,00%
Ultra-portables	2	1	50,00%
Ecrans	42	11	26,19%
Stations d'accueil	9	3	33,33%
Imprimantes	2	1	50,00%
MFP	1	1	100,00%
Serveurs	3	3	100,00%

L'objectif de la constitution des échantillons est de pouvoir réaliser une étude sans pour autant avoir à effectuer une analyse sur l'ensemble des éléments. L'échantillon doit donc être représentatif de l'ensemble de ces éléments présents afin de pouvoir extrapoler les résultats obtenus sur une part de l'ensemble à la totalité du périmètre d'étude. Néanmoins, nous ne cherchons pas à ce que la composition de cet échantillon soit identique à celle de l'ensemble des équipements mais plutôt à ce que l'ensemble des catégories d'équipements présents dans le

périmètre d'étude soit représenté dans l'échantillon. En étudiant en parallèle les comportements des utilisateurs et les références des équipements présents, nous avons ainsi pu utiliser les résultats des mesures effectuées sur cet échantillon pour les généraliser et ainsi obtenir des résultats pour l'ensemble du périmètre considéré.

- ***Généralisation des résultats d'un échantillonnage d'une semaine à des valeurs annuelles***

L'extrapolation des résultats s'est basée sur une période commune d'une semaine. Ces résultats ont par la suite été extrapolés afin d'obtenir les consommations annuelles de chaque poste. Afin de vérifier l'estimation des consommations annuelles réalisées, nous avons effectué une seconde série de mesures sur une période de temps d'un mois. Les équipements et le comportement des utilisateurs n'ont pas été modifiés entre ces deux séries de mesures. Les résultats sont présentés dans le Tableau 42.

Tableau 42: Résultats des mesures effectuées sur un mois et variation sur l'estimation de la consommation annuelle

	Résultats des mesures sur une semaine		Résultats des mesures sur un mois		Variation (en %) des estimations des consommations annuelles
	Consommation hebdomadaire mesurée Wh/sem	Consommation annuelle calculée Wh/an	Consommation mensuelle mesurée Wh/mois	Consommation annuelle calculée Wh/an	
Ordinateur fixe 1	4,441	231,57	16,377	196,52	15,1%
Ordinateur fixe 2	2,538	132,34	11,43	137,22	3,7%
Ecran	0,886	46,20	4,23	50,77	9,9%
Imprimante	0,196	10,22	0,72	8,66	15,3%
MFP	15,56	811,34	61,437	737,24	9,1%

Le calcul sur la base des résultats d'une semaine engendre une variation de l'estimation de la consommation annuelle de 3 à 15 % par rapport aux résultats obtenus à partir des mesures effectuées sur un mois. Ces résultats semblent cohérents avec les études de Newsham [Newsham et Tiller, 1992] [Newsham et Tiller, 1994], qui estiment la marge d'erreur à 20% entre les résultats obtenus sur une semaine par rapport aux consommations électriques mesurées sur un an. Ainsi, dans la mesure du possible, il serait préférable de faire des campagnes de mesures sur un laps de temps long (un mois) afin de minimiser ces incertitudes.

- ***Généralisation du nombre d'équipements par établissement sur l'ensemble des établissements***

L'ensemble des établissements n'ont pu faire l'objet d'enquêtes et de vérification de l'inventaire fourni. Par conséquent, l'hypothèse de généralisation du nombre d'équipements par établissement à l'ensemble des établissements a été établie. Cette hypothèse est vraie pour l'application au sein de Casino IT uniquement, la seconde application concernant l'EMSE n'ayant été effectuée que sur un service (équivalent à un seul établissement). L'EMSE, bien que possédant un service

informatique centralisé est composé de plusieurs centres de recherche dont les équipements informatiques présents diffèrent de par la spécificité de certains centres. De plus, plusieurs centres de recherche sont constitués de laboratoires dont les équipements informatiques sont très spécifiques. Il aurait donc été très complexe de généraliser les résultats obtenus sur un centre de recherche aux autres. En effet, un rythme de travail à 100% sur ordinateur de bureau (développement de méthode informatique, modélisation, simulation) ne peut pas servir de base pour généraliser un rythme de travail de laboratoire (avec des expérimentations sur paillasse par exemple).

Pour l'étude de cas au sein de Casino IT, la généralisation du nombre d'équipements par établissement à l'ensemble des établissements a été possible du fait d'une plus grande homogénéité entre les différents établissements d'une même entité organisationnelle. Cette généralisation s'est basée sur les inventaires transmis par le groupe Casino. Ces inventaires étaient de deux ordres :

- des inventaires par branche qui avaient pour objectif de donner les modèles et nombres d'équipements présents dans chaque branche (hypermarchés, supermarchés, magasins de proximité, entrepôts, siège, data centre) ;
- des inventaires par établissement où l'information était regroupée par établissement (pour chaque hypermarché de la branche hypermarché par exemple).

En croisant ces deux sources de données et au cours d'entretiens avec les responsables informatiques des établissements et des branches, il a été possible de vérifier et valider les informations. Cependant, le croisement des données d'inventaires de branche et celles des établissements pour les sites étudiés, nous permet d'évaluer l'incertitude à environ 10%.

Par conséquent, l'incertitude totale pouvant exister sur les résultats présentés correspond au cumul des incertitudes liées aux hypothèses de généralisation réalisées soit :

- **10 à 60 %** sur la constitution de l'échantillon (10% pour l'échantillon constitué pour l'EMSE et 60% pour l'échantillon constitué pour Casino)
- **3 à 15 %** sur la durée des mesures à une semaine
- **10 %** sur l'ensemble des établissements du périmètre d'étude.

L'incertitude totale varie donc entre 23 et 85 %.

2.2 Des facteurs à prendre en compte

2.2.1 Tenir compte des utilisateurs : perception de jugement

Dans le cadre de la méthodologie, les mesures et les enquêtes réalisées auprès des utilisateurs pourraient porter à confusion. En effet, notamment lors de la phase d'enquête, les utilisateurs peuvent avoir la sensation d'être jugés sur leurs comportements, leurs habitudes. Par exemple, demander les horaires et le rythme de travail des différents utilisateurs risque d'amener le questionnaire à être perçu comme une possibilité d'évaluation de leur assiduité ou de leur rapidité d'exécution de certaines tâches. Nous tenons cependant à préciser que nous n'avons pas eu de

remarques à ce sujet de la part des utilisateurs qui ont répondu aux questionnaires ou dont les équipements ont fait l'objet de mesures.

Ainsi, dans une évaluation de cette nature, il est primordial d'expliquer précisément la démarche entreprise ainsi que les objectifs des enquêtes par l'organisation aux utilisateurs avant de commencer les enquêtes afin qu'il n'y ait pas de malentendus et que leur comportement soit le plus représentatif possible de leur activité normale. De plus, il semble nécessaire que le questionnaire soit administré par une personne n'ayant aucun lien de hiérarchie avec le répondant et que les résultats soient immédiatement rendus anonymes.

De manière plus générale, lorsqu'il est question d'enquêtes auprès de personnel ou plus globalement lorsque les résultats de l'étude peuvent varier en fonction de paramètres humains, les conclusions finales doivent en tenir compte. Ainsi, au-delà de la perception de jugement identifiée précédemment que les utilisateurs pourraient ressentir, nous abordons ici la question du paramètre humain dans l'évaluation environnementale et l'influence de ce dernier sur les résultats de l'étude. Ces paramètres humains sont généralement des données qualitatives qui doivent être associées aux variables quantitatives du reste de l'étude. La réflexion s'oriente donc sur l'objectivité des résultats par rapport aux réponses des membres du personnel lors des phases d'enquêtes. Comment est-il possible de s'assurer de l'objectivité des répondants lors de la réalisation de telles études ? Il est donc nécessaire de positionner des éléments de vérification afin de valider certaines des réponses apportées : il est ainsi possible de poser la question sous différentes formes, d'aborder un thème par plusieurs questions ou encore d'intégrer des paramètres mesurables parallèlement au questionnaire (par exemple, les heures d'allumage de l'ordinateur peuvent être comparées aux mesures effectuées sur l'ordinateur par l'intermédiaire des boîtiers).

2.2.2 Contraintes métiers

Lors de la réalisation de la partie évaluation environnementale de la méthodologie, les spécificités de l'organisation sont étudiées et sont présentes dans la constitution du tableau de bord environnemental.

Ces spécificités sont liées à la structure de l'organisation, au nombre d'établissements, à la structuration physique des bureaux ou installations où se trouvent les équipements informatiques faisant l'objet de l'étude. De même, les inventaires ont permis de préciser les modèles et les quantités des équipements présents ainsi que leur répartition au sein de la structure. Enfin, les enquêtes et les mesures réalisées ont permis de collecter des données essentielles pour spécifier les consommations et les comportements des utilisateurs de l'organisation.

Cette spécificité de l'étude lors de l'évaluation environnementale est également prise en compte lors de la dernière étape de la méthodologie abordant l'élaboration de scénarii d'amélioration. En effet, chaque action proposée peut être appliquée en fonction du nombre d'équipements concernés et du périmètre d'actions. Cependant, certaines contraintes métiers semblent difficilement identifiables sans discussion préalable avec les services techniques informatiques de l'organisation.

Enfin, parfois, ce sont des contraintes techniques, matérielles, qui ne permettent pas la mise en œuvre des solutions envisagées. L'organisation étudiée peut avoir fait un choix auparavant, dans la structuration de son système informatique qui rend impossible une solution moins impactante (cette configuration s'applique par exemple particulier aux centres de données centralisant de nombreux équipements). D'où la nécessité d'intervenir également en amont de la mise en place d'un système informatique afin de faire des choix réfléchis et en accord avec l'évolution souhaitée pour la suite.

Ainsi, par exemple lors de la proposition d'un scénario de prolongement de la durée de vie des équipements, l'ensemble du personnel semble d'accord sur le principe mais la discussion sur l'applicabilité d'une telle solution aboutit à une liste de contraintes métiers pouvant mener à l'abandon de cette solution. Par exemples, les problèmes de maintenance à assurer auprès des différents utilisateurs pour causes de pannes répétées ou encore les problèmes liés à l'évolution des logiciels qui deviennent de plus en plus gourmands en énergie et en mémoire et par conséquent les difficultés engendrées par l'installation de ces logiciels sur des équipements « anciens ». De même, le scénario d'extinction des équipements lors des pauses et la nuit soulève rapidement la question de la mise à jour des logiciels ou des connexions à distance dans le cas des serveurs par exemple.

Ainsi, il s'avère nécessaire de prendre en compte les acteurs et experts techniques dans le choix des scénarii afin de valider l'applicabilité des solutions proposées. Lors de l'application de la méthodologie, l'axe de réflexion pour identifier les scénarii d'amélioration est essentiellement environnemental, mais d'autres aspects doivent être considérés lors d'une réflexion plus globale sur l'amélioration des performances de l'organisation étudiée :

- Les **aspects financiers** relatifs à la mise en œuvre et au maintien de cette solution dans le temps. Les solutions sont généralement analysées en parallèle de leur retour sur investissement. Malgré un engagement environnemental de la part des mandataires, il est bien souvent nécessaire de justifier les dépenses effectuées lors de changement dans les modes de fonctionnement. Ainsi, une action engendrant de fortes dépenses pour un gain environnemental relativement faible ne sera pas prioritaire contrairement à une action obtenant les mêmes gains sur l'environnement mais avec une plus faible dépense au départ.
- Les **aspects techniques**, comme vu précédemment, les contraintes liées à la capacité de réalisation de la solution proposée constituent un élément non négligeable.
- Les **aspects juridiques** ou contraintes réglementaires doivent également faire l'objet d'une analyse approfondie. En effet, un scénario proposé pour améliorer la situation d'un point de vue environnemental ne doit pas aller à l'encontre de la réglementation s'appliquant à l'organisation ou aux équipements considérés.
- Les **aspects politiques** peuvent être plus délicats à appréhender mais ils doivent néanmoins avoir leur place dans la réflexion apportée pour optimiser le système présent. Qu'il s'agisse de politique interne à l'organisation ou externe, vis-à-vis des différentes parties prenantes, il est important d'analyser les scénarii d'amélioration au regard des oppositions existantes ou pouvant survenir suite à l'application de solutions.

- Les **aspects managériaux** et notamment tout ce qui a trait à l'acceptation sociale des solutions par les différents acteurs doivent être analysés en perspective de l'application d'une solution. En effet, sans l'implication des différents échelons d'une hiérarchie, il sera délicat d'optimiser certaines situations. Seule une motivation et donc une implication de l'ensemble des personnels peuvent permettre une optimisation des systèmes évalués. Ainsi, il est indispensable que les autorités hiérarchiques soient en accord avec ces changements. Ces derniers peuvent éventuellement avoir de lourdes conséquences sur la gestion quotidienne des équipements et ainsi bouleverser les habitudes du personnel, ou engendrer des modifications logicielles. Une adhésion du personnel qui aura à mettre en œuvre les nouvelles pratiques est donc indispensable. Un gain financier et environnemental potentiel ne permet pas toujours de convaincre les décideurs. De plus, il ne faut pas négliger le délai de prise de décision pour des changements conséquents dans une structure.

2.3 Développement technique de l'outil

2.3.1 Faire évoluer l'outil en réel outil de suivi

L'utilisation d'indicateurs de suivi en complément des indicateurs environnementaux permet d'augmenter la visibilité des impacts environnementaux. Ils assurent un suivi et une évaluation précise de la situation actuelle et des améliorations potentiellement réalisables par l'application des préconisations : gains environnementaux et financiers.

Les informations nécessaires à ce suivi peuvent fortement varier en fonction de la taille de l'organisation (nombre d'établissements, quantité de personnel, ...) et de son secteur d'activité : systèmes plus ou moins complexes (entreprise multinationale ou petite PME par exemple).

L'objectif principal d'un outil de suivi est d'avoir des informations concrètes sur la situation réelle afin d'adapter les solutions rapidement et ainsi diminuer les impacts sur l'environnement. Lorsqu'il est élaboré sur plusieurs années, l'outil de suivi permet un retour d'expérience à plus long terme permettant alors la sélection des actions les plus pertinentes en termes environnementaux, techniques et économiques selon les objectifs à atteindre.

Le suivi est un concept largement abordé dans la littérature relative à l'évaluation environnementale et à la gestion environnementale en entreprise. Il permet de s'assurer [Leduc et Raymond, 2000] :

- de la **vérification du bon déroulement d'une étude** : ainsi, lors des applications, une attention particulière a été portée sur l'explication et la justification des méthodes utilisées pour réaliser les calculs. De même, le choix des équipements faisant l'objet de mesures est réalisé de la manière la plus objective possible afin de collecter les données les plus pertinentes pour la réalisation de l'étude.
- des **engagements de la structure évaluée** (hiérarchie et exécutants) : la réalisation d'enquêtes auprès des utilisateurs et de différents responsables permet une meilleure appréhension de la stratégie de l'organisation envers l'utilisation des équipements

informatiques. De même, il a ainsi été possible de prévoir les modifications de comportements suite à l'application ou aux corrections de chartes au sein de l'établissement. Lors de la réalisation de cette étude au sein de l'EMSE, des fiches de bonnes pratiques ont été réalisées afin d'encourager une meilleure gestion des équipements comme par exemple la fiche « Bonnes pratiques en impression » qui a vocation à être installée auprès de l'imprimante multifonction.

- de l'**exécution des actions préconisées**. Plusieurs actions nécessitent d'importants investissements, par conséquent, le processus de décision pour leur mise en place est long. Néanmoins, les actions relatives à l'information des utilisateurs aux bonnes pratiques peuvent être effectuées assez rapidement. Par exemple, une charte concernant les équipements informatiques est déjà effective au sein de Casino et des fiches de bonnes pratiques sont élaborées au sein de l'EMSE.

- de la **réalisation d'une nouvelle évaluation après l'application des actions préconisées** pour en connaître les répercussions environnementales réelles.

Pour la personne qui réalise l'évaluation, ce dernier point peut s'avérer particulièrement pertinent et constitue un réel retour d'expérience de la méthodologie appliquée.

Pour le mandataire de l'étude, il permet de vérifier et de chiffrer les gains réalisés par l'application des diverses actions correctives.

A l'heure actuelle, il n'a pas été possible de réaliser une nouvelle fois l'étude dans son ensemble sur une des organisations étudiées. En effet, le temps nécessaire à l'application des actions est long et certaines actions n'ont pas encore pu être mises en œuvre.

L'évaluation réalisée est valable à un instant donné car elle est effectuée en fonction des équipements présents, des utilisateurs et de leur rythme de travail à cette période. Une modification des équipements, du nombre d'utilisateurs ou encore de leur comportement pourraient apporter des résultats totalement différents. Pour cela, il est indispensable de considérer les résultats obtenus lors de l'application comme une photo à un instant donné. **Un tableau de bord environnemental est intéressant pour rendre compte d'une situation à un moment donné.**

Par conséquent, il peut être intéressant que le tableau de bord soit construit comme un outil de suivi de l'évolution de la situation sur plusieurs années et ainsi d'avoir des résultats d'évaluation environnementale pertinents et représentatifs du système étudié. Ce n'est pas le cas actuellement de l'outil développé mais ce point constitue une des perspectives majeures d'évolution. En effet, l'outil Excel® développé permet une évaluation environnementale à un instant donné. Actuellement, il contient une seule feuille de saisie de données mais pas de base de données d'archivage qui permettrait une analyse comparative sur plusieurs années.

Si le suivi est réalisé de manière régulière et objective, l'évaluation environnementale pourra alors constituer une garantie du bon déroulement de l'action et constituer un soutien pour valider une décision antérieure (ou une orientation choisie dans la gestion de l'organisation) [André et al., 1999]. Il sera alors plus évident de mettre à profit les résultats obtenus et de communiquer sur les actions en question. Ainsi, André [André et al., 1999] encourage les responsables de projets d'évaluation environnementale au sein de l'organisation à rendre compte plus régulièrement des

résultats des études mandatées et de leurs suivis auprès des décideurs et des différentes parties intéressées (employés, actionnaires, fournisseurs, clients, partenaires, riverains, ...).

Le suivi assure la surveillance des effets du système sur l'environnement ainsi que des modifications de ce système. Le suivi systématique permet une identification des points forts et des points faibles ainsi qu'un retour d'expérience immédiat par rapport aux solutions mises en place directement.

Avec un objectif complémentaire de communication, un suivi peut permettre d'informer les différentes parties prenantes du succès de l'application de certaines actions d'améliorations et ainsi les avertir des démarches mises en œuvre concernant le respect de l'environnement.

Afin de faire évoluer notre outil en réel outil de suivi, plusieurs pistes pourraient ainsi être envisagées. Une première piste d'amélioration serait de structurer le TBE afin de permettre **l'intégration de valeurs sur plusieurs années ou mois** : suivi des consommations électriques sur une période, suivi des taux d'utilisation, suivi des achats d'équipements labellisés, quantité de déchets produites... Plusieurs indicateurs pourraient alors être suivis sur une période de temps définie afin de voir l'évolution de la situation par rapport à différents paramètres, définis préalablement en accord avec les mandataires de l'étude.

Une seconde possibilité serait de faire évoluer l'outil en **outil de suivi en temps réel** par la mise en place d'un système de collecte de données de consommations automatiques avec un traitement des données automatisé afin de donner un retour d'information immédiat à l'utilisateur de ses consommations et à l'administrateur de l'ensemble des consommations de ses usagers et équipements collectifs.

De même, il a été envisagé de développer la méthodologie afin qu'elle puisse être utilisée à l'aide d'un **logiciel informatique plus interactif** et plus facile d'utilisation qu'un simple tableur Excel. La présentation de la méthodologie permettrait alors de rendre son utilisation plus intuitive et ainsi améliorer sa prise en main par les utilisateurs. Il peut être envisagé, par exemple, de rendre l'outil plus convivial en guidant d'avantage l'utilisateur avec des macros VBA (*visual basic applications*).

Il pourrait d'ailleurs être envisageable que l'outil ainsi créé puisse être directement utilisé par les membres du personnel de la structure étudiée comme le responsable informatique assisté d'un correspondant environnement. Cette association des deux compétences (informatique et environnement) permettant alors d'aboutir à une vision complète de la situation et des solutions à mettre en œuvre.

2.3.2 Avoir un retour sur les applications (Gains calculés / Gains réels)

La dernière étape de la méthodologie concerne la proposition d'actions d'améliorations pour permettre de renforcer les points forts de l'organisation et de limiter les points faibles afin de réduire les impacts environnementaux liés aux systèmes informatiques et ainsi être plus éco-efficients.

Cependant, il s'avère intéressant de vérifier si les gains calculés lors de la phase de proposition d'amélioration ont réellement été obtenus et, s'ils sont éloignés des prédictions, corriger les scénarii ou chercher les raisons n'ayant pas permis d'atteindre les objectifs.

Un bémol se pose cependant à ces vérifications. Il faudrait en effet pouvoir réaliser les mesures « toutes autres choses égales par ailleurs ». Or, de nombreux paramètres entrent en compte dans les consommations électriques d'un équipement, dont l'activité de l'utilisateur, par exemple. Ainsi, dans le cas des solutions proposées lors de la seconde application (Ecole des Mines) concernant la mise en veille prolongée lors d'une absence du bureau supérieure à 5 minutes associée au changement de paramétrage de l'écran (contraste et luminosité), une estimation des gains a été testée par l'intermédiaire d'une seconde campagne de mesures. Cette seconde campagne a cependant abouti à une consommation électrique inférieure de 60% sur toute la période de mesures d'une semaine passant de 1,78 kWh à 0,714 kWh. Ce gain est largement supérieur à celui qui avait été envisagé par nos estimations préalables. Il est donc probable que d'autres facteurs aient pu contribuer à cette baisse comme un changement dans l'utilisation de l'équipement. Peut-être que sur une période de temps plus longue certaines habitudes de comportements (absence de mise en veille par exemple) peuvent réapparaître engendrant une diminution du gain constaté. Ainsi, cette seconde campagne de mesures a servi de retour d'expérience pour ces solutions mais ce n'est pas suffisant. Il est indispensable d'avoir ces retours d'expérience pour l'ensemble des solutions proposées, sur un panel d'équipements représentatif et sur une période de temps plus importante également afin de valider les changements de comportements sur du long terme.

Ainsi, il n'a pas encore été possible de comptabiliser les gains réellement réalisés lors de l'application des solutions proposées. **Un retour d'expérience sur plusieurs des propositions d'améliorations engagées permettrait de valider la méthodologie et les hypothèses des scénarii engendrant les gains envisagés.**

2.3.3 Développer la partie évaluation sur la phase de fin de vie : complétude du cycle de vie

Dans le contexte de l'informatique et comme précédemment évoqué dans le premier chapitre de ce manuscrit, la phase de fin de vie des EEE représente une part non négligeable de leurs impacts sur l'environnement. De plus, cette phase est très difficile à évaluer de part la complexité des filières mises en place et le manque d'information sur le devenir des équipements lorsqu'ils sortent de l'organisation dans laquelle l'évaluation est réalisée.

Par exemple, dans le cas de la société Casino IT, une grande quantité d'équipements est louée, par conséquent, ces équipements sont rendus au fournisseur lors de la fin du contrat. Ce matériel, dont

certaines équipements sont encore en état de fonctionnement, peut alors soit être envoyé dans des filières de fin de vie pour démantèlement, soit être reconditionné pour être loué une seconde fois en matériel d'occasion. D'après les informations recueillies auprès de Casino IT et de leur prestataire, il semblerait que pour des raisons de sécurité, les équipements soient envoyés en filière de démantèlement. Néanmoins, cette possibilité de seconde utilisation éventuelle amène une certaine réflexion sur la prise en compte de cette phase de fin de vie dans la méthodologie développée. Ainsi, une logique de passage du produit au service du prestataire fournissant le matériel informatique pourrait probablement s'avérer intéressante afin de limiter les gaspillages liés à un démantèlement précoce des équipements informatiques. Cependant, la méthodologie actuelle ne prend pas en compte les impacts liés à cette phase. Les données sur cette phase étant difficiles à obtenir et les données recueillies n'étant pas homogènes, cette étape a volontairement été écartée.

Ainsi, une réflexion doit être menée sur les possibilités existantes ou à développer afin de prendre en compte réellement l'intégralité du cycle de vie. Quelles seraient alors les données nécessaires pour mener à bien cette étape de l'évaluation et comment serait-il possible de les obtenir de la manière la plus fiable ? Concernant de nombreux déchets, des bordereaux de suivi de déchets sont établis mais ces derniers apportent-ils l'information pertinente pour les intégrer dans les évaluations environnementales ?

Partie 3 Perspectives scientifiques

Dans cette seconde partie, nous abordons les perspectives de recherche que ce travail de thèse a soulevées d'un point de vue scientifique. Dans un premier temps, il sera question de la sensibilité du milieu dans un contexte de l'évaluation environnementale d'un site. Dans un second temps, la discussion portera sur les facteurs de caractérisation pris en compte pour estimer les impacts environnementaux. Le troisième point de cette partie traitera de la question du périmètre de l'évaluation qui change progressivement pour s'intéresser désormais à un système plus étendu nommé le « système produit-service ». Mais ce périmètre s'élargit au-delà de ce système et concerne les organisations au sens plus large. Ainsi, la dernière partie abordera la notion d'évaluation environnementale d'une organisation.

3.1 La sensibilité du milieu : paramètre incontournable de l'approche site

Dans le contexte d'une évaluation environnementale basée sur une approche site, il semble incontournable d'évaluer les impacts environnementaux se produisant mais aussi quelles en seront les conséquences vis-à-vis du milieu récepteur où se produiront ces impacts. Ainsi, une analyse du milieu environnant doit être réalisée et doit être mise en perspectives des résultats apportés pour chaque impact environnemental quantifié.

La criticité d'un impact sur l'environnement peut être estimée selon trois paramètres [Custot et al., 2010] :

- la gravité de l'impact c'est-à-dire l'intensité ou la quantification de cet impact,
- la fréquence de répétition de cet impact : un impact fera d'autant plus de dégâts s'il se produit plusieurs fois en un même lieu,
- la sensibilité du milieu sur lequel cet impact se produit.

Ainsi, il est nécessaire de recueillir un certain nombre d'informations qui vont permettre d'évaluer si le milieu récepteur est « sensible » ou non aux divers aspects environnementaux, ou bien dans quelle mesure il pourra lui-même induire un aspect/impact environnemental sur le site. Ces informations peuvent être de diverses natures comme des éléments sur les populations environnantes (proximité, nombre, établissements sensibles : écoles, hôpitaux...), sur le climat local (pluviométrie pour évaluer par exemple le lessivage des surfaces extérieures, températures pouvant avoir une influence sur les équipements ou la conservation des produits, vents dominants en cas d'émissions atmosphériques), sur la nature du sol (perméable ou pas), sur la présence de nappes (profondeur, utilisation...), sur les eaux de surface concernées par d'éventuels rejets, etc [INERIS, 2011].

De nombreux textes réglementaires français et européens (notamment la loi de 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement et son décret d'application de 1977 ainsi que la directive européenne IED) incitent à la prise en compte de la sensibilité du milieu local mais aucun d'entre eux n'indique un cadre méthodologique pour atteindre cet objectif [Cikankowitz et al., 2009]. Les outils d'évaluation des impacts environnementaux des entreprises se formalisent et se multiplient mais aucun ne permet d'une part d'évaluer l'impact d'une activité et, d'autre part, de caractériser la sensibilité du milieu sur lequel elle est implantée. Pour estimer la

sensibilité des milieux, l'INERIS a élaboré des grilles propres à chaque thématique évaluée, afin de caractériser qualitativement le milieu récepteur à l'échelle locale (milieu aquatique, atmosphérique, humain...) ou à l'échelle globale pour les consommations, les déchets et certains rejets atmosphériques [INERIS, 2011]. L'utilisation de ces grilles permet d'attribuer un niveau de sensibilité à une situation. Ainsi, pour la thématique « rejets liquides chroniques ou accidentels », quatre classes ont été définies [INERIS, 2011] afin d'attribuer un niveau de sensibilité à chacune de ces situations (Tableau 43).

Tableau 43: Grille de sensibilité pour les rejets liquides chroniques ou accidentels [INERIS, 2011]

	Sensibilité
• Captage d'eau à proximité (site dans le périmètre de protection)	4
• Cours d'eau ou étendue d'eau en zone protégée* ou exploitée pour des besoins humains (ex : pisciculture) susceptible d'être atteint	3
• Nappe phréatique, cours d'eau en zone non protégée ou non exploitée ou présence d'exploitation humaine (ex : agriculture) susceptible d'être atteint(s)	2
• Tous les autres cas pour lesquels :	
○ Pas de migration possible de la pollution vers la ressource en eau	1
○ Pas d'exploitation humaine susceptible d'être atteinte	

* Zone protégée : zone présentant un intérêt particulier. Ex : ZNIEFF, ZICO, Natura 2000...

Ces grilles pourraient être utilisées dans le cadre de l'application de la méthodologie afin de compléter l'évaluation des impacts environnementaux et rendre l'évaluation pertinente vis-à-vis du milieu récepteur. Néanmoins, ces grilles ont été établies dans le cadre de l'évaluation des aspects environnementaux des installations classées pour la protection de l'environnement [INERIS, 2011]. Par conséquent, les thématiques abordées semblent peu adaptées à l'évaluation des impacts environnementaux des équipements informatiques d'une organisation. Le concept de ces grilles est donc pertinent mais elles nécessiteraient une adaptation au contexte de l'étude : l'informatique.

En 2009, Cikankowitz & Al. utilisent ce système de grilles et proposent une méthode d'évaluation de la sensibilité du milieu récepteur basée sur la définition, l'identification et l'organisation des thèmes caractérisant cette sensibilité (thèmes statiques : eaux souterraines, eaux superficielles, sol superficiel et air ; thèmes dynamiques : caractéristiques des milieux biologiques et humains) [Cikankowitz et al., 2009]. L'approche proposée est une approche qualitative basée sur un questionnaire simple et rapide. Il s'agit alors d'évaluer la sensibilité selon une échelle à quatre niveaux allant de peu sensible à très sensible. Cette approche ne fait pas intervenir une agrégation des critères concernés. Elle implique une évaluation du milieu qui permet d'identifier les points faibles par une juxtaposition graphique de l'évaluation semi quantitative des aspects environnementaux et qualitative de la sensibilité des milieux [Cikankowitz et al., 2009].

L'intérêt d'une telle démarche de connaissance et de caractérisation du milieu récepteur est d'intégrer la sensibilité du milieu dans une méthodologie globale d'évaluation des impacts environnementaux [Cikankowitz et al., 2009]. Ce n'est qu'en intégrant l'ensemble des informations relatives au contexte local et donc à la sensibilité du milieu récepteur qu'une évaluation

environnementale peut être considérée comme adaptée au site d'étude et donc « localisée ». Il est donc nécessaire, en perspective de notre travail de caractériser le milieu récepteur afin qu'il soit désormais considéré dans les études d'évaluation environnementale réalisées.

Enfin, la caractérisation du milieu récepteur est fréquemment associée à une démarche de gestion et d'analyse des risques. Cette dernière est une démarche à part entière permettant d'aboutir à l'analyse qualitative des sources de danger et à la quantification des risques [Dassens, 2007]. A la vue des différents impacts environnementaux inhérents aux équipements informatiques, il semblerait pertinent d'associer une analyse des risques à l'évaluation précédemment réalisée afin de mettre en perspectives les impacts identifiés avec les risques générés.

3.2 Les difficultés inhérentes à la détermination des facteurs de caractérisation

3.2.1 Les facteurs de caractérisation

- ***Base de données***

Toute évaluation environnementale repose sur la transformation de données d'inventaire diverses en impacts environnementaux. Il s'agit par exemple dans notre cas de convertir des consommations électriques en quantités d'émissions de dioxyde de carbone ou en dioxyde de soufre. Ce passage d'une métrique quantifiable en un indicateur environnemental est réalisé par l'intermédiaire de facteurs de caractérisation.

Dans le cas des ACV notamment, l'évaluation des facteurs de caractérisation se fait par l'intermédiaire de bilans de flux (entrants et sortants) ou de bilans matière. En théorie, il faudrait pouvoir obtenir (des fournisseurs, par exemple), les données spécifiques sur les impacts liés aux équipements effectivement utilisés par l'organisation étudiée. En l'absence d'un étiquetage environnemental exhaustif des équipements informatiques, l'obtention de ces données ferait l'objet d'études complexes, longues, et touchant souvent à des données considérées comme confidentielles par les entreprises. Ainsi, nous avons utilisé des résultats issus d'ACV et disponibles dans la base de données environnementales Ecoinvent [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010]. Concernant les émissions de GES, nous avons également utilisé les facteurs issus de la méthode Bilan Carbone® (version 6.1) [ADEME, 2010]. Avant de poursuivre sur les différentes méthodes de calculs des facteurs de caractérisation, il est important de souligner que tous les impacts environnementaux sont exprimés sous la forme d'une unité de référence (présentée dans le chapitre 1) comme le kg CO₂ équivalent ou le kg éthylène équivalent par exemple.

Dans ces bases de données, de nombreux facteurs sont disponibles et il est alors nécessaire de faire un choix en accord avec nos objectifs. Les facteurs disponibles sont élaborés sur la base de différentes méthodes de calculs présentées dans le Tableau 44. Chaque méthode propose des facteurs de caractérisation calculés sur la base de périmètres d'études, de modèles différents, etc. Certaines de ces méthodes comme CML apparaissent comme consensuelles dans le monde de

l'évaluation environnementale, d'autres sont spécifiques à certains pays, tel est le cas de la méthode EDIP développée plus spécifiquement pour les pays nordiques [Le Pochat, 2008]. Pour notre étude, le choix s'est porté sur la méthode CML 2001 du fait de la complétude des données nécessaires aux calculs des impacts environnementaux.

Tableau 44 : Méthodes d'évaluation des impacts présentes dans la base de données Ecoinvent [Hischier et al., 2010]

Method	Background publication
CML 2001	Guinée et al. 2001a; b
Cumulative energy demand (CED)	Hischier & Al., 2010
Cumulative exergy demand (CExD)	Boesch et al. 2007
Eco-indicator 99	Goedkoop & Spriensma 2000a; b
Ecological Footprint	Huijbregts et al. 2006
Ecological scarcity 1997	Brand et al. 1998
Ecological scarcity 2006	Frischknecht et al. 2009
Ecological Damage Potential (EDP)	Köllner & Scholz 2007a; b
EDIP - Environmental Design of Industrial Products 1997	Hauschild & Wenzel 1997, DK LCA Center 2007
EDIP - Environmental Design of Industrial Products 2003	Hauschild & Potting 2005
EPS - environmental priority strategies in product development	Steen 1999
IMPACT 2002+	Jolliet et al. 2003
IPCC 2001 (Global Warming)	Albritton & Meira-Filho 2001; IPCC 2001
IPCC 2007 (Global Warming)	IPCC 2007
ReCiPe (Midpoint and Endpoint approach)	Goedkoop et al. 2009
TRACI	Bare 2004; Bare J. C. et al. 2007
USEtox	Rosenbaum et al. 2008
Selected LCI indicators	ecoinvent final reports
CML	Centre of Environmental Science
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

Parmi les méthodes existantes (Tableau 44), cinq ont été retenues pour une évaluation comparative. La sélection de ces méthodes est basée d'une part sur leur utilisation pour l'évaluation environnementale des équipements informatiques dans la base de données et, d'autre part, sur les informations transmises par chacune de ces méthodes. Les cinq méthodes retenues sont CML 2001 ; IMPACT 2002+ ; Eco-Indicator 99 ; TRACI et EDIP. Elles sont présentées en Annexe 9 de ce manuscrit.

Toutes ces méthodes n'expriment pas les impacts sous la même unité. Il est donc parfois difficile de comparer les résultats entre elles. Le Figure 73 présente les résultats qui ont pu être comparés pour l'impact sur le changement climatique soit les émissions de CO₂ liées à la fabrication d'un ordinateur fixe.

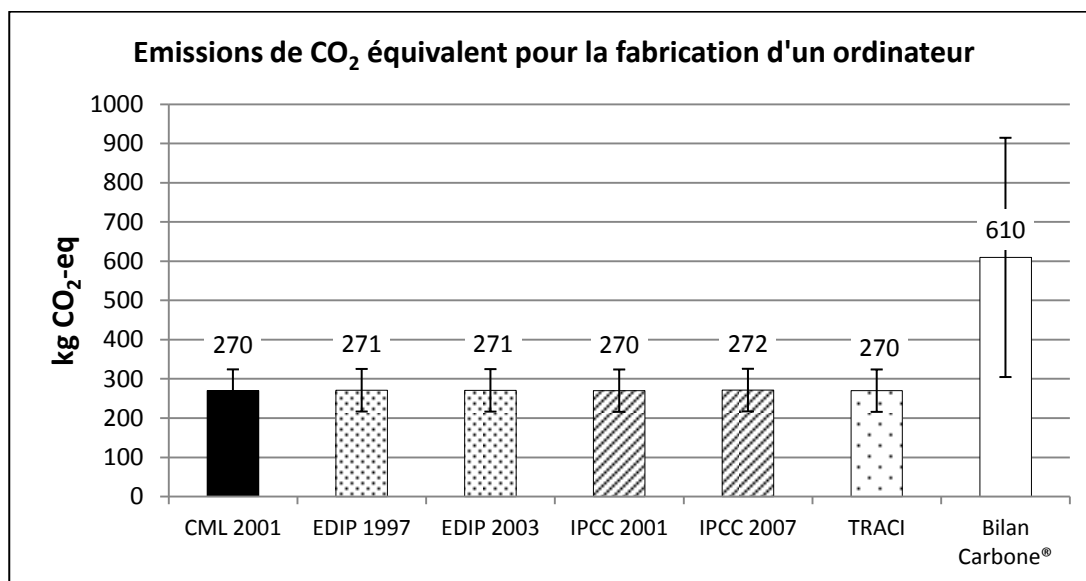


Figure 73: Comparaison des facteurs disponibles dans la base de données Ecoinvent et le facteur d'émission du Bilan Carbone® pour l'expression des émissions de CO₂ équivalent lors de la phase de fabrication d'un ordinateur fixe [Moreau et al., 2011b]

Ce graphique (Figure 73) met en évidence que les différents facteurs issus de la base de données Ecoinvent (CML 2001, EDIP 1997, EDIP 2003, IPCC 2001 et 2007 et TRACI) sont très proches. L'explication principale de cette proximité provient de la méthode de calcul ayant permis l'élaboration de ces différents facteurs. En effet, les méthodes de calculs permettant d'aboutir aux facteurs de caractérisation des méthodes CML, EDIP et IPCC sont toutes basées sur l'approche développée par le GIEC pour exprimer le potentiel de réchauffement climatique [GIEC, 2007], à savoir considérer la formation de CO₂ à partir des émissions de CO et examiner l'absorption de CO₂ biogénique comme impact négatif. En revanche, cette approche, tout comme l'approche Bilan Carbone®, ne considère pas la formation indirecte de monoxyde de diazote à partir des émissions d'azote, ne comptabilise pas les forçages radiatifs dus aux émissions entre autres de NO_x, de l'eau, du sulfate dans la partie inférieure de la stratosphère et de la haute troposphère. Enfin, l'éventail complet des effets indirects indiqués par le GIEC n'est pas considéré [Frischknecht et al., 2007].

De plus, l'incertitude mentionnée dans la base de données Ecoinvent, voisine de 20% sur ces valeurs, ne permet pas de les différencier. Ces résultats ont été mis en parallèle à celui obtenu par la méthode Bilan Carbone® dont l'incertitude de 50% ne permet pas de le distinguer clairement des autres facteurs d'émissions. Cependant, sa valeur est plus de deux fois supérieure aux autres valeurs, ce qui peut soulever des interrogations. Une explication de cette différence est proposée ci-dessous.

Les données présentes dans EcoInvent sont limitées aux matériaux utilisés, aux procédés de fabrication étudiés et à l'énergie nécessaire pour la fabrication. Ce facteur ne comprend donc pas par exemple l'amortissement des usines qui fabriquent ces équipements, la vie des personnels qui y viennent, les activités commerciales, etc. De plus, l'étude est déjà relativement ancienne (1998). Le facteur du Bilan Carbone® souhaite parler d'impact : il vise donc en général à comptabiliser les émissions dont la fabrication de l'item dépend (y compris donc une part de l'usine nécessaire à la

fabrication de l'item, dans le cadre de notre étude l'item correspond aux équipements informatiques). Ainsi, le premier objectif de la méthode Bilan Carbone® est d'obtenir une photographie de l'ensemble des émissions de GES pour une activité, un territoire, ... Plus l'évaluation réalisée sera large plus il sera facile de mettre en évidence l'ensemble des postes sur lesquels il est possible de jouer ensuite pour faire baisser son impact global sur le changement climatique [ADEME, 2010]. Outre la nature des gaz à effet de serre considérée ou non dans l'outil Bilan Carbone®, certains inventaires excluent certaines sources en fonction du contexte comme par exemple les émissions des moyens de transport (aériens ou maritimes) situés dans l'espace international, qui ne sont pas comptabilisées dans les inventaires nationaux fournis au secrétariat de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique [ADEME, 2010].

De même que pour Ecoinvent, le facteur d'émissions de l'ordinateur fixe qui se trouve dans le Bilan Carbone® est assez ancien (2002). Ainsi, ces éléments relatifs aux sources d'émissions des GES et les périmètres d'investigations concernant les émissions peuvent expliquer une grande part de l'écart entre ces différents facteurs [Le Teno, 2011].

De plus, un des points importants pour la détermination des impacts est la quantité d'électronique présente dans l'équipement par exemple la quantité de « wafer », de galettes de silicium ou encore le pays de fabrication. Entre divers ordinateurs (en particulier de diverses générations et modèles), l'électronique peut varier significativement, ce qui rend l'évaluation de l'impact délicate. Il s'agit là d'une seconde raison de variabilité des valeurs rencontrées. Des différences de processus de fabrication peuvent engendrer des différences significatives d'impacts pour le produit final. Il est donc difficile dans ces conditions d'estimer l'impact environnemental effectif de l'équipement acheté. Ainsi, si un établissement achète une dizaine de références différentes pour le même produit (ordinateur portable par exemple), la réalité ferait correspondre des dizaines de valeurs d'impacts environnementaux différents alors que la méthodologie affectera une seule valeur générique à ce type de produit.

Le Figure 63 (page 189) montre les différences pouvant exister lors de l'expression de l'impact sur le changement climatique en fonction de l'utilisation des facteurs de caractérisation issus de la méthode Bilan Carbone® et de la méthode CML 2001. La première conclusion est que le choix du facteur de caractérisation n'influence pas la hiérarchie entre amortissement et utilisation. Dans les deux cas, l'amortissement est plus impactant que l'utilisation (Figure 63b). La seconde conclusion concerne le classement des équipements les uns par rapport aux autres, du plus impactant au moins impactant par exemple (Figure 74). A la vue des incertitudes qui existent sur les facteurs de caractérisation ayant permis l'expression de l'impact sur le changement climatique, le classement obtenu avec les deux méthodes (Bilan Carbone® et CML 2001) peut être considéré comme identique. Par conséquent, pour notre étude, le choix du facteur de caractérisation n'influence pas la hiérarchie des équipements en termes d'impacts sur le changement climatique.

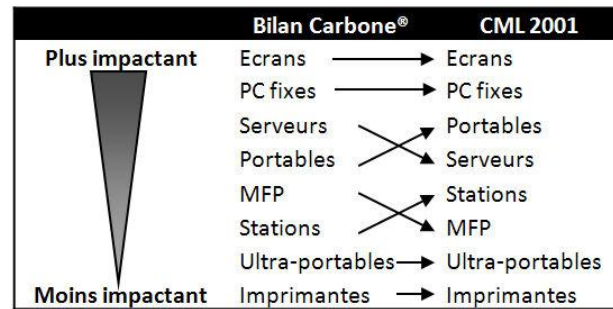


Figure 74: Classement des équipements informatiques en fonction de leur impact sur le changement climatique par l'utilisation des facteurs disponibles dans la méthode Bilan Carbone® et la méthode CML 2001.

Evidemment, des facteurs plus « proches » simplifieraient l'interprétation des résultats. Cependant, la seule façon de comprendre finement les différences entre les deux serait d'avoir une décomposition fine par composant de chaque équipement et d'être capable de tracer chaque composant (élément non réalisé jusqu'à présent) et de favoriser une éco-conception dès l'amont. En outre, malgré son évolution actuelle l'éco-conception ne constitue pas systématiquement un point important des phases amont et aval de la chaîne de production. Par exemple dans le secteur de la téléphonie mobile, la rentabilité dégagée est telle qu'elle n'impose pas pour l'instant de repenser massivement le design des produits pour des raisons environnementales.

Enfin une vraie décomposition fine et à jour ne se trouve pas non plus dans les ACV car elles sont obsolètes dès leur sortie (rapidité d'évolution des modèles) et souvent pour parties complétées par des experts pour les éléments n'ayant pu être renseignés et face à la complexité de la chaîne de production des équipements informatiques.

- **Disponibilité de la donnée**

Pour aborder les questions relatives à la disponibilité de la donnée, il est nécessaire de préciser que dans le cadre de notre étude, nous avons dû considérer trois types de données différentes :

1. **Les données issues des ACV des producteurs** des équipements : sans la réalisation d'ACV par les producteurs, ces données ne seront jamais connues. De plus, lorsqu'elles existent et que les producteurs les communiquent, il est essentiel de s'intéresser à l'unité fonctionnelle utilisée ainsi qu'aux références employées pour mener à terme l'étude.
2. **Les facteurs de caractérisation fournis dans les bases de données** : ces facteurs sont couramment utilisés pour exprimer les impacts environnementaux néanmoins, ils dépendent des données fournies par les constructeurs ou par des acteurs académiques et font appel à des modèles de calculs et d'expression des impacts parfois complexes.
3. **Les données nécessaires spécifiques au système informatique étudié** : l'application d'une évaluation environnementale des systèmes informatiques à l'échelle d'une organisation nécessite une adaptation des méthodologies d'évaluation environnementale classique ainsi qu'une connaissance approfondie de l'organisation. Pour répondre à cet objectif, la méthodologie développée propose une phase de collecte de données réelles avec des enquêtes et des mesures qui permettent de localiser et d'évaluer réellement l'impact environnemental.

Comme pour de nombreuses évaluations environnementales, un des problèmes majeurs est la disponibilité des données, qu'il s'agisse des données d'entrée ou des facteurs de caractérisation. Sayagh et al. mentionnent à ce sujet que les résultats d'une étude sont hautement dépendants de la disponibilité et de la qualité des données environnementales disponibles dans la littérature [Sayagh et al., 2010]. De plus, dans le cadre de notre étude, le secteur d'activité concerné est particulièrement sujet à la confidentialité, engendrant une faible quantité de données accessibles aussi bien dans les bases de données publiques que chez les fournisseurs ou fabricants de matériels. Certaines sont cependant accessibles mais concernent des études relativement anciennes (2006 à 2008) dans le domaine. Nous pouvons donc nous interroger sur la fiabilité de ces données notamment dans le cas de l'informatique où les équipements sont rapidement obsolètes (un an).

En effet, dans le domaine de l'informatique, les équipements produits changent rapidement. Par exemple, un ordinateur ne sera fabriqué sur une chaîne de montage que durant un laps de temps inférieur à un an. Au-delà de ce délai, la provenance des différents composants varie de manière trop importante pour assurer un taux de similarité significatif. L'absence de suivi automatique des données physiques et environnementales (contrairement aux données économiques) et le rythme trop faible ou la non systématisation des ACV réalisées ne permet pas de connaître avec précision les impacts environnementaux des équipements utilisés. De plus, bien souvent, les évaluations environnementales (ACV) sont réalisées par le constructeur lui-même et ce dernier ne souhaite pas communiquer les résultats pour des raisons de confidentialité et de compétitivité.

En l'absence d'un marquage environnemental obligatoire de l'ensemble des produits, les données concernant les technologies de l'information sont très souvent confidentielles. Ainsi, très peu de facteurs d'émission sont connus et disponibles publiquement. Les ACV, lorsqu'elles sont réalisées par les constructeurs (plus de la moitié des équipements électroniques mis sur le marché font l'objet d'ACV en 2010,) ne sont pas communiquées [Gartner, 2010]. Néanmoins, notons que les textes réglementaires relatifs à l'étiquetage environnemental des produits se multiplient ces dernières années, ce qui pourrait engendrer une communication plus importantes de la part des constructeurs sur les impacts environnementaux de leurs produits. Pour ce qui est des équipements informatiques, l'étiquetage porte essentiellement sur l'efficacité énergétique des produits. Le premier texte est la décision de 2006 [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2006b] relative à la coordination des programmes d'étiquetage relatifs à l'efficacité énergétique des équipements de bureau. Ce texte vise à promouvoir le programme Energy Star d'efficacité énergétique adopté conjointement avec les États-Unis. Il encourage la fabrication d'équipements de bureau à bon rendement énergétique. L'objectif étant de fournir aux consommateurs un label permettant d'identifier les appareils économes en énergie, permettant d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique et la protection de l'environnement. Il a été renforcé en 2010 par une directive européenne (directive 2010/30/UE) concernant l'indication, par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, de la consommation en énergie et en autres ressources des produits liés à l'énergie [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2010a]. Les indications imposées par les textes doivent être mentionnées et sont relativement peu

nombreuses et ne permettent donc pas d'obtenir l'ensemble des informations nécessaires pour la réalisation d'études d'évaluations environnementales.

De plus, des travaux sont actuellement en cours au sein de la commission européenne concernant l'empreinte environnementale des produits (Environmental Footprint of product) [Chomkham Sri et Pelletier, 2011]. L'étude actuellement en cours porte sur la méthodologie utilisée pour calculer les empreintes environnementales des produits et des organisations. Le but de cette étude est de fournir une analyse détaillée des méthodes existantes, et de recommander une approche méthodologique privilégiée. Ces travaux concluent qu'en l'état actuel, les méthodologies existantes ne fournissent pas une base adéquate pour permettre des comparaisons. Pour assurer des niveaux plus élevés de reproductibilité et de robustesse des résultats d'empreinte environnementale à l'échelle d'un produit, il faudra développer une méthodologie plus prescriptive que les méthodologies et normes actuelles [Chomkham Sri et Pelletier, 2011]. Ainsi, des catégories de produits doivent être définies et des guides sectoriels établis afin de poursuivre cette démarche de constitution d'une empreinte environnementale produit.

Seule une mise en commun de l'ensemble des études réalisées sur une même catégorie de produit permettrait de diminuer les incertitudes existantes sur les facteurs de caractérisation. Dans le cadre de notre étude, les résultats doivent donc être considérés avec précaution en prenant en compte majoritairement les ordres de grandeurs établis et non les valeurs d'émissions calculées dans les outils d'évaluation environnementale. Ainsi, les données utilisées permettent une approche comparative : d'un équipement à l'autre ou encore entre plusieurs établissements.

3.2.2 Des incertitudes et des hypothèses

- **Les incertitudes**

- a) **Incertitudes des facteurs de caractérisation (données issues des bases de données)**

Les données obtenues dans les bases de données possèdent des incertitudes qui peuvent être de deux ordres :

- des incertitudes sur les variables d'entrée
- des incertitudes liées aux hypothèses de calcul

L'estimation des incertitudes revient à calculer l'intervalle de confiance des valeurs des indicateurs d'impact en considérant les paramètres précédents. Il s'agira alors d'aboutir à une fourchette d'indicateurs de gains pour les actions d'amélioration.

La sensibilité des données par rapport aux données d'entrée permet de connaître l'intervalle de valeurs que peuvent prendre les résultats en fonction des données d'entrées utilisées. Pour la calculer, nous utilisons la formule proposée par J.M. Engasser [Engasser, 2010], à savoir :

$\text{Sensibilité} = (\Delta I / I) / (\Delta V / V)$	Équation 30
--	-------------

Avec :

- I = indicateur d'impact. Il correspond à la valeur utilisée pour exprimer l'impact dans le TBE.
- ΔI = Variabilité de l'indicateur d'impact. Cette variabilité est obtenue par l'analyse des différentes valeurs d'impacts existantes.
- V = Variable d'entrée. Il s'agit de la variable quantitative de l'organisation étudiée dont on cherche à évaluer l'impact par multiplication avec l'indicateur d'impact.
- ΔV = Variabilité de la variable d'entrée. Cette variabilité résulte des diverses hypothèses réalisées afin d'obtenir les variables d'entrées et donc de l'incertitude liée à cette donnée.

Les calculs ont été réalisés pour l'application au sein de l'EMSE. Ils sont présentés dans le Tableau 45. Ces résultats révèlent une sensibilité faible concernant l'expression de l'impact sur le changement climatique relatif aux consommations électriques annuelles. En revanche, cette sensibilité s'avère plus élevée pour l'expression de l'impact sur le changement climatique relatif à l'amortissement des ordinateurs (10,6%) et des imprimantes (7,4%). Ces valeurs de sensibilité montrent l'importance de mentionner, lors de la réalisation d'étude d'évaluation environnementale, les méthodes de calculs choisies ainsi que l'ensemble des hypothèses nécessaires à l'obtention des résultats.

Tableau 45: Calculs de la sensibilité des résultats du TBE en fonction des facteurs utilisés

	Explication	Amortissement ordinateurs	Amortissement imprimante	Consommation électrique
I	Facteur de caractérisation utilisé dans le TBE	608,7 kg CO ₂ éq.	109,8 kg CO ₂ éq.	0,084 kg CO ₂ éq.
ΔI	Variabilité existant sur le facteur de caractérisation	338,3	42,7	$3,12 \times 10^{-3}$
V	Variable d'entrée (Nombre d'équipement ou consommation électrique annuelle)	19 unités	2 unités	14 737 kWh annuel
ΔV	Variabilité de la valeur d'entrée	1	1	maximum 15 %
Sensibilité	Calculée d'après l'Équation 30	10,6	7,4	$3,2 \times 10^{-4}$

De plus, dans le domaine de l'informatique, les incertitudes peuvent également être liées aux choix des modèles d'équipements et de leur processus de fabrication. Ainsi, les facteurs de caractérisation peuvent fortement varier et dépendent :

- du choix d'ordinateurs fabriqués dans de plus ou moins bonnes conditions environnementales ;
- de l'évolution dans le temps des processus de fabrication.

Malheureusement, les résultats des études menées sur différents modèles d'équipements restent confidentiels. Par conséquent, il n'est pas encore possible de déterminer quantitativement l'influence de ces éléments sur les facteurs de caractérisation.

Les facteurs de caractérisation utilisés dans cette thèse afin de réaliser l'évaluation environnementale des équipements informatiques sont disponibles dans la base de données Ecoinvent [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010]. Cette dernière indique que l'incertitude relative à ces facteurs est d'environ 20% selon les études. Les causes de cette incertitude sont

multiples : non exhaustivité de l'étude réalisée (manque de données lors de la réalisation d'une étude), la méthode de calcul utilisée, absence de données ou non, représentativité ainsi que des erreurs d'échantillonnage ou des mesures [Morgan et Henrion, 1990], [Cullen et Frey, 1999].

De plus, les facteurs de caractérisation permettant la réalisation des calculs d'impacts sont déterminés pour un instant t et il est difficile de prévoir le devenir de l'état de l'environnement. Hirschier & Al. proposent une modélisation de l'incertitude en fonction du temps (Figure 75). Ainsi, une même quantité d'une substance peut avoir des effets variant en intensité selon si l'émission se déroule maintenant ou à un instant t+1.

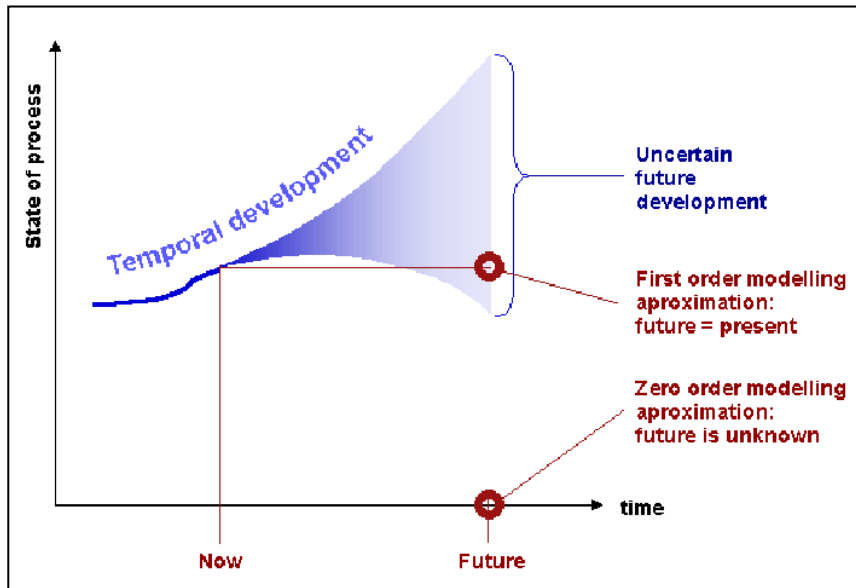


Figure 75 : Modélisation de l'incertitude [Hirschier et al., 2010]

Les incertitudes ont été calculées lors de la réalisation des études initiales pour la détermination des facteurs de caractérisation et peuvent être symétriques ou asymétriques par rapport à la valeur moyenne (Figure 76) [Frey et al., 2006]. Lorsque l'incertitude est symétrique, la valeur de l'incertitude est précisée à la suite de la valeur moyenne selon le modèle suivant (valeur moyenne \pm incertitude). Lorsque l'incertitude est asymétrique, les limites supérieures et inférieures doivent être spécifiées (valeur moyenne - limite inférieure, + limite supérieure) [Frey et al., 2006]. Nous avons considéré ici que l'incertitude est symétrique.

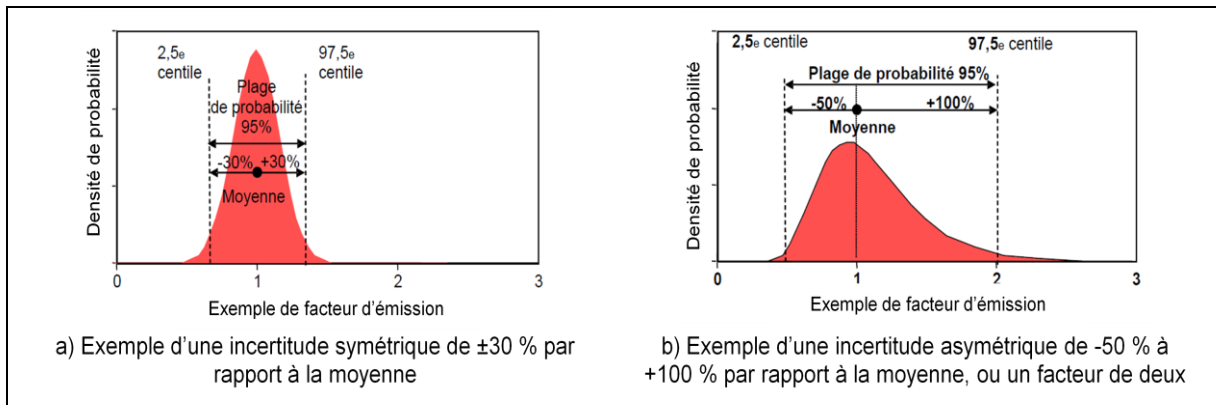


Figure 76 : Exemples d'incertitudes symétriques et asymétriques associées à un facteur d'émission [Frey et al., 2006]

La prédiction des émissions à long terme doit être fondée sur des modèles car ces émissions ne peuvent pas être mesurées aujourd'hui. Tous les modèles sont basés sur des hypothèses et des simplifications et sont donc discutables et incertains. Néanmoins, de nombreux modèles sont utilisés dans l'ACV afin de faire l'inventaire des impacts tout au long du cycle de vie complet d'un système, ce qui implique des milliers de processus et un intervalle temporel qui peut être élevé. Le postulat sur lequel se base notre étude est que ce que l'on évalue aujourd'hui est ce qui peut potentiellement exister dans le futur. En effet, la probabilité que l'avenir sera quelque chose de semblable à l'actuel est beaucoup plus élevée que la probabilité que l'avenir sera « absent » [Hischier et al., 2010].

Dans la littérature [Rousseaux, 1993], deux visions se distinguent pour palier à la complexité des phénomènes et à leurs incertitudes

- la vision négative qui explique que les incertitudes sont liées aux études environnementales, par conséquent toute décision résultant d'une telle évaluation sera basée sur une large part d'incertitudes.
- la vision optimiste admet que l'évaluation environnementale ne permet pas encore d'obtenir des résultats fiables pour cause de mauvaise connaissance des phénomènes naturels et d'interrelations des composants émis. Il devient donc nécessaire de continuer les recherches sur le sujet afin de palier à ce manque de connaissance et améliorer la compréhension des phénomènes impliqués. Les avancées dans le domaine des évaluations environnementales permettent de réduire les incertitudes dans l'interprétation des résultats. A l'heure actuelle, toute évaluation doit être considérée avec mesures et précautions concernant les incertitudes qui encadrent les résultats affichés.

Ainsi, pour des études telles que celle menée dans cette thèse, il est nécessaire de se référer à des données « publiques », disponibles sur des bases de données. Cependant, ces données sont bien souvent anciennes ; seules des données datant de la fin des années 1990 (1998 et 1999) sont disponibles alors que les évolutions technologiques, tant au niveau des équipements que de leurs

technologies de fabrication sont si rapides que les données d'ACV peuvent devenir obsolètes très rapidement (après 2 ou 3 ans). Cependant, elles ont le mérite d'être communes, disponibles et utilisées comme référence.

Focus sur les incertitudes liées à l'évaluation du critère « radiations ionisantes » :

Les conclusions obtenues en observant l'indicateur d'impact sur les radiations ionisantes apparaissent parfois contraires à celles obtenues sur les autres indicateurs. Par exemple, pour cet indicateur, l'impact relatif à l'utilisation des équipements informatiques apparaît plus important que celui lié à leur amortissement. (Pour l'ensemble des autres indicateurs d'impacts, c'est la phase d'amortissement qui est plus impactante que la phase d'utilisation, voir Figure 65).

Néanmoins, ces résultats doivent être analysés au regard de la fiabilité des données utilisées et notamment des facteurs de caractérisation et leurs incertitudes ainsi que vis-à-vis de l'indicateur d'impact sur les radiations ionisantes dont l'existence et la pertinence elles-mêmes ont été remises en question par de nombreuses études [Murray et Acharya, 1997] [Frischknecht et al., 2000] [Guerrant et al., 2002] [Allotey et Reidpath, 2002] [Oliver, 2005].

Dans un premier temps, nous discuterons de l'unité de référence retenue pour exprimer cet indicateur : le DALYs (*Disability Adjusted Life Years*). Cette unité, contrairement aux autres indicateurs d'impacts n'est pas directement reliée à une quantité de matière rejetée dans l'environnement et sa durée de vie (temps nécessaire avant sa dégradation) dans l'environnement. En effet, le DALYs est une unité de référence qui relie les émissions de becquerel par an (le facteur de dommage) à l'activité d'une substance dans l'environnement. Cette équation (Équation 13) permet ainsi d'exprimer une durée (en années) correspondant à des années de vie humaine perdues (nocivité des radiations ionisantes sur les tissus vivants).

Pour rappel :

L'indicateur de radiation ionisante est basé sur cette notion de DALYs et est calculé à l'aide de l'Équation 13 [Frischknecht et al., 2000].

$$Radiation\ ionisante = \sum_{ecomp} \sum_i Damage\ Factor_{ecomp,i} \times a_{ecomp,i} \quad \text{Équation 13}$$

Avec :

- i = substance considérée
- ecomp = émission dans le compartiment considéré (air, eau douce, eau de mer)
- $a_{ecomp,i}$ = activité de la substance i émise dans le compartiment considéré (en kBq)

Ainsi, par une méthode de calcul allant au-delà du dommage (comme cela peut-être le cas des autres indicateurs de calculs), l'indicateur d'impact sur les radiations ionisantes est soumis à une polémique quant à sa représentation quantitative de l'impact.

En effet, le passage d'une émission de becquerel en années de vie représente une forte source d'incertitudes. La radioactivité d'une substance ainsi que son temps de « demi-vie » peuvent être connus mais possède une incertitude à laquelle s'ajoute alors la réaction du tissu vivant vis-à-vis de cette substance. L'évaluation de cet effet délétère sur l'organisme s'avère alors particulièrement complexe à réaliser et engendre des incertitudes importantes sur toutes les tentatives de quantification de cet impact [Cazala, 2008].

Enfin, du fait des trois précédentes critiques relatives à l'unité de référence, la méthode de calcul de l'impact et les incertitudes sur sa quantification, l'impact sur les radiations ionisantes exprimé en DALYs reste un sujet n'ayant pas encore fait consensus au sein de la communauté scientifique experte du domaine.

Par conséquent, les conclusions de notre étude sur cet impact doivent être modérées et prises en considération dans un objectif de tentative d'expression de cet impact. Cependant, et en particulier dans le contexte français de production d'électricité fortement marqué par la production thermonucléaire, ce sujet nous semble présenter d'intéressantes opportunités de recherche afin de mieux prendre en compte les impacts environnementaux générés par la filière de production d'électricité française au sein des études d'impacts liés à des équipements consommant de l'électricité.

b) Incertitudes liées aux hypothèses : Equipements absents des bases de données.

Les facteurs de caractérisation nécessaires pour réaliser une étude telle que celle présentée sont peu nombreux, peu disponibles dans la littérature actuelle et anciennes. Pour des raisons de confidentialité des données et d'évolution rapide du secteur informatique, même une donnée récente peut se trouver rapidement obsolète rendant l'évaluation environnementale peu pérenne. Par conséquent, nous avons établi plusieurs hypothèses afin de réaliser l'évaluation des impacts environnementaux des systèmes informatiques rencontrés.

De plus, du fait de la multiplication et de la diversification des équipements, les bases de données ne peuvent contenir des informations sur l'ensemble de ces équipements, souvent spécifiques aux différents métiers étudiés, et encore moins sur les différents modèles disponibles. Par conséquent, certaines catégories d'équipements ne sont pas représentées dans ces bases de données. Des hypothèses doivent alors être établies pour estimer leurs impacts. Pour notre étude, nous avons employé des hypothèses d'équivalence lorsque des équipements ont été considérés comme comparables et des hypothèses d'extrapolation qui permettent de relier plusieurs équipements entre eux et un facteur de caractérisation. Ces hypothèses présentées précédemment sont mentionnées dans le tableau 46. Elles sont basées sur les différentes catégories d'équipements présents ainsi que sur des équivalences pouvant être établies entre ces catégories. Par exemple, dans la première étude de cas avec la société Casino IT, une catégorie non négligeable d'équipements devant faire l'objet de l'évaluation était constitué des systèmes d'encaissement. De part leur similarité avec un ordinateur fixe, il a été décidé de prendre le même facteur d'émission pour ces deux catégories. Il s'agit là d'une hypothèse d'équivalence entre deux équipements. Dans

le cas des ordinateurs portables et ultra-portables, une hypothèse d'extrapolation a été employée afin d'exprimer les impacts environnementaux des ultra-portables. En effet, ces derniers n'ayant pas de facteurs de caractérisation disponibles, nous avons considéré les facteurs disponibles pour les ordinateurs portables que nous avons exprimés au *pro rata* du poids des deux équipements.

Ce système d'hypothèses d'équivalence ou d'extrapolation n'est pas nouveau et est utilisé dans les études environnementales afin de palier aux manques de données nécessaires à la bonne réalisation de l'étude [Ecobilan, 2004] [Rousseau, 2007] [Hubert, 2011]. Ces hypothèses peuvent être effectuées sur la base de procédés, de substances [Gnansounou et Dauriat, 2004] ou encore d'effets comparables.

Néanmoins, en basant les résultats de l'évaluation environnementale sur des hypothèses telles que celles-ci, nous ajoutons une incertitude sur les facteurs de caractérisation que nous utilisons pour exprimer les impacts environnementaux. Cette incertitude est au minimum équivalente à l'incertitude existante sur le facteur de caractérisation initial soit de l'ordre de 20% pour les facteurs issus de la base de données Ecoinvent et d'environ 50% pour les facteurs issus de la méthode Bilan Carbone®.

Tableau 46 : Hypothèses de calculs et coefficients d'émissions utilisés dans l'étude

	Hypothèses pour les coefficients d'émissions	Coefficients d'émissions	
		kg C éq.	kg CO ₂ éq.*
Ordinateur fixe	Coefficient donné dans le guide des facteurs d'émissions du Bilan Carbone [Guide FE v6.1 juin 2010] en enlevant les émissions liées à l'écran	166,3	608,7
Ordinateur portable	Hypothèse basée sur les émissions liées à la production d'un ordinateur fixe, au pro-rata du poids d'un ordinateur portable (Poids = 2,32 kg). Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de portables présents.	67,8	248,0
Ordinateur ultra-portables	Hypothèse basée sur les émissions liées à la production d'un ordinateur fixe, au pro-rata du poids d'un ultra-portable (Poids = 1,59 kg). Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles d'ultra-portables présents.	46,3	169,6
Imprimante	Coefficient donné dans le guide des facteurs d'émissions du Bilan Carbone [Guide FE v6.1 juin 2010] " <i>Pour les "petites imprimantes", Le "contenu en électronique" étant 5 à 6 fois inférieur et l'essentiel de la consommation d'énergie "résidant" dans l'électronique, nous prendrons, à titre conservatoire, un facteur d'émission 5 à 6 fois moindre, à savoir 30 kg équivalent carbone par unité.</i> "	30,0	109,8
MFP	Coefficient donné dans le guide des facteurs d'émissions du Bilan Carbone [Guide FE v6.1 juin 2010] " <i>Considérant que le matériel de reprographie n'est rien d'autre que du matériel informatique particulier et sur la base des résultats du § précédent, il ressort qu'un photocopieur a un facteur d'émission moyen de 800 kg équivalent carbone.</i> "	800,0	2 928,0
Serveurs	Facteur d'émission associé à une unité centrale (= 140 kg C éq), au pro-rata du poids par rapport à un serveur (Poids = 49,9 kg). Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de serveurs présents.	580,7	2 125,4
Serveurs lames	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à un serveur lame (Poids = 4,63 kg). Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de serveurs lame présents.	53,9	197,2
Systèmes d'encaissement	Une caisse est assimilable à l'unité centrale d'un ordinateur classique associée à un écran tactile. L'ensemble est plus petit mais l'écran étant tactile il est plus impactant qu'un écran classique d'ordinateur.	350,6	1 283,2
Balances	Assimilé à de petites imprimantes de part la taille et la complexité du système.	30,0	109,8
Petits appareillages	En réunissant les impacts des portables et de leurs chargeurs. Assimilé à de petites imprimantes de part la taille et la complexité du système.	30,0	109,8
Systèmes propres aux entrepôts (embarqués)	Un embarqué comporte une unité centrale, un écran, un clavier et une petite imprimante. Donc assimilable à un ordinateur avec un écran + une imprimante (petit modèle).	380,6	1 393,0
Gros systèmes	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à un gros système (Poids = 967,67 kg). Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de gros systèmes présents.	28 201,6	103 217,8
Baies de stockage	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à une baie de stockage (Poids = 913,19 kg). Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles de baies de stockage présents.	26 613,8	97 406,6
Robot de sauvegarde	Facteur d'émission associé à une unité centrale, au pro-rata du poids par rapport à un robot de sauvegarde (Poids = 1 954 kg). Les poids utilisés pour calculer la moyenne sont issus des documentations constructeurs pour les modèles d'un robot de sauvegarde présents.	56 947,0	208 426,0

* 1 kg C éq. = 3,67 kg CO₂ éq.

Ainsi, à la vue des différents calculs liés aux incertitudes des données utilisées dans le tableau de bord environnemental, il apparaît que l'incertitude la plus importante résulte des facteurs de caractérisation utilisés pour exprimer les résultats de l'évaluation en termes environnementaux : incertitudes variant de 20 à 50% selon la méthode utilisée. A cette incertitude, s'ajoute celle liée à la sensibilité des facteurs de caractérisation sélectionnés (jusqu'à 10 %, voir Tableau 45). **Soit une incertitude totale sur ces facteurs importante qui peut aller jusqu'à 60%.**

- **Les hypothèses**

En donnant un poids plus ou moins forts aux différents aspects environnementaux, le choix de la méthode de caractérisation retenue et donc des facteurs d'émission permettant de réaliser l'évaluation environnementale peut influencer les résultats de l'étude et donc la décision finale.

Par exemple, du fait d'un pourcentage élevé de production électrique thermonucléaire, la méthode Bilan Carbone® attribue un coefficient d'émission de GES plus faible à l'électricité produite en France que dans un autre pays de l'Union Européenne [Gondran, 2012]. En effet, 78% de l'électricité française est générée par le nucléaire en moyenne annuelle. Le choix du facteur d'émissions français (1 kWh correspond à une émission de 0,084 kg CO₂ éq. avec le mix français et de 0,35 kg CO₂ éq. avec le mix européen) [ADEME, 2010] donne peu d'importance aux impacts associés à des consommations d'électricité et donc attribue un faible poids, en France, aux émissions de GES liées aux consommations électriques. Si les émissions de gaz à effet de serre sont considérées comme représentatives de l'ensemble des impacts générés, une organisation pourrait baser sa politique environnementale sur les résultats de son Bilan Carbone®. L'électricité apparaîtra alors comme ayant un faible poids, ce qui risque de ne pas susciter une réflexion sur les diminutions de consommations électriques. D'autre part, ce résultat peut être biaisé car les émissions de gaz à effet de serre générées dépendent du moment de l'année, voire de la journée où l'électricité est consommée. En effet, en période de pointe de la demande électrique, la production fait davantage appel à des centrales thermiques au gaz. Si l'organisation consomme plus d'électricité en période « de pointe » qu'en période de base, les consommations électriques de pointe devraient donc être affectées d'un coefficient d'émission supérieur (180 gCO₂/kWh au lieu des 84 gCO₂/kWh) [ADEME, 2005].

Ainsi, lors de la réalisation de l'étude, il faudra expliciter le choix des facteurs d'émission et l'influence des différents choix possibles dans les résultats obtenus et les conclusions élaborées. Dans la base de données Ecoinvent, des mix énergétiques sont également proposés pour la France et pour l'Union Européenne. Les facteurs de caractérisation pour 1kWh consommé extraits de la base de données Ecoinvent pour la méthode de calcul CML 2001 sont présentés dans le Tableau 47.

Tableau 47: Facteurs de caractérisation CML 2001 [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010] et Bilan Carbone® [ADEME, 2010], pour la consommation de 1 kWh

	CML 2001		Bilan Carbone®	
	Mix français	Mix européen	Mix français	Mix européen
Changement climatique (PRG 100a)	8,73E-02	4,88E-01	8,4E-02	3,5E-01
Epuisement de l'ozone stratosphérique	6,40E-09	2,83E-08		
Epuisement des ressources fossiles	5,91E-04	3,61E-03		
Acidification	5,06E-04	2,17E-03		
Ecotoxicité d'eau douce	3,70E-02	2,26E-01		
Ecotoxicité des sédiments d'eau douce	7,98E-02	4,78E-01		
Ecotoxicité d'eau marine	1,44E-01	8,24E-01		
Ecotoxicité des sédiments d'eau marine	1,51E-01	8,42E-01		
Ecotoxicité terrestre	3,15E-05	8,60E-05		
Toxicité humaine	8,80E-02	7,50E-02		
Radiation ionisante	2,33E-08	7,92E-09		

Le choix du mix français par rapport au mix européen pour l'expression de l'impact relatif aux consommations électriques diminue la valeur de l'impact pour la majorité des indicateurs environnementaux. Seuls les impacts sur la toxicité humaine et les radiations ionisantes ont des coefficients plus importants avec le mix français qu'avec le mix européen (Tableau 47).

Une explication simple pour la différence entre les deux mix énergétiques est que la production d'électricité française est essentiellement thermonucléaire. La technologie nucléaire produit moins de CO₂ mais provoque d'autres impacts environnementaux, et en particulier l'émission de radionucléides qui sont mal pris en compte actuellement dans les bases de données et indicateurs d'ACV. D'autre part, si des données sur l'ACV du nucléaire existe de part le monde [Jazayeri et al., 2008], en France, ce sujet est considéré comme confidentiel par les producteurs d'électricité nucléaire et il est difficile d'obtenir des données officielles. Le risque de cette situation est que si les impacts autres que les émissions de gaz à effet de serre sont peu quantifiés, on finisse par les oublier. Or si les émissions de CO₂ semblent être représentatives de la quasi-totalité des impacts que nous avons étudiés, ce n'est pas le cas pour les consommations d'énergies primaires et l'impact relatif aux radiations ionisantes (Figure 77). Notons de surcroît que notre méthodologie, de même que l'ACV [Aissani, 2008], ne prend pas en compte les risques générés par les différentes technologies utilisées.

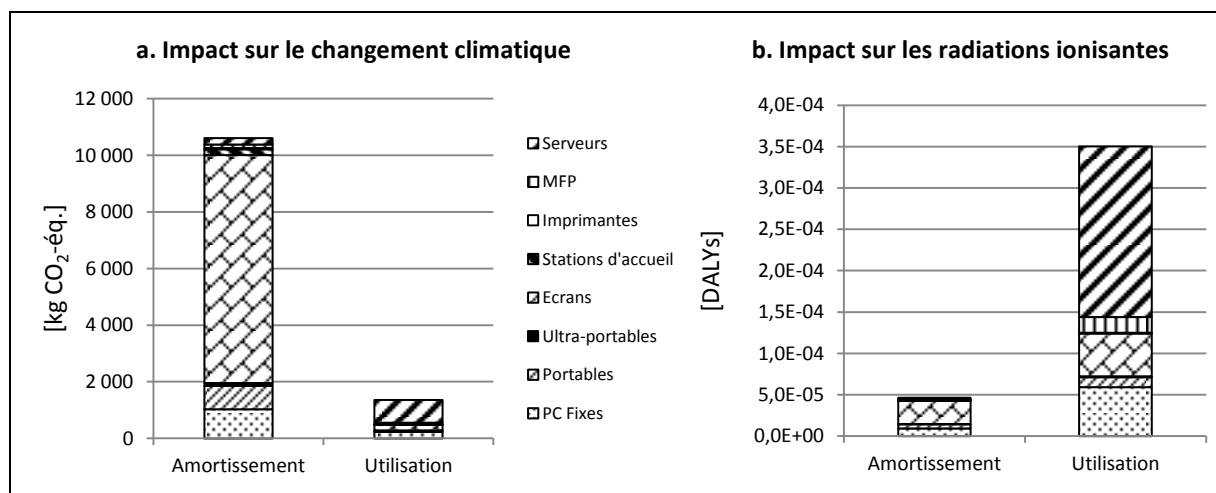


Figure 77 : Expression des impacts sur le changement climatique (a) et sur les radiations ionisantes (b) des équipements informatiques présents au sein du 3^{ème} étage de l'Ecole des Mines.

Pour vérifier l'influence du mix électrique choisi, les mêmes calculs que précédemment ont été réalisés en utilisant les coefficients pour le mix européen. Les résultats présentés dans la Figure 65 montrent que l'emploi des facteurs de caractérisation du kWh européen engendre une augmentation de la part des émissions liées à la phase d'utilisation pour l'ensemble des impacts environnementaux évalués exceptés l'impact sur la toxicité humaine et les radiations ionisantes. Alors que les résultats sont cependant proches pour la toxicité humaine, la différence sur l'impact radiations ionisantes est importante. Les résultats de ce graphique montrent l'influence que peut avoir le choix des facteurs de caractérisation retenus pour exprimer les impacts environnementaux.

En France, les émissions de CO₂ de l'électricité à la production varient fortement selon la moyenne annuelle considérée (sur l'ensemble des moyens de production France, les émissions des seuls parcs hydrauliques et nucléaires (sans émissions), ou la production du parc de centrales au charbon (de l'ordre de 900 gCO₂/kWh)) [RTE et ADEME, 2007]. Ceci conduit de fait, en France, à des variations horo-saisonniers importantes du contenu en CO₂ du kWh livré sur le réseau, tandis que dans les autres pays européens, cette dispersion est limitée dans la mesure où la production d'électricité à partir de centrales thermiques à combustibles fossiles représente une partie importante de la production en base [ADEME, 2005]. De plus, dans la mesure où les moyens émetteurs (centrales thermiques à flamme) fonctionnent en « terme de bouclage de l'équilibre offre-demande » (flux tendu) en France, la moyenne nationale varie assez sensiblement en fonction des conditions de température et des caractéristiques de fonctionnement du parc. Après avoir diminué depuis 1990, le contenu en émissions CO₂ équivalent de l'électricité française évolue désormais dans une fourchette de 60 à 120 gCO₂/kWh, largement inférieure à la moyenne européenne (environ 340 gCO₂/kWh) [ADEME, 2005].

Dans le cas de la première application avec la société Casino IT, le choix du facteur d'émissions correspondant au mix énergétique français a été retenu afin d'être cohérent avec la réalisation en parallèle du Bilan Carbone® du groupe Casino. Le mandataire souhaitait une correspondance entre les deux évaluations réalisées. Nous avons également retenu le mix énergétique français pour la seconde application au sein de l'EMSE afin de pouvoir établir des comparaisons entre les impacts environnementaux des deux applications pour des équipements comparables.

3.2.3 Autres éléments importants concernant les facteurs de caractérisation

Les autres éléments relatifs à la détermination des facteurs de caractérisation utilisés résident principalement dans l'échelle de temps choisie pour déterminer ces facteurs ainsi que sur l'emploi de fonction d'évaluation linéaire.

- ***Des facteurs de caractérisation qui dépendent implicitement des échelles de temps considérées***

La question de l'échelle de temps considérée a notamment fait l'objet de débat dans le cadre de l'utilisation du facteur de caractérisation relatif à l'impact sur le changement climatique (Chapitre 12.3.2). En effet, par la convention cadre des Nations Unies de 1992, la durée de 100 ans pour le PRG a été fixée pour exprimer les projections des émissions en équivalent CO₂. Cette durée est devenue progressivement une règle et l'ensemble des résultats de calculs d'impacts sur le changement climatique utilise le PRG à 100 ans [Dessus et al., 2008a], [Dessus et al., 2008b].

Cependant, le PRG d'un gaz dépend de la durée au cours de laquelle il est calculé. La durée de vie des gaz à effet de serre dans l'atmosphère dépend de la nature des gaz et des diverses réactions pouvant se produire. Ainsi, l'épuration des gaz à effet de serre de l'atmosphère peut survenir [ADEME, 2011b] :

- par un **phénomène physique** (pluie, condensation, évaporation) ;
- par une **réaction chimique intervenant au sein de l'atmosphère** (exemple de réaction avec les radicaux libres pour le méthane) ;
- par une **réaction chimique, photochimique ou physique intervenant à la frontière entre l'atmosphère et les autres compartiments de la planète** (exemple de réaction photochimique du CO₂ par la photosynthèse des plantes) ;
- soit par **suite d'un phénomène radiatif** (exemple les rayonnements électromagnétiques émis par le soleil dégradent des molécules dans la haute atmosphère).

Un gaz qui est rapidement éliminé de l'atmosphère peut avoir un effet initial important, mais qui décroît rapidement. Son impact à 100 ans sera donc considéré comme faible alors que si on l'avait étudié pour une durée plus courte (50 ans, par exemple), mais quand même très pertinente en termes d'échéances climatiques, il aurait été considéré comme bien supérieur.

La durée de vie d'un gaz dans l'atmosphère donnée n'est pas connue précisément et les valeurs de ces PRG ne sont ainsi finalement que peu précises, même si l'indicateur est considéré aujourd'hui comme relativement stabilisé méthodologiquement. Pour cette raison, il est important de toujours préciser la durée considérée lors des calculs et de leur présentation [ADEME, 2011b].

Ainsi, la valeur du PRG d'un gaz dépend de la vitesse de son élimination progressive au cours du temps. Excepté la vapeur d'eau, qui s'évacue en quelques jours, les gaz à effet de serre mettent de nombreuses années à s'éliminer de l'atmosphère. Les courbes de la Figure 78 reflètent la durée de résidence des gaz dans l'atmosphère, qui va parfois évoluer à l'avenir (notamment pour le CO₂) [Durin, 2010].

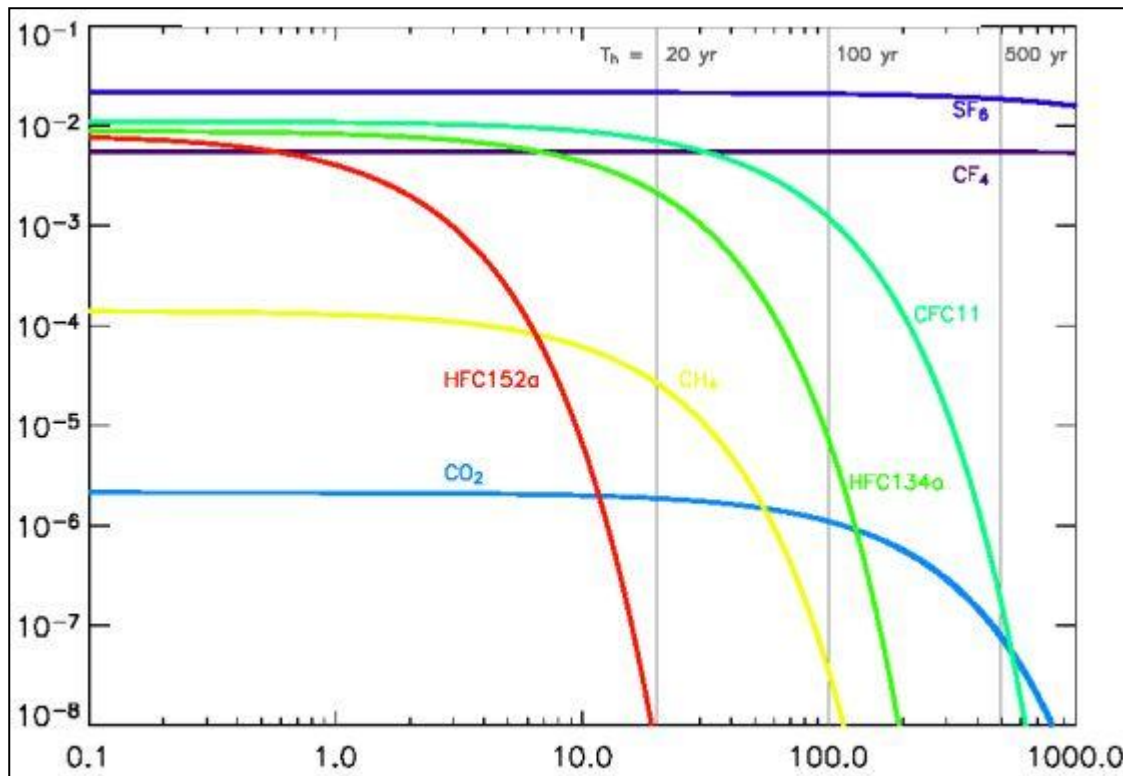


Figure 78: Forçage radiatif au cours du temps d'une tonne de gaz émise à l'instant 0 [Source : Hauglustaine, 2009 dans [Durin, 2010]] (axe horizontal : en années échelle logarithmique ; axe vertical : forçage radiatif en W/m² – échelle logarithmique)

A la lecture de ce graphique, il est possible de conclure qu'il est nécessaire d'attendre de l'ordre du siècle (100 ans) avant que le CO₂ ne commence à être éliminé de l'atmosphère de manière significative [Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1992], de l'ordre de 10 ans pour le méthane, mais que certains halocarbures (comme le CF₄) n'ont toujours pas commencé à s'épurer significativement de l'atmosphère au bout de 1 000 ans [Durin, 2010]. Par conséquent, si une autre durée avait été choisie par convention, les résultats des estimations de GES auraient été toutes autres... Ainsi, donc, que les conclusions en termes de priorité d'actions qui peuvent être tirées des études en question. Ainsi, l'évaluation sur une même échelle des différents gaz à effet de serre émis par l'activité humaine s'avère complexe [Dessus et al., 2008b]. Néanmoins, une estimation est indispensable pour élaborer des plans d'action, même si cette comparaison s'avère problématique.

Il n'existe pas de méthode parfaite pour comparer les émissions, mais des conventions ont été adoptées pour permettre cette comparaison (PRG à 100 ans). Ces conventions indispensables doivent être connues et prises en considération lors de l'analyse et de l'interprétation des

résultats. De même, pour des raisons d'honnêteté et de comparabilité, l'ensemble des hypothèses et conventions permettant d'aboutir à un résultat doivent être présentées simultanément.

Cette problématique, ici développée pour l'impact sur le changement climatique, est une question concernant l'échelle de temps considérée pour les facteurs de caractérisation. Elle existe donc pour l'ensemble des impacts environnementaux. Par conséquent, l'ensemble des résultats doivent être considérés avec précaution et sont considérés comme valables qu'à un instant donné et pour des hypothèses de calculs précisées.

- ***Des fonctions d'évaluation linéaires***

De nombreux impacts environnementaux sont quantifiés par l'intermédiaire de fonctions linéaires, or, cette linéarité pourrait être remise en cause dans de nombreux cas. Par exemple, l'impact sur le changement climatique lié à l'émission d'un gaz dépend de la quantité émise. Cette émission n'étant pas linéaire dans le temps [ADEME, 2010]. L'explication réside dans l'effet du rayonnement terrestre : plus un gaz est présent, plus les longueurs d'onde du rayonnement terrestre qu'il est susceptible d'absorber sont déjà arrêtées par l'atmosphère, et donc moins l'émission d'une quantité supplémentaire de ce gaz a un effet important (il se produit un phénomène de saturation) [ADEME, 2011b]. De même, la concentration atmosphérique de l'ensemble des GES a une conséquence non négligeable sur l'effet liée à une nouvelle émission de gaz [ADEME, 2011b].

A l'heure actuelle, l'initiative USETOX, consacrée à l'évaluation des impacts en termes de toxicité humaine et écotoxicité, semble être la plus aboutie dans cet objectif de prise en compte des paramètres temporels et donc de fonction non linéaire pour la caractérisation des facteurs nécessaires à l'expression des impacts environnementaux. En 2005, une comparaison détaillée des modèles d'analyse de cycle de vie pour l'évaluation de l'impact sur la toxicité a été initié par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et la Société de toxicologie et de chimie environnementale (SETAC). Les principaux objectifs de cette étude étaient (1) d'identifier les sources spécifiques de différences entre les résultats des modèles et leur structure, (2) de détecter les composants indispensables du modèle et (3) de construire un modèle de consensus scientifique qui représenterait une pratique recommandée [Rosenbaum et al., 2008].

Le modèle USETOX est un modèle pour la caractérisation des impacts humains et écotoxiques dans l'évaluation des impacts du cycle de vie et pour l'évaluation comparative et le classement des produits chimiques en fonction de leurs caractéristiques de danger inhérents. La mission de l'équipe de USEtox est d'améliorer la compréhension et la gestion des produits chimiques dans l'environnement mondial en développant l'évaluation, l'application et la diffusion de la méthode USEtox qui décrit le devenir, l'exposition et les effets des produits chimiques. Le modèle USEtox est actuellement sous examen par l'Initiative du PNUE SETAC Life Cycle avec la perspective d'une recommandation globale comme modèle préféré pour la modélisation de facteurs de caractérisation pour les impacts humains et écotoxiques [Larsen et Hauschild, 2007], [Larsen, 2010].

Cette étude a permis d'aboutir à des fonctions d'évaluation exponentielle ou linéaire selon l'impact considéré (Figure 79).

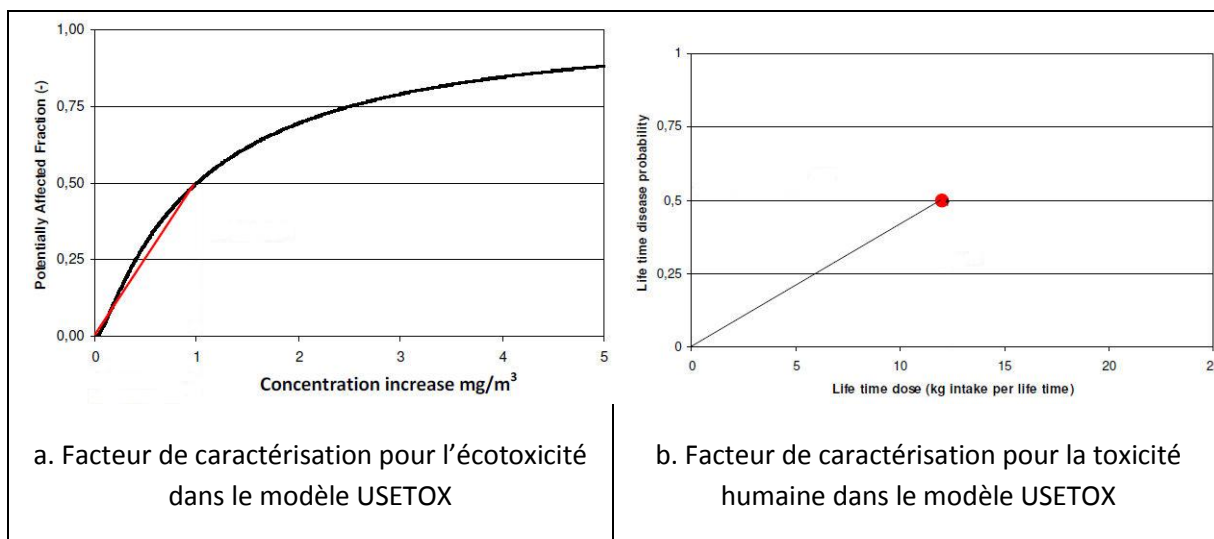


Figure 79: Courbes représentant les facteurs de caractérisation de l'écotoxicité (a) et de la toxicité humaine (b) dans le modèle USETOX [Huijbregts et al., 2010]

Conclusion sur les facteurs de caractérisation

Les facteurs de caractérisation doivent être utilisés avec précaution en raison notamment des incertitudes qui existent sur les valeurs. Néanmoins, ils permettent d'obtenir une quantification des impacts environnementaux et même si la valeur en elle-même peut être remise en question, les ordres de grandeur permettent d'avoir une expression globale des impacts environnementaux considérés. Dans notre cas, les valeurs attribuées aux différents impacts sont soumises à de fortes incertitudes mais ces valeurs permettent d'obtenir un classement relatif des équipements les uns par rapport aux autres vis-à-vis d'un même impact environnemental.

De plus, même si l'emploi de ces facteurs de caractérisation est sujet à débat, ils ont le mérite d'exister et ce n'est qu'en prenant conscience et en cherchant à évaluer ces facteurs que les recherches sur le sujet avanceront et que ces facteurs augmenteront en fiabilité. Pour preuve, actuellement, le facteur qui est sujet à la plus faible incertitude est celui relatif aux émissions de GES. L'engouement des recherches sur sa caractérisation et la communication importante faite sur le sujet ont engendrés de nombreuses recherches aboutissant désormais à des indicateurs plus fiables et un consensus général de la communauté scientifique. Par conséquent, même si l'expression des différents impacts environnementaux engendre des débats, il est nécessaire de les évaluer avec les moyens actuels afin de sensibiliser les différents acteurs à ces impacts et ainsi encourager la recherche à se pencher sur leur caractérisation.

Enfin, comme indiqué précédemment, il existe plusieurs méthodes de calculs permettant d'aboutir aux facteurs de caractérisation mentionnées dans les bases de données et il est parfois difficile d'identifier les périmètres de chaque étude servant de référence.

3.3 Périmètre d'évaluation et notion de « système produit-service »

3.3.1 Un périmètre d'évaluation à l'interface de l'approche site et produit

Lors de la mise en œuvre d'une évaluation environnementale, les objectifs à atteindre permettent de définir le champ d'investigation de l'étude. Le périmètre de l'évaluation doit alors contenir l'ensemble des éléments nécessaires à la bonne réalisation de l'étude.

Dans le cadre de l'évaluation environnementale d'un site géographique, certaines spécificités sont prises en compte afin que l'évaluation réalisée considère effectivement l'ensemble du site étudié. Apparues dès 1976, les études d'impacts réglementaires sont parmi les premières évaluations à considérer une organisation (de type ICPE) dans sa globalité pour en caractériser et quantifier les impacts environnementaux sur les milieux naturels et humains, au niveau local [Journal Officiel de la République Française, 1976]. Cette localisation des impacts inhérente à l'étude d'impacts est notamment rendue possible par la prise en compte de la sensibilité du milieu via l'emploi de méthode d'évaluation de la sensibilité telle que celle présentée par Cikankowitz [Cikankowitz et al., 2009] ou celle utilisée par l'INERIS [INERIS, 2011]. Qu'il s'agisse des études d'impacts ou de la prise en compte de la sensibilité des milieux, le point commun de ces évaluations avec une approche site est de rendre « local » l'application d'une méthodologie d'expression des impacts par l'emploi de données spécifiques au site d'étude.

Pour l'évaluation environnementale de type approche produit, l'intérêt ne réside pas dans la localisation des impacts mais plutôt à leur attribution aux différentes phases du cycle de vie du produit [ADEME, 2011a]. L'ACV est une méthode standardisée [ISO 14040, 2006] pour exprimer les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie. Sa finalité est de détecter les points forts et/ou les points faibles afin d'agir directement à un niveau pertinent [Gilet, 2000]. Cependant, la quantité de données nécessaires à la réalisation d'une ACV étant considérable, elles font fréquemment appel à des bases de données génériques afin d'exprimer certains impacts environnementaux.

La méthodologie proposée emprunte des éléments aux deux catégories d'approche précédentes (site et produit) afin de réaliser l'évaluation environnementale des équipements informatiques présents au sein d'une organisation. Elle considère alors à la fois le cycle de vie des équipements et le périmètre géographique de l'organisation.

De plus, l'ACV, par le fait qu'elle s'attarde à définir une unité fonctionnelle, évalue un système selon une quantité, une fonction et une durée donc le service rendu par un produit. Dans le contexte des technologies de l'information, le service rendu par un produit (l'équipement informatique) semble particulièrement intéressant et nous amène à la notion de « système produit-service » qui ne considère pas le produit seul mais l'utilisation qui en est faite.

3.3.2 La notion de « système produit service »

La notion de système produit service est née de l'évolution des modes de consommation et de production de masse [Umeda et al., 2000]. Une des solutions envisagées est de se tourner vers une économie de services. Ainsi, le modèle économique actuel des sociétés basé sur la propriété est remis en cause. La prise de conscience des problèmes environnementaux vient s'ajouter à cette réflexion, ce qui amène progressivement les entreprises à se tourner vers la fourniture de services et non à se limiter à la vente de produits matériels, symbole de la société de consommation. Par ce changement, les entreprises souhaitent désormais proposer plus de valeur à leurs clients par l'intermédiaire de ces services et ainsi répondre plus rapidement aux besoins [Maussang-Detaille, 2008]. L'évolution de la prestation fournie d'un produit vers un service permet d'augmenter la valeur ajoutée de manière non négligeable [Lagaronne et al., 2003] mais aussi la possibilité de se détacher de la concurrence [Maussang-Detaille, 2008]. Cette évolution correspond à l'élargissement des frontières d'un produit : ce qui est appelé le concept de produit étendu [Thoben et al., 2001]. Il est alors question d'un système composé d'un produit et des services associés à ce produit.

Le passage de la vente d'un produit à celle d'un service est un des moyens pour les organisations de devenir durables [Bhamra et al., 2001]. Un des objectifs espérés est de réaliser un découplage entre la croissance économique et les impacts sur l'environnement [Tukker et Tischner, 2006]. Une des stratégies pour réaliser ce découplage est d'intensifier l'utilisation des produits en se focalisant sur la fonction et/ou le résultat à fournir au client et non plus vendre un produit physique. Dans cette optique, les systèmes produits-services permettent de répondre à cette stratégie [Maussang-Detaille, 2008].

L'idée des systèmes produits-services est de penser en termes de fonction ou de résultats afin de satisfaire les besoins du client, le produit devient secondaire. Ainsi, seule l'utilisation d'un produit est fournie ce qui permettrait d'augmenter le taux d'utilisation des produits matériels. Un exemple se trouve dans les moyens de transport : le système de location de voiture permet à plusieurs personnes d'utiliser une voiture (l'utilisation correspond au service) sans pour autant acheter une voiture (bien matériel). Ceci entraînerait donc une diminution de la consommation des matières premières (moins de produits à fabriquer) mais aussi moins de déchets créés (car moins de produits jetés). Cependant, l'introduction d'un produit/service/système produits-services ayant des performances environnementales meilleures que d'autres systèmes peut entraîner un effet rebond [Hertwich, 2005]. L'effet rebond est défini comme l'augmentation de la consommation liée à la réduction des limites à l'utilisation d'une technologie, ces limites pouvant être monétaires, temporelles, sociales, physiques, liées à l'effort, au danger, à l'organisation [Schneider et al., 2001]. **Ainsi, la vente de services ne conduit pas forcément à un bénéfice environnemental automatique** [Hirschl et al., 2003].

Dans la littérature, un certain nombre de concepts traduisent cette volonté de fournir des services au lieu de vendre des produits physiques : les produits étendus, l'ingénierie des services, l'économie de fonctionnalité. Ainsi, pour aller plus loin dans cette offre de service, le passage vers

une économie de fonctionnalité développée par Giardini et Stahel (1989) [Giardini et Stahel, 1989] est une piste importante. Dans cette économie de fonctionnalité, ce n'est plus un produit qui est vendu au client, mais un ensemble de produits et de services assurant à l'utilisateur une fonction, un résultat : On parle alors de systèmes produits-services. L'évolution se fait d'un produit physique "seul" vers un système global composé de produits et de services. Cependant, ce changement radical n'est pas aussi simple et bien souvent les entreprises se contentent d'ajouter des services techniques aux produits [Maussang-Detaille, 2008].

La typologie des systèmes produits-services détaillée dans [Maussang-Detaille, 2008] permet de comprendre la part de produits et de services pouvant coexister. Ainsi, les systèmes produits-services sont un mix entre des produits matériels (entités tangibles) et des services (entités intangibles). La valeur globale de ces systèmes dépend de la valeur fournie par le(s) produit(s) et de la valeur fournie par le(s) service(s). Chaque type de systèmes produits-services propose une valeur différente basée sur plus ou moins de produits/services (Figure 80).

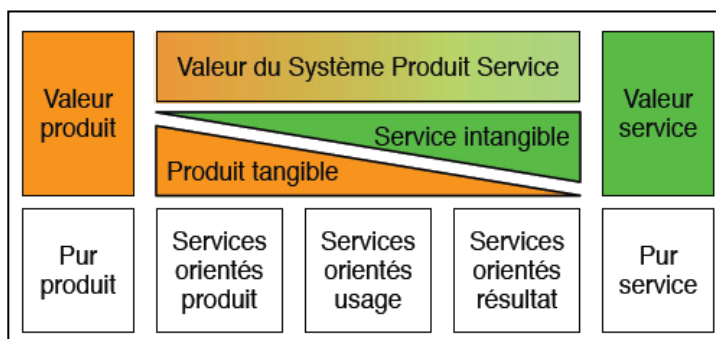


Figure 80: Typologie des systèmes produits-services [Maussang-Detaille, 2008]

Les produits fonctionnels sont perçus comme des produits combinant des équipements techniques avec un système support au service (Figure 81) [Alonso-Rasgado et al., 2004]. Dans ce cadre, le client n'achète plus un produit, mais la fonction réalisée par cet ensemble. Il est alors question de vente de fonctionnalité.

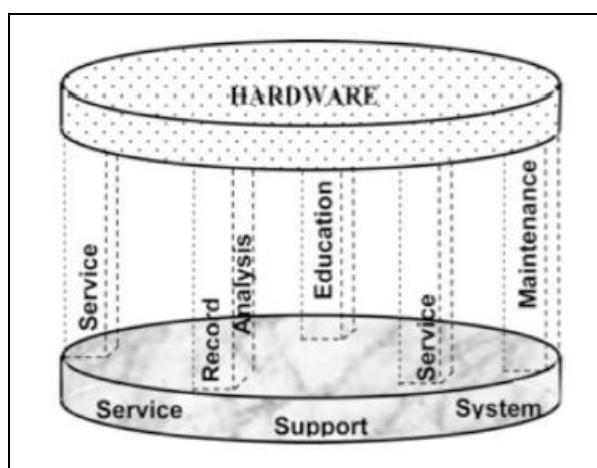


Figure 81: Les produits fonctionnels [Maussang-Detaille, 2008]

La vente de fonctionnalité a fait apparaître la nécessité de mettre en place des stratégies spécifiques pour la récupération et la remise en état : le remanufacturing, défini comme un processus de restauration de produits usagés vers un état nouveau, grâce à la remise en état ou la reconstruction partielle [Lopez Ontiveros, 2004]. Il est réalisé afin de :

- réduire les impacts tels que la consommation d'énergie, la consommation de matières, les rejets (eau, air, sol) ;
- prolonger le cycle de vie des produits ;
- récupérer la valeur ajoutée du produit acquise durant la conception et la fabrication.

La principale difficulté dans la conception de ces systèmes réside dans l'hétérogénéité des éléments impliqués [Maussang et al., 2007]. Ainsi, un certain nombre d'éléments qui n'étaient pas pris en compte durant les phases amont de la conception de produits. Parmi ces éléments, on retrouve la valeur, les partenaires impliqués, l'organisation mise en place ainsi que les considérations économiques, environnementales et sociales. Les frontières de l'étude s'élargissent. Les produits physiques ne sont plus les éléments centraux dans le processus de conception mais c'est bien le système dans sa globalité qui doit être considéré. Ce sont donc les besoins du client qui doivent être identifiés en premier lieu. Ces besoins se traduisent la plupart du temps en utilisation, résultat ou fonction. Pour satisfaire ces besoins, le concepteur peut alors envisager différentes solutions basées sur des produits, des services ou bien un système produits-services. Le concepteur ne doit pas se limiter à des solutions orientées produit.

Pour définir ces besoins et les intégrer dans le système, le concept d'unités de service est alors utilisé. Les unités de service sont les entités qui vont fournir des fonctions supplémentaires [Maussang-Detaille, 2008]. Ces fonctions peuvent avoir un caractère technique, par exemple dépanner les objets physiques du système, mais également un aspect d'assistance, par exemple former le client à l'utilisation du système, le renseigner, etc. Dans le cadre d'un système produit-service informatique, une des unités de service est l'unité d'impression. Cette unité a pour but de permettre au client d'obtenir des documents sous format papier (en l'occurrence utilisation de l'imprimante). Cette unité de service assure ainsi au client une certaine fonction d'assistance. De plus, certaines unités de service peuvent également comporter des objets physiques. Par exemple, une unité de maintenance se déplaçant pour aller réparer un objet physique aura besoin d'un véhicule. Ces objets physiques apparaîtront lors de l'analyse détaillée de l'unité de service [Maussang-Detaille, 2008].

Ainsi, un système produit-service est un système technique composé d'une partie matérielle qui sert un ensemble de fonctions d'usages considérées comme des services offerts à l'utilisateur. Dans le cadre de notre étude, le système produit-service concerne un système particulier de traitement de l'information qui nécessite de la ressource humaine pour son utilisation et sa maintenance. Il existe alors une continuité de service en interne et/ou par un sous-traitant. L'intérêt de considérer un système produit-service serait d'avoir une évaluation de la valeur

d'usage. Cette dernière pourrait alors devenir l'unité fonctionnelle de l'évaluation environnementale réalisée (comme dans le cadre d'une analyse de cycle de vie).

L'identification de la valeur d'usage des équipements informatiques n'est pas évidente à établir car elle pose de nombreuses questions de recherches relatives à la détermination de cette valeur ajoutée de l'informatique au sein d'une organisation. En effet, l'informatique doit-il être considéré comme une nouvelle forme de stockage des données ou comme un moyen de traitement des données ? Son utilisation permet-elle d'accélérer la quantité de données traitées ou encore la rapidité d'exécution de certaines tâches ? Une fois établie, cette valeur d'usage pourra servir de base de comparaison.

Considérer le système étudié dans le cadre de notre méthodologie comme un système produit-service engendre un changement du mode d'évaluation car cette dernière est ramenée à la valeur produite par le système. Actuellement, l'évaluation réalisée ramène les résultats à un établissement et non à la valeur ajoutée engendrée par l'informatisation de l'établissement. Nous ne pouvons donc pas considérer que le périmètre de l'évaluation réalisée est un système produit-service. Cependant, tendre vers une telle perspective nous semblerait intéressant et, par une approche combinée des équipements (produits) et du nombre d'utilisateurs et de la fonction rendue par ces équipements (service ?), nous commençons à aborder ce nouveau périmètre d'étude. Afin que l'étude puisse être menée à l'échelle du service rendu par les équipements présents, il faudrait alors présenter les résultats en fonction de la valeur ajoutée par l'utilisation des équipements et non par rapport à un établissement. Nous pouvons alors imaginer des résultats sous la forme d'impacts environnementaux liés à différents flux quantitatifs entrants dans la définition de la valeur d'usage comme le traitement d'une quantité de données ou encore la vitesse d'échanges des données entre plusieurs établissements.

3.4 Evaluation environnementale des organisations : d'un objectif de thèse initial à une volonté de terrain actuelle

Comme nous l'avons détaillé lors du chapitre 1, les périmètres des évaluations environnementales se sont diversifiés et étendus au fil des années. Après un intérêt sur un périmètre géographique bien défini dans le cadre des études d'impacts réglementaires, ce sont les produits puis les organisations qui se trouvent désormais au centre des études.

La notion de système produit-service abordée précédemment, nous amène à une réflexion plus globale sur les frontières du système à considérer lors de la réalisation d'une évaluation environnementale. Cette étude passe plus globalement par une réflexion sur l'utilisation d'une approche de type ACV à une organisation telle qu'elle a été réalisée dans le cadre de ce travail de thèse en abordant notamment la notion de LCA corporate qui se développe actuellement dans le domaine de l'évaluation environnementale.

3.4.1 Utilisation d'une approche de type ACV à une organisation spécifique

- ***Les frontières du système : une définition indispensable mais qui peut être restrictive***

Lors de la réalisation de toute évaluation environnementale, il est nécessaire de définir le périmètre de l'étude et par conséquent les frontières attribuées au système. Ces dernières permettent de distinguer les éléments qui seront intégrés dans l'étude.

Ainsi, tous les éléments du système étudié et le périmètre choisi doivent être clairement explicités et motivés. En cas d'exclusion de certains éléments, des explications doivent être avancées. En effet, le périmètre du système peut avoir une forte incidence sur les résultats. En général, la définition du périmètre et donc des frontières du système est choisie en fonction des objectifs encourus et de la méthodologie utilisée.

Les frontières du système permettent de savoir exactement ce qui a été évalué durant la phase d'étude. Ces délimitations sont nécessaires pour l'étude elle-même afin de réaliser une analyse et une interprétation des résultats qui tiennent compte des limites posées mais rendent également l'étude comparable à une autre étude : des résultats ne peuvent être comparés que si les mêmes conditions ont été considérées lors de la phase de collecte des données. De plus, les résultats obtenus doivent être analysés et interprétés en fonction des limites qui ont été définies précédemment pour aboutir aux conclusions de l'étude. Ainsi, la définition des frontières de l'étude est une phase essentielle pour l'interprétation des résultats, pour établir une conclusion de ces résultats et enfin pour pouvoir comparer par la suite ces résultats et conclusions à une autre étude. De même, dans le cas où l'étude serait effectuée à nouveau, il faut que l'ensemble des éléments nécessaires à sa réalisation soient disponibles. Seule une description précise du périmètre étudié et donc des frontières du système peuvent alors assurer une comparabilité des résultats. De plus, lors de la réalisation d'une étude, des hypothèses doivent être établies pour expliquer les calculs réalisés par exemple. Ces hypothèses devront également être étudiées lors de la phase d'analyse et d'interprétation des résultats. Il en va de même avec les éléments qui ont été exclus du périmètre de l'étude pour diverses raisons comme l'absence de données ou la complexité du système.

Concernant l'application de notre méthodologie, les frontières du système ont été définies en fonction des spécificités de la méthodologie et des contraintes relatives au fonctionnement de l'organisation étudiée. Par conséquent, lors de l'application au sein du groupe Casino, les écrans « marketing » rajoutés ces dernières années dans les grandes surfaces ainsi que dans les locaux du siège (événements du groupe) ont été exclus du système étudié car ils n'étaient pas dans le périmètre d'action de CIT. Cependant, en fonction du nombre d'équipement, leur impact (lié à la fabrication et à l'utilisation de ces équipements) est probablement non négligeable et pourrait venir annuler les efforts faits par CIT sur les systèmes informatiques classiques.

Par conséquent, les conclusions d'une étude ne peuvent donc pas être établies sans faire référence aux objectifs de l'étude, aux hypothèses établies ainsi qu'au périmètre d'investigation.

De manière plus générale, la question de la définition des frontières du système nous amène à nous interroger sur les restrictions imposées par le périmètre d'étude. En effet, la disponibilité des données est souvent à l'origine de la non prise en compte de certains éléments dans une étude, aboutissant ainsi à une restriction du périmètre d'étude originellement considéré mais ce n'est pas le seul facteur. Une donnée peut être indisponible ou difficile à obtenir, dans ce cas, c'est le temps imparti pour l'étude qui devient l'élément limitant et engendre une diminution du périmètre d'investigation. De même, une restriction du périmètre peut être effectuée en fonction des leviers d'action possibles au sein de l'organisation étudiée. En effet, il paraît difficilement envisageable de réaliser une étude et donc de proposer des solutions sur un périmètre dont l'organisation étudiée n'a pas la maîtrise, périmètre sur lequel aucune action ne pourra alors être mise en œuvre suite à l'évaluation réalisée. A ces éléments peuvent parfois s'ajouter des conflits d'intérêts entre les différents acteurs mandataires de l'étude (problématique entre différentes filiales d'un même groupe, différents services d'une même entité...).

Pour ces diverses raisons, l'exécutant d'une évaluation environnementale se retrouve parfois contraint de réduire son périmètre d'investigation et doit mener à bien une étude qui réponde aux objectifs de départ sans avoir les moyens techniques pour la réaliser. Par conséquent, la définition des frontières du système peut s'avérer complexe et amène à une réflexion complexe sur la pertinence des éléments à considérer. Pourquoi tel élément doit être exclu du périmètre alors qu'un autre sera inclus en établissant une hypothèse sur les données n'ayant pu être obtenues ? Le choix entre ces deux solutions doit-il être basé sur la possibilité d'émettre une hypothèse réaliste ou uniquement en se référant aux objectifs initiaux de l'étude ? Néanmoins, face à cette problématique, il semble indispensable d'associer le mandataire de l'étude à la réflexion et au choix qui seront fait pour la suite de l'étude. Cette collaboration pourra permettre la résolution de certaines situations et aboutira à des choix en accord avec les objectifs du mandataire.

Le périmètre d'évaluation du système pris en compte par notre méthodologie est celui présenté dans la Figure 22 page 95.

- ***Outil d'évaluation : utilisation d'une approche de type ACV à une organisation spécifique***

Dans le cadre de la méthodologie proposée, l'approche cycle de vie telle que celle utilisée dans l'ACV permet d'associer les différents impacts environnementaux identifiés aux étapes du cycle de vie des équipements informatiques étudiés, à savoir ceux présents au sein d'une organisation. Ainsi, il ne s'agit pas ici de considérer uniquement le produit (les équipements informatiques), ni l'ensemble de l'organisation (périmètre géographique) dans laquelle ils se trouvent mais de se situer à « l'intersection » considérant le produit dans une organisation. Ainsi, les impacts environnementaux ont pu être estimés par l'emploi d'une approche de type ACV sur le périmètre d'une organisation. La notion de cycle de vie des équipements informatiques au sein d'une organisation spécifique fait ainsi appel :

- à une **phase amont** de fabrication et de transports des produits avant qu'ils ne soient sur leur lieu d'utilisation ;
- à une **phase d'utilisation** des équipements ;
- à une **phase aval** de traitement des équipements en fin de vie.

Il est difficile pour une organisation donnée de renseigner avec précision l'ensemble de ces phases. Ainsi, les résultats d'ACV ont été utilisés pour la phase amont en employant des données génériques des impacts environnementaux relatifs à la fabrication des équipements. La phase d'utilisation a été enrichie et développée spécifiquement à l'organisation considérée via une approche détaillée des différents postes d'utilisation et des comportements des usagers par l'intermédiaire de questionnaires, d'enquêtes et de mesures sur le terrain. Enfin, la phase aval relative au traitement des équipements en fin de vie n'a pas été intégrée par manque d'informations consolidées et stables sur le devenir des équipements une fois en dehors du périmètre de l'organisation. Par exemple, les équipements informatiques de CIT sont loués. Une fois leur durée de location terminée, plusieurs devenirs peuvent être envisagés : maintien dans l'entreprise, deuxième vie, fin de vie. Malheureusement, les proportions de ces différentes possibilités n'ont pu être obtenues.

De plus, l'intérêt lors d'une approche cycle de vie est d'identifier, par exemple, les transferts de pollution potentiels d'une étape du cycle de vie vers une autre, d'un compartiment vers un autre ou d'un impact vers un autre, lors de l'étude de scénarii alternatifs. Souvent utilisé lors d'une démarche d'éco-conception pour un produit, ce raisonnement est également valide pour l'évaluation d'un service. En effet, pour un produit, la comparaison des impacts au cours du cycle de vie révèle les variations des impacts entre les alternatives possibles d'évolution du produit. Pour un service, les différentes phases du cycle de vie concerneront les étapes de fabrication des équipements nécessaires à la réalisation de ce service. La phase d'utilisation sera relative au déroulement du service alors que la fin de vie s'intéressera au devenir des équipements nécessaires à la réalisation du service étudié. Ainsi, comme présentée dans la Figure 82 [ADEME, 2011a], l'identification d'impacts plus importants d'une phase du cycle de vie par rapport aux autres étapes (étape de fabrication dans l'exemple présenté) peut engendrer une re-conception du produit et l'utilisation d'une autre matière première afin de diminuer les impacts sur cette phase. Concernant un service, l'intérêt réside dans l'identification de l'étape ou de l'équipement nécessaire à la réalisation du service qui est le plus impactant. Les conséquences inhérentes à cette modification (dans le cadre d'un produit) sont mentionnées sur le schéma « situation après modifications » (Figure 82). L'étape de fabrication a bien un impact moins important que lors de la situation initiale, mais les étapes d'extraction de matière première et de fin de vie ont des impacts qui augmentent.

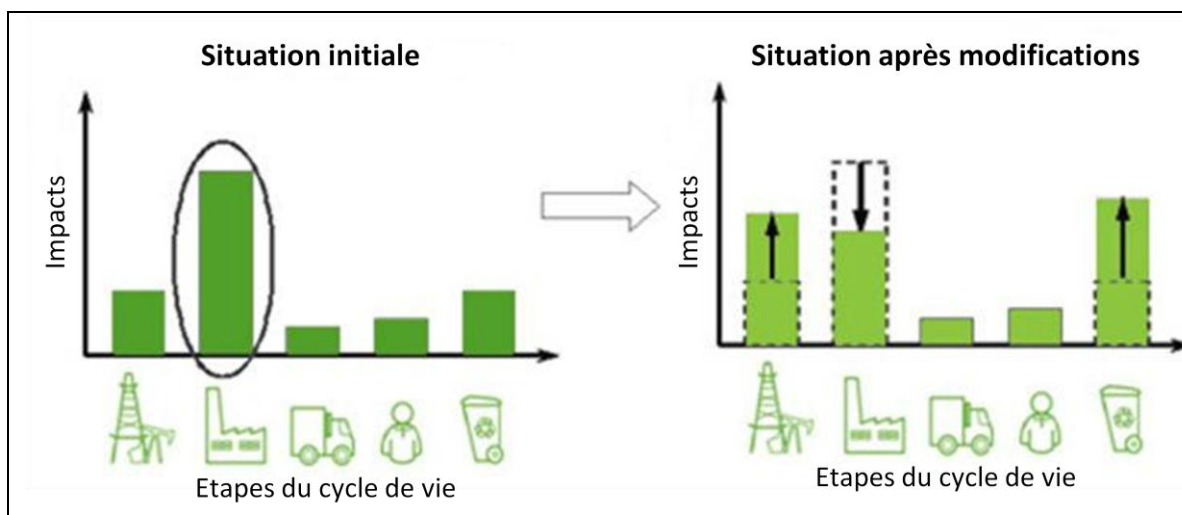


Figure 82: Illustration du principe de transfert d'impacts [inspiré de [ADEME, 2011a]

A cette expression des impacts environnementaux par phase du cycle de vie, notre méthodologie associe l'utilisation de plusieurs indicateurs d'impacts. L'intérêt apporté par l'utilisation de ces divers indicateurs d'impacts réside essentiellement sur le fait qu'ils permettent une meilleure compréhension des conséquences sur l'environnement que peuvent avoir les équipements informatiques étudiés. L'emploi de différents indicateurs permet de mettre en évidence d'éventuelles différences de hiérarchisation des aspects (des équipements ou de leur phase de vie) selon les impacts considérés. En effet, l'utilisation d'un indicateur environnemental unique ne reflète qu'une partie des impacts environnementaux liés à une activité. S'il s'agit d'un indicateur agrégé, il permet l'expression de l'ensemble des indicateurs sous une seule unité avec une perte d'information importante. Avec une expression sous plusieurs indicateurs, il est alors possible de présenter les impacts selon le milieu considéré et ainsi rendre compte plus fidèlement des phénomènes liés au cycle de vie des équipements informatiques étudiés. En outre, dans l'environnement, les interactions entre différents phénomènes sont multiples ainsi les phénomènes existants ne sont pas indépendants les uns des autres et seule l'utilisation de plusieurs indicateurs environnementaux peut permettre de les évaluer.

De plus, lors de l'utilisation des différents indicateurs d'impacts environnementaux les résultats peuvent amener à des conclusions différentes selon l'indicateur d'impact considéré. Les résultats de nos travaux illustrent ce propos pour les deux applications (Casino et EMSE). Ainsi, comme présenté dans la Figure 83a, en considérant l'impact sur le changement climatique, la conclusion est que la majorité des impacts sont liés à l'amortissement des équipements (10,6 t CO₂ équivalent) alors que l'utilisation des équipements a un impact moindre (1,3 t CO₂ équivalent). La conclusion est inversée pour l'impact sur les radiations ionisantes (Figure 83b) où l'utilisation génère la plus grande partie des impacts (3,5^{E-04} DALYs) et l'amortissement une part plus faible (4,65^{E-05} DALYs).

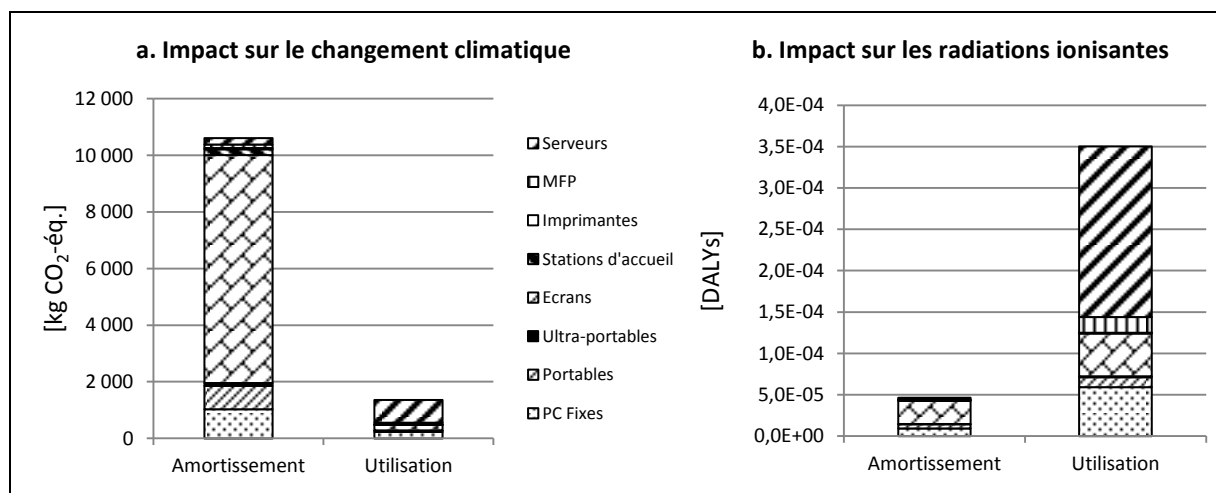


Figure 83 : Expression des impacts sur le changement climatique (a) et sur les radiations ionisantes (b) des équipements informatiques présents au sein du 3^{ème} étage de l'Ecole des Mines.

Dans le cadre de la réalisation de cette évaluation des impacts environnementaux, 7 indicateurs d'impacts environnementaux ont été exprimés : le changement climatique, l'épuisement de l'ozone stratosphérique, l'épuisement des ressources fossiles, l'acidification, la toxicité humaine, l'écotoxicité (décomposée en cinq indicateurs d'écotoxicité selon si le milieu considéré est l'eau douce, l'eau marine ou le sol et si la mesure est réalisée sur les sédiments ou sur l'eau) et les radiations ionisantes. **6 de ces indicateurs concluent que la phase d'amortissement (fabrication) des équipements est plus impactante que la phase d'utilisation.** Par conséquent, les impacts semblent principalement liés à la production des équipements et non à leur utilisation. Seul l'impact sur les radiations ionisantes donne une conclusion inverse. Les hypothèses et problématiques liées à l'utilisation de cet indicateur d'impact, pas encore totalement reconnu par consensus au sein de la communauté d'experts, ne nous permettent cependant pas d'affirmer une telle conclusion avec certitudes.

- ***Outil de gestion et d'aide à la décision – Validation comportementale entre les deux applications et par un benchmark***

Le benchmarking, terme anglais représentant la comparaison des performances d'une organisation par rapport à une organisation équivalente, peut porter sur différents sujets. Il peut être employé dans différentes situations. Il permet alors :

- de positionner un système par rapport à un autre ;
- de positionner un système par rapport à une référence en utilisant ces résultats en termes de bonnes pratiques environnementales ;
- de mesurer la performance environnementale entre systèmes au cours du temps ;
- de mesurer les progrès d'un système de management environnemental ;
- de faire évaluer sa structure lors de vérifications indépendantes par des auditeurs externes dans le cadre d'ISO 14001 ou d'EMAS.

Dans notre cas, le premier objectif du benchmark a été atteint par la comparaison des résultats entre les deux études de cas. Cette validation comportementale permettra d'établir des scénarii de comparaison avec la gestion des équipements informatiques et les bonnes pratiques pouvant exister dans ce domaine. L'objectif est d'améliorer la gestion de l'organisation par l'auto-évaluation de ses performances par rapport aux meilleures pratiques sectorielles.

Comme nous avons mis en œuvre la méthodologie lors des deux applications, il nous a été possible de comparer les résultats obtenus pour chacune d'elle. Ces comparaisons sont une première réflexion concernant la transposition de la méthodologie et son applicabilité. Afin d'établir cette comparaison, nous analysons les résultats obtenus lors des deux applications. Le Figure 84a présente la consommation électrique annuelle par équipement et par poste utilisateur au sein du siège chez Casino (échelle confidentielle) et le Figure 84b présente les mêmes résultats pour l'EMSE.

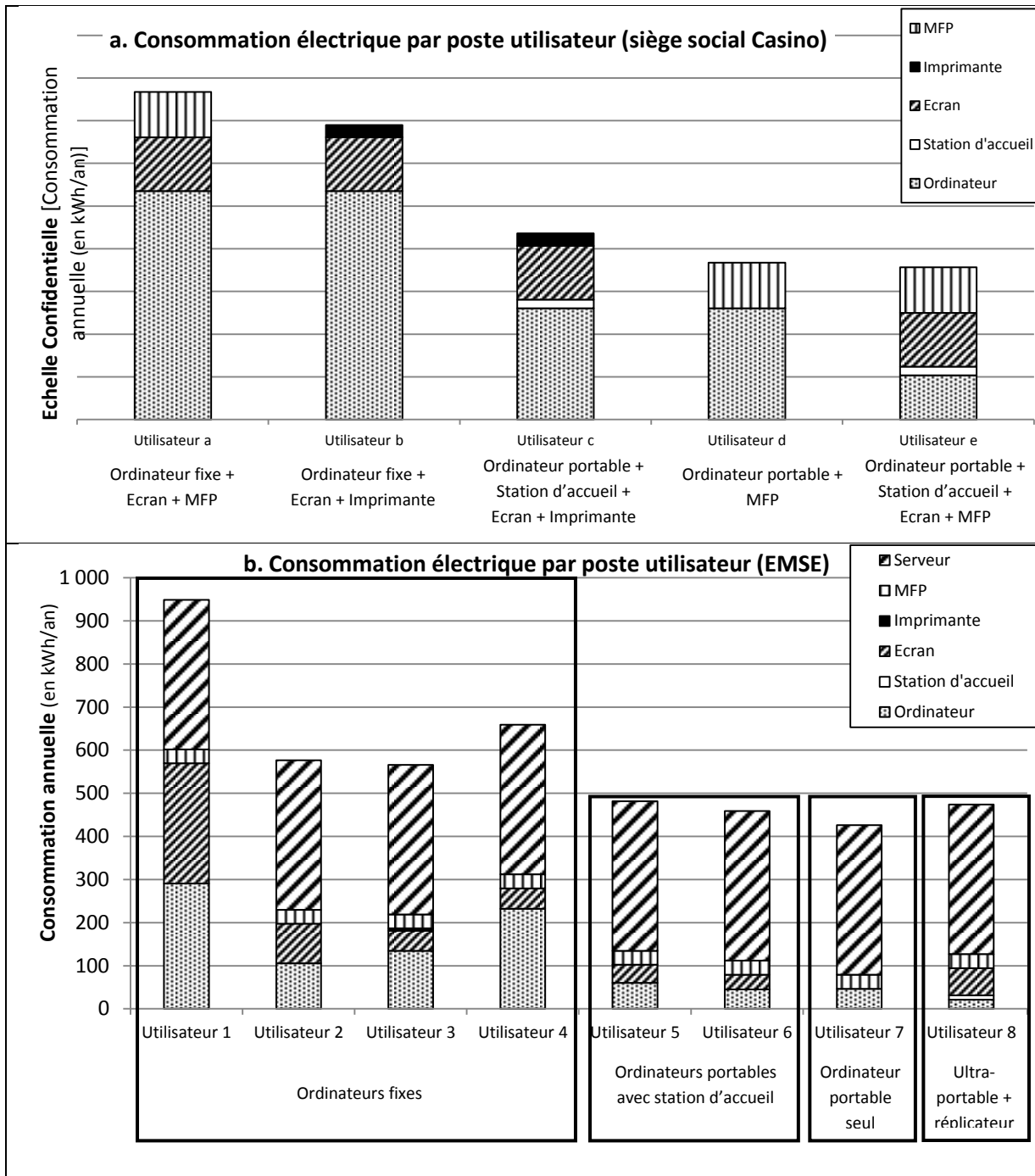


Figure 84 : Consommation électrique par équipement et par poste utilisateur pour Casino (a) et pour l'EMSE (b).

Les consommations électriques des serveurs n'ont pu être attribuées par poste utilisateur pour les résultats de Casino pour des raisons de centralisation de l'ensemble des serveurs au sein des data centres. Les consommations des serveurs imputables à chaque employé n'ont pu être réalisées de part la complexité du système. Néanmoins, des comparaisons peuvent être établies entre profils équivalents (Tableau 48).

Tableau 48: Comparaison des profils utilisateur et correspondance entre les deux applications

Profils		
	Casino	EMSE
Ordinateur fixe		Utilisateur 2
Ecran	Utilisateur a	Utilisateur 3
MFP		Utilisateur 4
Ordinateur portable	Utilisateur d	Utilisateur 7
MFP		
Ordinateur portable	Utilisateur e	Utilisateur 5
Station d'accueil		Utilisateur 6
MFP		

Ainsi, les postes de travail composés d'un ordinateur fixe et d'un écran et reliés à une imprimante multifonction semblent avoir les mêmes profils dans les deux entités (profil utilisateur a avec les profils utilisateurs 2, 3 et 4). De même, le profil de l'utilisateur d correspond avec le profil de l'utilisateur 7. Ces postes sont uniquement constitués d'un ordinateur portable relié à une imprimante multifonction. Il en va de même pour les postes composés d'ordinateurs portables, de station d'accueil et reliés à une imprimante multifonction : le profil utilisateur e de Casino est proche des profils 5 et 6 de l'EMSE.

De plus, l'utilisateur a de Casino et l'utilisateur 3 de l'EMSE ont des postes équivalents. Il s'agit de deux personnes effectuant les mêmes catégories de travail bureautique. L'analyse de leur profil d'utilisation révèle de nombreuses similitudes tant au niveau des temps d'utilisation que des puissances électriques annuelles consommées.

Par conséquent, les similarités entre les profils comparables permettent d'aboutir à la conclusion suivante : **deux entités distinctes n'ayant pas les mêmes équipements ni les mêmes consignes d'utilisation des équipements informatiques ont une répartition comparable des consommations électriques au sein de chaque poste utilisateur.**

Ainsi, le benchmarking a permis de connaître les bonnes pratiques du secteur de l'informatique et des organisations similaires aux sites d'études afin d'identifier les solutions mises en place. Le code de conduite européen décrit de nombreuses bonnes pratiques applicables notamment au sein des data-centres mais plusieurs d'entre elles sont transposables à l'informatique de manière plus générale. Le travail de benchmarking a permis l'identification de bonnes pratiques applicables dans le cadre de l'organisation étudiée, ces bonnes pratiques peuvent être techniques comme [Commission Européenne, 2008] :

- Déployer les technologies de virtualisation: Applicable à tous les aspects matériels du service : serveurs, matériel de stockage, équipement réseau. Nécessite l'approbation de la

hiérarchie pour définir les services fonctionnant sur une plate-forme mutualisée et ceux qui nécessitent du matériel dédié.

- Activer les fonctionnalités de gestion d'énergie : Modifier formellement le processus de déploiement du matériel afin d'inclure l'activation des fonctionnalités de gestion d'énergie. Cette action comprend la configuration au niveau du système d'exploitation et des pilotes.

- Sélectionner des logiciels efficaces : Faire de la performance énergétique du logiciel un critère de sélection prioritaire. Les méthodes et outils pour évaluer ce critère sont encore en développement mais il est possible d'établir des approximations en évaluant par exemple le matériel nécessaire pour atteindre les objectifs de performances et disponibilité pour chaque logiciel.

Mais il peut également s'agir de bonnes pratiques d'ordre managérial afin d'encourager un meilleur comportement des utilisateurs ou d'engager une politique à l'échelle de l'organisation. Ces bonnes pratiques peuvent alors concerner :

- Eteindre l'équipement inactif : Mise en veille ou arrêt des serveurs, des équipements réseaux et des équipements de stockage qui restent inactifs pendant une durée significative. Il sera probablement nécessaire de valider l'applicabilité de cette solution et d'évaluer la capacité du matériel à supporter ces changements d'état sans perte de fiabilité ou de fonctionnalité.

- Choix du matériel IT : Inclure l'efficacité énergétique de l'équipement comme critère de sélection prioritaire dans le processus d'appel d'offres. Cela peut se faire à travers les protocoles standard (comme celui d'Energy Star) ou via un protocole spécifique (incluant le niveau de performance et la fiabilité des composants) afin de faire mieux correspondre le matériel à l'usage prévu.

- Sélectionner du matériel certifié (type Energy Star par exemple) : Les acteurs qui ont la possibilité d'analyser l'efficacité énergétique du matériel doivent sélectionner le plus efficace dans le scénario d'usage prévu. Ainsi, les labels et certifications des équipements peuvent constituer un critère lors du choix de matériel dans le cadre de nouveaux achats.

- Implication de l'organisation : La constitution d'un groupe de travail avec des représentants de l'ensemble des structures (logiciel, matériel, électricité, achat, ...) peut constituer un point fort et surtout permettre une cohérence des différentes actions à mettre en place. Par exemple, la sélection des équipements basés sur des critères de performances énergétiques serait cohérente avec l'instauration d'un programme de gestion de l'énergie.

- Mesurer la consommation d'énergie totale de l'informatique : Installer l'équipement nécessaire pour mesurer la consommation totale de l'équipement informatique, en incluant les unités de distribution d'énergie (PDU). Ce suivi permettrait de connaître plus précisément la consommation électrique et ainsi voir l'effet sur les consommations des différentes modifications apportées au système informatique.

Ainsi, le code de conduite européen a servi de base de référence à la recherche de bonnes pratiques dans le domaine de l'informatique. Les points sensibles identifiés dans la première partie de l'étude ont été mis en avant par le tableau de bord environnemental via l'utilisation de divers indicateurs et ont permis d'identifier les bonnes pratiques susceptibles d'améliorer le bilan. Par conséquent, après leur identification, une analyse de chaque bonne pratique a été réalisée et mise

en perspectives d'une potentielle utilisation dans le cadre des scenarii d'optimisation proposés. Certaines d'entre elles ont alors fait l'objet d'une étude approfondie afin de quantifier les gains réalisables par l'organisation suite à la mise en place d'une bonne pratique.

L'intérêt de l'utilisation d'un tableau de bord environnemental réside finalement dans l'outil de décision qu'il constitue en permettant :

- d'exprimer les impacts environnementaux d'une situation donnée ;
- d'identifier les points sensibles devant être améliorés, de fixer des cibles précises à atteindre ;
- de calculer les incidences suite à l'application de solutions d'amélioration ;
- de suivre l'éco-efficience des solutions proposées ;
- d'organiser la disponibilité et l'actualisation des données environnementales pertinentes à l'intérieur de l'organisation ;
- d'exprimer les gains potentiels par l'application de bonnes pratiques (identifiées préalablement).

3.4.2 LCA corporate : Contexte de développement actuel et perspectives

Le LCA corporate est un concept qui étend les frontières de l'analyse du cycle de vie d'un produit au périmètre d'une organisation (« corporate » en anglais). Cette extension résulte d'une prise de conscience de l'intérêt du périmètre d'étude dans le cadre d'une évaluation environnementale. Au cours des dernières années, une pression accrue sur les entreprises s'est faite ressentir afin d'élargir la portée de la durabilité et la responsabilité dans la performance des entreprises au-delà de la performance financière [Schaltegger et Burritt, 2010]. En effet, un nombre croissant d'entreprises cherchent à mettre en place des politiques de responsabilité sociétale des entreprises. Dans un environnement économique perturbé, acquérir un avantage concurrentiel fondé sur l'efficacité devient une norme pour toutes les entreprises [Lee et Farzipoor Saen, 2012].

Les objectifs internationaux de réduction des émissions de carbone et les règlements connexes ont également agi comme un signal pour les entreprises à pratiquer une surveillance plus efficace envers les activités de leurs fournisseurs par exemple afin de rester en position concurrentielle sur le marché [Lee et Farzipoor Saen, 2012]. Ainsi, si les fabricants finaux peuvent identifier et classer les partenaires d'affaires potentiels sur la base de leurs performances de développement durable, cela entrainera une entreprise à réduire ses risques dans les dimensions économiques, environnementales et sociales [Lee et Farzipoor Saen, 2012].

En outre, l'impact environnemental (changement climatique, par exemple) et les demandes sociales (par exemple la reddition de comptes) des actionnaires et des parties prenantes contribuent à la pression pour les entreprises à considérer les questions de durabilité au sérieux. Cependant, le défi majeur pour les entreprises et les industries est de démontrer leur contribution actuelle à la société dans son ensemble sans compromettre le potentiel de continuer à apporter des améliorations aux générations futures. En bref, les pratiques de gestion durable à un niveau de

l'entreprise peuvent aider le conseil d'administration à revoir sa stratégie d'entreprise et de relever les défis clés de la durabilité [Burritt et Saka, 2006], [Schaltegger et Burritt, 2010].

Dans ce contexte, l'approfondissement des outils pour réaliser des évaluations à l'échelle d'une organisation représente alors une perspective de développement majeure. Ainsi, des déclinaisons des outils précédemment étudiés à l'échelle d'une organisation apparaissent dans le monde de l'évaluation environnementale. Parmi ces outils, l'empreinte environnementale des organisations a fait l'objet de recherche au sein de centre de recherche européen afin d'éditer un guide de recommandations et de bonnes pratiques dans le domaine [Chomkhamisri et Pelletier, 2011].

Enfin, la démarche proposée dans le cadre de ce travail de thèse coïncide avec les demandes formulées actuellement par les industriels en proposant une évaluation complète de l'organisation. Cette évaluation permet alors d'exprimer les impacts environnementaux relatifs au fonctionnement de l'organisation. Ce diagnostic ayant pour objectif d'identifier des points forts et des points sensibles afin de réduire les impacts environnementaux.

Partie 4 Conclusion de chapitre

Nous avons vu dans ce chapitre que la méthodologie développée permet d'aborder des perspectives à deux niveaux :

- A l'échelle technique de développement de l'outil :

La prise en compte de la **sensibilité** des résultats et des **incertitudes** relatives à l'utilisation de différentes sources de données est indispensable lors d'une étude environnementale. Pour mener à bien cette étude, de nombreuses hypothèses sont nécessaires, chacune d'entre elles implique alors une incertitude et donc une variabilité des résultats.

De plus, l'ensemble des **facteurs** nécessaires n'ont pu être pris en compte. Il semble ainsi pertinent d'implémenter la méthodologie par d'autres éléments comme des données plus approfondies sur les utilisateurs ou encore sur les impacts relatifs à la fin de vie des équipements considérés dans l'étude d'où un approfondissement des enquêtes et des fiches de prise de données lors de la réalisation des mesures.

Enfin, pour rendre cet outil facilement appréhendable par les industriels, il serait intéressant de développer l'outil sous la forme d'un **logiciel**. L'ajout de macros VBA constituerait un premier élément de développement.

- A l'échelle scientifique :

Aujourd'hui, les outils d'évaluation environnementale sont dans l'ensemble « déconnectés » du lieu d'implantation du système d'étude. Une première prise en compte des spécificités locales a été appréhendée dans notre projet de recherche en intégrant la phase d'utilisation réelle des équipements informatiques dans l'évaluation (données spécifiques collectées par l'intermédiaire d'inventaires, de mesures et d'enquêtes). Cependant, pour rendre plus « local » les impacts environnementaux dits « locaux », il serait indispensable, en perspective de ces travaux, de prendre en compte la sensibilité du milieu sur lequel le système est implanté via l'utilisation de méthode d'évaluation de la sensibilité telle que celle présentée par Cikankowitz [Cikankowitz et al., 2009] ou celle utilisée par l'INERIS [INERIS, 2011].

Par conséquent, deux niveaux de sensibilité du contexte local peuvent alors être identifiés :

(1) au niveau de l'utilisation des équipements ;

(2) au niveau de l'implantation géographique de l'organisation dans lequel se trouve l'équipement.

L'évaluation visant à considérer ce contexte local dans sa globalité peut s'avérer complexe dans le cas d'une organisation possédant de nombreux équipements informatiques très disparates et plusieurs implantations géographiques. En effet, dans une telle situation, un premier temps sera consacré à la phase de collecte de données. Cette dernière devra être réalisée afin d'obtenir l'ensemble des informations nécessaires à la connaissance et à la caractérisation de la phase d'utilisation des divers équipements. Dans un deuxième temps, une évaluation de la sensibilité du milieu liée à chaque implantation géographique sera réalisée afin de considérer les particularités de chaque site d'étude. La synthèse des différents résultats obtenus sur les divers sites amène alors une autre problématique : comment considérer un contexte local dans une évaluation globale regroupant plusieurs contextes locaux ?

Enfin, le périmètre de l'étude reste une question importante dans toute évaluation environnementale. Dans le contexte actuel, deux tendances se développent :

(1) **une approche de type système produit-service** qui vise à considérer le service rendu par un produit et non le produit seul. Pouvant être employée par un individu ou par une organisation, la finalité d'une telle approche est d'attribuer les aspects et impacts environnementaux à l'utilisation des différents produits et non uniquement à leur existence.

Ainsi, dans le cas des modes de transports : un individu peut choisir d'acheter un véhicule particulier ou d'opter pour une solution de véhicule partagé. Dans le premier cas, l'individu choisi de posséder l'objet (le véhicule), dans la deuxième solution, l'individu décide de profiter du service rendu par le véhicule, sans pour autant en être propriétaire.

A l'échelle d'une organisation, une situation comparable peut exister dans le domaine de l'informatique : l'entité peut choisir de posséder des équipements d'impressions comme différentes imprimantes ou alors d'opter pour une solution d'impression auprès d'un prestataire de service. Dans le cas où l'entité est propriétaire des équipements, elle devra mettre en œuvre un service de gestion du parc d'impression afin d'assurer le bon fonctionnement de l'installation. Dans la solution visant à faire appel à un prestataire, c'est à ce prestataire d'assurer le bon fonctionnement des équipements et que ce parc d'impression correspond toujours aux attentes de l'organisation. Par conséquent, il s'agit pour l'organisation de choisir entre posséder une compétence informatique en interne ou de l'externaliser afin de ne conserver que le bénéfice de l'utilisation des équipements et non d'assurer son bon fonctionnement.

(2) **l'approche organisation** qui vise à considérer l'organisation dans sa globalité afin de pouvoir communiquer sur les performances environnementales et ainsi conserver une place concurrentielle sur le marché. Ainsi, face au phénomène naturel de changement climatique et de manière plus générale de perturbation de l'écosystème terrestre, la pression sur les entreprises s'accroît tant sur le plan réglementaire que de la concurrence. En effet, face aux exigences réglementaires croissantes et aux pressions exercées par les parties prenantes, l'efficacité et le respect de l'environnement devient une norme pour les entreprises. Ces dernières recherchent alors des méthodes afin d'exprimer leurs contributions et pour cela, elles utilisent des méthodes leur permettant de caractériser et de quantifier leurs aspects et impacts environnementaux.

Enfin, pour conclure ce chapitre, il est important de prendre conscience de l'intérêt d'une telle étude d'évaluation environnementale sur un domaine aussi complexe que l'informatique. L'intérêt principal d'utiliser une valeur d'impact environnemental pour un équipement informatique est de pouvoir sensibiliser l'interlocuteur (qu'il s'agisse de l'utilisateur ou du gestionnaire du parc informatique) aux impacts liés à la production des équipements informatiques et ainsi clarifier la notion de durée d'amortissement de son matériel en exprimant les impacts environnementaux en fonction de la production de l'équipement et d'années d'utilisation. Idéalement, l'objectif serait de chercher à allonger sa durée de vie, en particulier en France où le contenu Carbone lié à la fabrication peut largement dépasser les émissions liées à l'usage par consommation d'électricité.

Conclusion générale

Le contexte réglementaire et social est de plus en plus exigeant vis-à-vis de l'environnement. Bien que des changements décisionnels politiques l'aient éliminée et que jusqu'à présent, elle ne soit toujours pas en application, rappelons que dans le courant de l'année 2009 la contribution climat-énergie était en réflexion au niveau national. L'application et les conséquences financières de ce type d'obligation peuvent constituer un accélérateur pour la mise en place d'une évaluation des impacts environnementaux au sein d'une organisation et ainsi anticiper les conséquences réglementaires, techniques et financières. Sans aller jusqu'à la mise en place d'une contribution financière, le 11 juillet 2011, dans la suite des lois Grenelle, un décret est paru visant à rendre obligatoire, pour certaines entreprises, collectivités et établissements publics, ainsi que pour l'Etat, la réalisation d'un bilan des émissions de gaz à effet.

Les équipements électriques et électroniques se multiplient et se sont imposés dans les activités quotidiennes (ex : travail, loisirs, santé, transports) devenant ainsi des équipements indispensables. Pour prendre conscience et comprendre les conséquences réelles sur notre environnement de cette multiplication des outils informatiques, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes visant à évaluer leurs impacts environnementaux.

Face à l'absence d'outils disponibles à l'échelle d'une organisation pour exprimer les impacts environnementaux des systèmes informatiques, nous avons proposé une nouvelle méthodologie adaptée aux systèmes informatiques et reflétant les spécificités de l'organisation. Cette méthodologie a ainsi pour objectifs :

- de **dresser un état des lieux** de la situation de l'organisation étudiée par l'intermédiaire d'un **tableau de bord environnemental** (TBE). Ce TBE permet d'exprimer les différents **impacts environnementaux** liés à l'amortissement et à l'utilisation des équipements informatiques.
- la présentation des résultats sous forme numérique et graphique permet d'identifier rapidement **les points forts et les points perfectibles**.
- sur la base des atouts et des faiblesses et d'un calcul d'**éco-efficience**, des **propositions d'amélioration** peuvent alors être effectuées. Ces propositions tiennent compte des spécificités rencontrées au sein de l'organisation étudiée et font l'objet d'un chiffrage afin de quantifier les gains (environnementaux et financiers) réalisables suite à leur application.

Afin d'aboutir à ces objectifs, la méthodologie repose sur une démarche qui se décompose en cinq étapes :

1. Identification du système et des enjeux
2. Collecte des données
3. Traitement des données
4. Tableau de bord environnemental (TBE)
5. Evaluation des gains

Finalisés par l'intermédiaire de deux outils (actuellement sous la forme de fichiers Excel) distincts, le TBE et la fiche des gains permettent de centraliser l'ensemble des résultats obtenus.

Pour évaluer les différents impacts environnementaux, nous avons choisi de nous inspirer de la méthode d'analyse de cycle de vie. Les raisons sont les suivantes :

- elle englobe l'ensemble des étapes depuis l'extraction des matières premières à la fin de vie,
- elle permet une évaluation des impacts potentiels dans une approche multi-impacts,
- c'est une méthode normalisée qui fait référence en évaluation environnementale de produit,
- elle consiste, via l'inventaire des différentes substances utilisées, à évaluer les dépenses énergétiques et matérielles occasionnées tout au long du cycle de vie.

L'originalité de notre méthodologie par rapport à une méthodologie d'évaluation environnementale par ACV classique est qu'elle repose sur des données provenant de sources différentes. En effet, les données d'entrées permettant l'expression sous plusieurs indicateurs d'impacts environnementaux sont à la fois des **données spécifiques au site d'étude et des données génériques issues de base de données**. Les données spécifiques obtenues par des mesures énergétiques via des économètres, les comportements des utilisateurs via des fiches de prise de données et les questionnaires ont permis de rendre plus « locale » et représentative des sites étudiés l'évaluation environnementale effectuée. Cependant, de manière générale, les facteurs de caractérisation nécessaires pour transformer les résultats d'inventaires en indicateurs d'impacts sont issus des bases de données classiques telles que EcoInvent ou Bilan Carbone®. De plus, l'utilisation d'un indicateur **d'éco-efficience** alliant les bénéfices environnementaux à un indicateur économique permet de comparer les différentes solutions d'amélioration potentielles dans le but d'une aide à la prise de décision.

Enfin, ce travail de thèse a été particulièrement enrichi par les **discussions et réflexions avec différents experts** qui s'intéressent à la problématique de l'informatique face à l'environnement :

- le **groupe de travail Ecoinfo du CNRS** qui regroupe une vingtaine de personnes membres de l'enseignement supérieur ou de la recherche. Les réflexions de ce groupe de travail s'organisent autour de trois thématiques principales : (1) l'impact environnemental des équipements informatiques tout au long du cycle de vie des équipements. Cette thématique aborde les aspects méthodologiques et énergétiques, les critères d'achats et la gestion des déchets ; (2) l'impact sociétal pendant la phase de production des équipements et (3) les impacts environnementaux des développements / maintenance de codes.
- l'**association IT²D** qui tente de promouvoir un système d'information éco-responsable par l'intermédiaire de trois axes de réflexion : la réduction des impacts sociaux (par la formation, l'accessibilité des logiciels ou encore l'ergonomie), la réduction des impacts environnementaux (efficacité énergétique, éco-conception, comportement éco-responsable) et la valorisation des contributions positives comme les outils collaboratifs.

La méthodologie a été appliquée à **deux études de cas**. La première application, support de développement, s'est effectuée dans le cadre d'un partenariat avec Casino IT, filiale du groupe Casino. Cette première application a permis de mettre en exergue des points d'améliorations qui ont été mis en œuvre lors de la deuxième application au sein de l'École des Mines de Saint-Etienne.

Les principaux résultats des deux études de cas réalisées sont les suivants :

- **au niveau du domaine de l'évaluation environnementale** : pour la quasi-totalité des impacts environnementaux exprimés, la phase d'amortissement des équipements informatiques apparaît plus impactante que la phase d'utilisation. Ces résultats encouragent la mise en œuvre de solutions tenant compte de ces impacts comme l'allongement de la durée de vie des équipements. De plus, la méthodologie proposée encourage l'enrichissement de l'évaluation environnementale par des données spécifiques au site d'étude.
- **au niveau de l'organisation mandataire de l'étude** : l'identification des points forts et des points sensibles est renforcée par la prise en compte des spécificités et données réelles de l'organisation. Enfin, par l'intermédiaire de la fiche des gains, le décideur a la possibilité de chiffrer les gains réalisables d'un point de vue environnemental et économique via l'indicateur d'éco-efficience suite à la mise en place de nouvelles chartes d'utilisation par exemple.

Les conclusions amenées par cette étude ainsi que les principales perspectives envisagées peuvent être résumées en deux catégories.

Les perspectives techniques de la méthodologie développée sont :

- un approfondissement des **sources d'incertitudes** ainsi que la **sensibilité** des différents paramètres pris en compte dans l'évaluation.
- la prise en compte de **facteurs complémentaires lors de l'application de la méthodologie au sein d'une organisation** : par exemple, la perception des utilisateurs lors des enquêtes sur les comportements ou les différentes contraintes métiers ne permettant pas l'application de certaines solutions d'amélioration.
- un **développement complémentaire ultérieur de l'outil** qui permettrait d'approfondir l'évaluation réalisée en intégrant, par exemple, des indicateurs d'impacts relatifs à la fin de vie des équipements.
- un **retour d'expérience** sur les applications effectuées dans le cadre de cette thèse apporterait des éléments intéressants sur la quantification des impacts ainsi que sur les gains réellement obtenus suite à la mise en œuvre d'actions d'amélioration.
- **l'évolution de l'outil** par l'intermédiaire d'un développement logiciel permettrait de transformer l'outil en outil de suivi et de le rendre plus accessible et plus facilement appréhendable par les utilisateurs.

Les perspectives scientifiques peuvent être résumées en quatre points :

- la prise en compte de la **sensibilité du milieu** dans l'évaluation environnementale afin d'exprimer les impacts environnementaux locaux.
- les difficultés inhérentes à l'expression des impacts environnementaux par l'intermédiaire de **facteurs de caractérisation** possédant une incertitude importante.
- le **périmètre de l'évaluation** retenu : l'ensemble des équipements informatiques d'une organisation qui amène à la question de l'évaluation environnementale d'un « système produit-service »
- le principe d'une évaluation environnementale avec **une approche de type ACV transposée à l'échelle d'une organisation.**

Bibliographie

- [Abadie, 2011] Jacques Abadie. *Le défi de l'informatique verte*, 2011, 64-66.
- [ADEME, 2011a] ADEME. *Diagnostic environnemental*. Disponible sur: <http://www2.ademe.fr>
Consulté le: 4 Août 2011.
- [ADEME, 2011b] ADEME. *Site internet de l'ADEME*. Disponible sur: www.ademe.fr Consulté le: 16 décembre 2011.
- [ADEME, 2010] ADEME. *Bilan Carbone Entreprises - Collectivités - Territoires. Guide méthodologique - Version 6.1* 2010. 1-116.
- [ADEME, 2009a] ADEME. *Bilan des Bilans Carbone® Synthèse 2009a*. 1-7.
- [ADEME, 2009b] ADEME. *Équipements électriques et électroniques: Synthèse 2009*.
- [ADEME, 2005] ADEME. *Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France*, ADEME, 2005. 1-5.
- [ADEME Alsace, 2007] ADEME Alsace. *Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) 2007*. 1-12.
- [Adolphe, et al, 2006] Luc Adolphe, Benjamin Rousval, Jacques Beaumont, et al. *Aide à l'évaluation environnementale des systèmes de transport* 2006. 1-123.
- [Adoue, 2007] Cyril Adoue. *Mettre en oeuvre l'écologie industrielle*, 1ère édition, 2007, 106.
- [Aissani, 2008] Lynda Aissani. *Intégration des paramètres spatio-temporels et des risques d'accident à l'analyse du cycle de vie : application à la filière hydrogène énergie et à la filière essence*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Thèse de doctorat. 2008. 346p.
- [Akboostanci et Türüt-Asik, 2004] I. Tunç Akboostanci and S. Türüt-Asik. *Pollution Haven Hypothesis and the role of dirty industries in Turkey's exports* 2004. 1-15.
- [Allotey et Reidpath, 2002] Pascale A. Allotey and Daniel D. Reidpath. Objectivity in Priority Setting Tools in Reproductive Health: Context and the DALY. *Reproductive health matters*, vol. 10, no. 20, pp. 38-46.
- [Alonso-Rasgado et al, 2004] Teresa Alonso-Rasgado, G. Thompson and B. O. Elfström. The design of functional (total care) products. *Journal of Engineering Design*, vol. 15, no. 6, pp. 515-540.
- [André et al, 1999] Pierre André, Claude-E Delisle and Jean-Pierre Revéret. *L'évaluation des impacts sur l'environnement: Processus, acteurs et pratique*, Presses Internationales Polytechnique, Canada, 1999, 416.

- [Association Bilan Carbone, 2011] Association Bilan Carbone. *Site internet de l'Association Bilan Carbone*. Disponible sur: <http://www.associationbilancarbonate.fr/> Consulté le: 23 décembre 2011.
- [Ballerini et Alazard-Toux, 2006] Daniel Ballerini and Nathalie Alazard-Toux. *Les bilans économiques et environnementaux des filières de production*, Editions Technip, 2006.
- [Beaudoin et Licoppe, 2002] V. Beaudoin and C. Licoppe. *Parcours sur internet*, Paris, 2002,.
- [Bénazeth et al, 2004] Simone Bénazeth, Michel Boniface, Catherine Demarquilly, et al. *Biomathématiques : Analyse - Algèbre - Probabilités - Statistiques*, Editions Masson, 2004, 430p.
- [Benoit, 2002] Valérie Benoit. *Analyse technique, économique, environnementale et sociale de trois filières de production d'hydrogène par la méthode Multicriteria Analysis for Sustainable Industrial Technologies (MASIT)*. 2002. 1-89.
- [Bensebaa et Boudier, 2008] F. Bensebaa and F. Boudier. Gestion des déchets dangereux et responsabilité sociale des firmes. *Développement durable et territoires*.
- [Berge et al, 1997] Erik Berge, Jeanette Beck, Steinar Larssen, et al. *Air Pollution in Europe 1997*, European Environment Agency, Kopenhagen 1997, 1-107.
- [Berkhout et Jertin, 2001] Frans Berkhout and Julia Jertin. *Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: speculations and evidence* 2001.
- [Besson, 2008] Danielle Besson. Consommation d'énergie: autant de dépenses en carburants qu'en énergie domestique. *INSEE première*, vol. 1176, pp. 1-4.
- [Bhamra et al., 2001] T. Bhamra, S. Evans, F. Van Der Zwan, et al. Moving from eco-products to eco-services. *Journal of Design Research*, vol. 1, no. 2, pp. 28-39.
- [Bio Intelligence Service et ADEME, 2011] Bio Intelligence Service and ADEME. *Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique*, Paris, France, 2011. 1-44.
- [Bohas, 2011] Amélie Bohas. *Analyse des labels dans le domaine de l'informatique*. Document de travail interne à l'Association IT2D. Février 2011. 5p.
- [Bonduelle et al , 2011] Antoine Bonduelle, Mathilde Szuba and Bertrand Zuindeau. Facteur 4 : le chantier social et politique [en ligne]. *Développement Durable et territoires*, vol. 2, no. 1, pp. 10 août 2011. Disponible sur: <http://developpementdurable.revues.org/8905>. Consulté le: 10 août 2011.
- [Bordage, 2009] Frédéric Bordage. *Frénésie de nouveaux achats high-tech*. Disponible sur: <http://www.greenit.fr/article/materiel/frenesie-de-nouveaux-achats-high-tech>.

- [Boulanger, 2004] Paul-Marie Boulanger. Les indicateurs de développement durable: un défi scientifique, un enjeu démocratique. 17 avril 2004.
- [Bourguignat, 2008] Frédéric Bourguignat. *Le réemploi du matériel informatique, Note de synthèse* 2008.
- [Bourque et Clark, 1999] Linda B. Bourque and Virginia A. Clark. *Processing data: the survey example*, SAGE Publications, Inc, 1999, 96p.
- [Boutaud, 2004] Aurélien Boutaud. *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?* Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Thèse de doctorat. 2004. 1-415.
- [Boutaud et Gondran, 2009] Aurélien Boutaud and Natacha Gondran. *L'empreinte écologique*, 2009, 128p.
- [Boutry, 2008] Michel Boutry. *Construction d'indicateurs*, Université de Nancy, 2008. 1-33.
- [Breuil et Brun, 2007] Florent Breuil and Emilie Brun. *Responsabilité Sociétale : Terminologie en français de la R.S. pour le développement durable*, 2007, 105 pages.
- [Brignon, 2005] Jean-Marc Brignon. *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France: Plomb2005*. 1-57.
- [Brodhag, 2010] Christian Brodhag. *La double dimension procédurale et substantive de l'ISO 26000*, Economica, Paris, 2010, pp. 131-143.
- [Brunner et Rechberger, 2004] Paul H. Brunner and Helmut Rechberger. *Practical handbook of material flow analysis*, Illustrée, 2004, 318p.
- [Bruntland et al, 1988] Gro Harlem Bruntland, Mansour Khalid, Susanna Agnelli, et al. *Notre avenir à tous*, Edition du Fleuve, Montréal, 1988, 456p.
- [Buckley, 2010] Chris Buckley. *Dream for rare earths rests on grim coss*, Thomson Reuters, USA, 2010, 2-4.
- [Burrirt et Saka, 2006] Roger L. Burrirt and Chika Saka. Environmental management accounting applications and eco-efficiency: case studies from Japan. *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, no. 14, pp. 1262-1275.
- [Campbell-Kelly et Aspray, 2004] Martin Campbell-Kelly and William Aspray. *Computer: A history of the Information machine*, 2004, 325p.
- [Capron, 2010] Michel Capron. *Légitimité et crédibilité des lignes directrices ISO 26000*, Economica, Paris, 2010, pp. 37-54.
- [Carlier, 2005] Alphonse Carlier. *Management de la qualité pour la maîtrise du SI*, 1ère édition, Paris, 2005, 350p.

- [Caron, 2011] Marie-Andrée Caron. ISO 26000 ou la rencontre de l'expert, du profane et du normalisateur. *Bulletin Oeconomia Humana*, vol. 9, no. 4.
- [Carson, 1962] Rachel Carson. *Silent Spring*, Houghton Mifflin, 1962, 155p.
- [Cazala, 2008] C. Cazala. *Eléments pour la caractérisation radiologiques des matières et effluents en application de l'arrêté du 25 mai 2005*, IRSN, 2008. pp. 1-13.
- [CCI, 2009] CCI. *La Moselle numérique. Cartographie des TIC en Moselle*. 2009. pp. 1-44.
- [Cha, et al, 2008] Kyoungsoon Cha, Songtak Lim and Tak Hur. Eco-efficiency approach for global warming in the context of Kyoto Mechanism. *Ecological Economics*, vol. 67, no. 2, pp. 274-280.
- [Chabot, 2005] Bernard Chabot. *La méthode TEC d'analyse économique: Application à la cogénération*, ENSAM, France, 2005. 1-9.
- [Chen et al, 2004] X. A. Chen, Y. E. Cheng, H. Xiao, et al. Health effects following long-term exposure to thorium dusts: a twenty-year follow-up study in China. *Radioprotection*, vol. 39, no. 4, pp. 525-533.
- [Choi et al, 2006] B. Choi, H. Shin, S. Lee, et al. *Life cycle assessment of a personal computer and its effective recycling rate*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 11, no. 2, pp. 122-128.
- [Chomkhamisri et Pelletier, 2011] Kirana Chomkhamisri and Nathan Pelletier. *Analysis of existing environmental footprint methodologies for products and organizations: recommendations, rationale and alignment.*, Institute for Environment and Sustainability, 2011. 1-60.
- [Cikankowitz, 2008] Anne Cikankowitz. *Méthodologie d'évaluation des performances environnementales de techniques en vue de les comparer puis de les valider meilleures techniques disponibles*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Thèse de doctorat. 2008.
- [Cikankowitz et Laforest, 2010] Anne Cikankowitz and Valérie Laforest. La directive IPPC: où en est-on et où va-t-on? [en ligne]. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 10, no. 1, pp. avril 2010. Disponible sur: <http://vertigo.revues.org/9671>. Consulté le: 16 novembre 2011.
- [Cikankowitz et al , 2009] Anne Cikankowitz, Gaëlle Raymond, Eric Piatyszek, et al. Evaluation et intégration de la sensibilité intrinsèque des milieux récepteurs dans une méthodologie d'évaluation des performances environnementales. *Déchets sciences & techniques*. no55, pp. pp. 27-35, ISSN 0753-3454.
- [Code de l'environnement, 2010] Code de l'environnement. *Article L122-1 relatif aux Etudes d'impact des projets de travaux, d'ouvrages et d'aménagements*. 12 juillet.
- [Code des marchés publics, 2011] Code des marchés publics. *Code des marchés publics*. 16 septembre.

- [Code du domaine de l'Etat, 2011] Code du domaine de l'Etat. *Code du domaine de l'Etat*. Légifrance.fr. 25 septembre.
- [Commission de Régulation de l'Energie, 2012] Commission de Régulation de l'Energie. Evolution du mix: les réseaux en première ligne. *Décryptages*, vol. 28, pp. 6-9.
- [Commission Européenne, 2011] Commission Européenne. , *Life Cycle Thinking and Assessment*. Disponible sur: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/> Consulté le: 16 décembre 2011.
- [Commission Européenne, 2008] Commission Européenne. *Code of conduct on Data Centres Energy Efficiency*2008. 1-20.
- [Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, 1987] Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement. *Our Common Future*1987. 1-374.
- [Conseil Européen, 2001] Conseil Européen. *Règlement (CE) n°761/2001 du Parlement Européen et du Conseil du 19/03/2001 permettant la participation volontaire des organisations à un système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS)*. Journal officiel de la Communauté Européenne n°L114. 24 avril 2001.
- [Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1997] Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique. *Protocole de Kyoto*. 11 décembre 1997.
- [Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1992] Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique. *Convention de Rio*. Nations Unies. 4 juin 1992.
- [Corne et al, 2009] Christophe Corne, Adrien Porcheron, Pénélope Guy, et al. *Green IT Les meilleures pratiques pour une informatique verte*, Dunod, Paris, 2009, 223.
- [Cremer et al, 2003] Clemens Cremer, Wolfgang Eichhammer, Michael Friedewald, et al. Energy Consumption of Information and Communication Technology (ICT) in Germany up to 2010. *Technical report Fraunhofer ISI, CEPE*.
- [Cullen et Frey, 1999] A. C. Cullen and Christopher Frey. *Probabilistic Techniques in Exposure Assessment. A Handbook for Dealing with Variability and Uncertainty in Models and Inputs*. Plenum Press, New York and London, 1999. Plunum Press, New York, 1999, 335.
- [Curran, 2008] M. A. Curran. *Life-Cycle Assessment*, Oxford, 2008, pp. 2168-2174.
- [Custot et al, 2010] Julien Custot, Gilles Gastineau, Emmanuel Gauthier, et al. *Industriels en démarche ISO 14001: Manuel d'accompagnement*, Agence de l'eau Seine-Normandie, 2010. 1-48.
- [Dao et al, 2011] Viet Dao, Ian Langella and Jerry Carbo. From green to sustainability: Information Technology and an integrated sustainability framework. *The Journal of Strategic Information Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 63-79.

- [Dassens, 2007] Audrey Dassens. *Méthode pour une approche globale de l'analyse de risques en entreprise. Thèse en risques*. Université de Haute Alsace, Mulhouse. 2007. 1-280.
- [Dee, 2006] Bill Dee. *Environmental Labelling Standards in the ISO 14 000 series*, Kuala Lumpur, 2006. 1-13.
- [Délégation interministérielle au développement durable, 2010] Délégation interministérielle au développement durable. *Stratégie nationale de développement durable 2010 - 2013: vers une économie verte et équitable*, Paris, 2010. 1-60.
- [Délégation interministérielle au développement durable, 2007] Délégation interministérielle au développement durable. *4e Rapport sur la mise en oeuvre de la Stratégie nationale de développement durable 2003-2008*, Paris, 2007. 1-32.
- [Derwent, et al, 1996] R. G. Derwent, M. E. Jenkin and S. M. Saunders. Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under European conditions. *Atmospheric Environment*, vol. 30, no. 2, pp. 181-199.
- [Dessus, et al, 2008a] Benjamin Dessus, Bernard Laponche and Hervé Le Treut. Climat: Effet de serre, n'oublions pas le méthane! *La recherche*, vol. 417, pp. 46-49.
- [Dessus, et al, 2008b] Benjamin Dessus, Bernard Laponche and Hervé Le Treut. Réchauffement climatique: importance du méthane. *Global Change*, , pp. 1-7.
- [Dinglong Li, et al, 2010] Dinglong Li, Xin Ren, Jin Na, et al. Distribution and Origin of Cr and Ni in the Shallow Groundwater along Kuihe River, China. , pp. 1.
- [Dormann et Holliday, 2002] Jürgen Dormann and Chad Holliday. *Innovation, technology, sustainability and society: A world Business for Sustainable Development project*, Switzerland, 2002. 1-38.
- [Dorsouma et Bouchard, 2010] Al-Hamndou Dorsouma and Michel-André Bouchard. Conflits armés et Environnement : Cadre, modalités, méthodes et rôle de l'Évaluation Environnementale [en ligne]. *Développement durable et territoires*, vol. Dossier 8 : Méthodologies et pratiques territoriales de l'évaluation en matière de développement durable, octobre 2011. Disponible sur: <http://developpementdurable.revues.org/3365#tocto1n6>.
- [Drezet, 2011a] Eric Drezet. , *Les lanthanides ou terres rares*. Disponible sur: <http://www.eco-info.org/spip.php?article169#nh1> Consulté le: 25 août 2011.
- [Drezet, 2011b] Eric Drezet. , *De Windows 95 à Windows 7: L'évolution d'un système d'exploitation*. Disponible sur: <http://www.ecoinfo.cnrs.fr/spip.php?article211> Consulté le: 25 août 2011.
- [Drezet, 2010] Eric Drezet. , *Des matériaux critiques pour l'union européenne*. Disponible sur: <http://www.ecoinfo.cnrs.fr/spip.php?article197> Consulté le: 11 juillet 2011.
- [Dufourq et Besse, 2004] Elisabeth Dufourq and Geneviève Besse. *Rapport sur la responsabilité sociale des entreprises*, Paris, 2004. 1-170.

- [Dufresne et Laberge, 2006] Jacques Dufresne and Hélène Laberge. , *Eco-efficience*. Disponible sur: http://agora.qc.ca/Documents/Ecologie_industrielle--Eco-efficience_par_Environnement_Quebec Consulté le: 22 avril 2011.
- [Durin, 2010] Bertrand Durin. *Lutte contre le changement climatique. Bilan Carbone  : Contexte, Méthodes, Pistes d'actions*, Direction Départementale Rhône. Service ingénierie et développement durable, 2010. 1-23.
- [Ecobilan, 2004] Ecobilan. *Evaluation des impacts environnementaux des sacs de caisse Carrefour. Analyse du cycle de vie de sacs de caisse en plastique, papier et matériau biodégradable*2004. 1-119.
- [El Bouazzaoui, 2008] Ibtissam El Bouazzaoui. *L'empreinte écologique à petite échelle Un outil d'évaluation environnementale et de communication sur l'efficacité de l'entreprise dans sa démarche continue de réduction des impacts de ses activités industrielles* . Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Thèse de doctorat. 2008. 1-252.
- [Electronics TakeBack Coalition, 2010] Electronics Take Back Coalition. *Facts and Figures on E-Waste and Recycling* 2010. 1-8.
- [Enertech, 2008] Enertech. *Projet REMODECE: Mesure de la consommation des usages domestiques de l'audiovisuel et de l'informatique*2008. 1-80.
- [Engasser, 2010] Jean-Marc Engasser. *Analyse de cycle de vie: Application aux bioproduits*, Institut National Polytechnique de Lorraine -   cole nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires, 2010. 1-76.
- [ENSM-SE, 2010] ENSM-SE. *Projet Green IT: Rapport final d'étude*. 2010. 1-106.
- [Erkman, 1998] Suren Erkman. *Vers une écologie industrielle : Comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle*, Diffusion Charles Léopold Mayer et La librairie FPH, Paris, 1998, 147.
- [Eugster et Hischier, 2007] Martin Eugster and Roland Hischier. *Key environmental impacts of the Chinese EEE-Industry*2007. 1-90.
- [European Commission, 2010] European Commission. *Critical raw materials for the EU*2010. 1-84.
- [European Environment Agency, 2005] European Environment Agency. *The European environment - State and outlook 2005*, Copenhagen, 2005, 584-584.
- [European Environment Agency, 2003] European Environment Agency. *Europe's environment: the third assessment*, Copenhagen, Denmark, 2003. 1-344.
- [Evan, 2003] Jean René Evan. *Puissance en courant continu et en courant alternatif*. 2003. 1-8.
- [Fanara, 2003] Andrew Fanara. *The ENERGY STAR   Label: A Summary of Product Labeling Objectives and Guiding Principles*, US EPA 2003, 1-11.

- [FAO, 2011] FAO, *Pressure-State-Response Framework and Environmental Indicators*. Disponible sur: <http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/en/lead/toolbox/Refer/EnvIndi.htm>
Consulté le: août 2011.
- [Faure-Rochet, 2009] Odile Faure-Rochet. *Analyse environnementale: Les clés de la réussite*, 2009, 330p.
- [Flipo et al, 2007] Fabrice Flipo, Annabelle Boutet, Laura Draetta, et al. *Ecologie des infrastructures numériques*, 2007, 228.
- [Flipo et al, 2009] Fabrice Flipo, Cédric Gossart, François Deltour, et al. *Technologies numériques et crise environnementale: peut-on croire aux TIC vertes?* 2009. 1-213.
- [Fransen et al, 2007] Taryn Fransen, Pankaj Bhatia and Angel Hsu. *The Greenhouse Gas Protocol Measuring to Manage: A guide to designing GHG accounting and reporting programs* 2007. 1-56.
- [Frey et al, 2006] Christopher Frey, Jim Penman, Lisa Hanle, et al. *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*, GIEC, 2006. 1-76.
- [Friot, 2009] Damien Friot. *Comptabilité environnementale et mondialisation. Quels défis ? Quels modèles pour y répondre ? Application d'un modèle Economie-Environnement-Impacts à l'évaluation des impacts environnementaux en Chine induits par l'Europe, et aux taxes carbone aux frontières de l'UE*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Thèse de doctorat. 2009.
- [Frischknecht et al, 2000] R. Frischknecht, A. Braunschweig, P. Hofstetter, et al. Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 20, no. 2, pp. 159-189.
- [Frischknecht et al, 2007] Rolf Frischknecht, N. Jungbluth, Hans-Jörg Althaus, et al. *Overview and methodology*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007. 1-77.
- [Gallimard, 2004] Gallimard. *Planète Terre: Montagnes, déserts, océans, forêts, volcans, rivières, glaciers, climat*, 1ère, Paris, 2004, 520.
- [Gartner, 2010] Gartner. *Context Aware Computing*, Stamford, 2010. 1-148.
- [Gartner, 2007] Gartner. *Gartner Estimates ICT Industry Accounts for 2 Percent of Global CO₂ Emissions*. Disponible sur: <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=503867> Consulté le: août 2011.
- [Gendron, 2005] Corinne Gendron. *Comment concilier environnement et industrie ?* 2005.
- [Giarini et Stahel, 1989] Orio Giarini and Walter R. Stahel. *The limits ton certainty - facing risks in the new service economy*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1989, 270p.
- [GIEC, 2008] GIEC. *Changements climatiques 2007 : Rapport de synthèse*, Suède, 2008. 1-114.

- [GIEC, 2007] GIEC. *4ème Rapport d'évaluation - Contribution du groupe de Travail 1. Bilan 2007 des changements climatiques: La base scientifique*, Bruxelles, 2007. 1-4.
- [GIEC, 2000] GIEC. *Recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*, Norvège, 2000. 1-594.
- [Gilet, 2000] Dominique Gilet. *Les ACV (Analyses de Cycle de Vie) dans les industries graphiques*, Grenoble, France, 2000. 1-4.
- [Global Chance, 2008] Global Chance. , *Effet de serre: n'oublions pas le méthane*. Disponible sur: <http://www.global-chance.org/spip.php?article83> Consulté le: 10 novembre 2011.
- [Gnansounou et Dauriat, 2004] E. Gnansounou and A. Dauriat. *Etude comparative de carburants par analyse de leur cycle de vie*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004. 1-76.
- [Gondran, 2012] Natacha Gondran. The ecological footprint as a follow-up tool for an administration: Application for the Vanoise National Park. *Ecological Indicators*, vol. 16, no. 0, pp. 157-166.
- [Gondran, 2001] Natacha Gondran. . *Système de diffusion d'information pour encourager les PME-PMI à améliorer leurs performances environnementales*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Thèse de doctorat. 2001. 383p.
- [Gordon et al, 2006] RB Gordon, M. Bertram and TE Graedel. Metal stocks and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, no. 5, pp. 1209-1214.
- [Goudet, 2007] Jean-Marc Goudet. Ecrans LCD: Bientôt une pénurie d'indium [en ligne]. *Futura-techno, le nouveau magazine high-tech*, , pp. octobre 2011. Disponible sur: http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/technologie-1/d/ecrans-lcd-bientot-une-penurie-dindium_14020/.
- [Graini, 2010] Mohammed Graini. *Gestion, administration et supervision des systèmes d'information. Introduction: Définitions, concepts de base et modélisation* 2010. 1-41.
- [Greenpeace, 2010] Greenpeace. *Guide to Greener Electronics* 2010. 1-37.
- [Greenpeace, 2005] Greenpeace. *Dangerous chemicals in Electronics Products* 2005. 1-21.
- [Grisel et Osset, 2004] Laurent Grisel and Philippe Osset. *L'analyse du Cycle de Vie d'un produit ou d'un service: Applications et mise en pratique*, 2004, 358p.
- [Guerrant et al, 2002] Richard L. Guerrant, Margaret Kosek, Aldo A. M. Lima, et al. Updating the DALYs for diarrhoeal disease. *Trends in parasitology*, vol. 18, no. 5, pp. 191-193.

- [Guinée et al, 2002] J. B. Guinée, M. Gorrée, R. Heijungs, et al. *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002, 692p.
- [Guinée, 1995] Jeroen B. Guinée. *Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study on margarines.* Université de Leiden, Netherlands. Thèse de doctorat. 1995. 225p.
- [Gy, 1998] Pierre Gy. *Echantillonnage*, Techniques de l'Ingénieur, 1998. 1-23.
- [Habermas, 1997] Jürgen Habermas. *Théorie de l'agir communicationnel*, Fayard, Paris, France, 1997, 480p.
- [Hammond, 2007] Geoffrey Hammond. *Time to give due weight to the carbon footprint issue.* *Nature*, vol. 445, pp. 256-256.
- [Hao Cai, 2011] Hao Cai. *An integrated model for the Environmental Impact Assessment of Highways in China.* pp. 1.
- [He et al, 2010] Jiang He, Chang-Wei Lü, Hong-Xi Xue, et al. Species and distribution of rare earth elements in the Baotou section of the Yellow River in China. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 32, no. 1, pp. 45-48.
- [Heijungs et al, 1992] Reinout Heijungs, Jeroen B. Guinée, G. Huppes, et al. *Environmental life cycle assessment of products: Guide and Backgrounds*, Institute of Environmental Sciences, CML, Leiden, Netherlands, 1992, 130p.
- [Hertwich, 2005] Edgar G. Hertwich. Consumption and the rebound effect: An industrial ecology perspectives. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 9, no. 1-2, pp. 85-98.
- [Hertwich et Peters, 2009] Edgar G. Hertwich and Glen P. Peters. Carbon Footprint of Nations: A global, Trade-linked Analysis. *Environmental Science Technology*, vol. 43, no. 16, pp. 6414-6420.
- [Hewlett Packard, 2010] Hewlett Packard. , *Comment choisir son écran d'ordinateur?*. Disponible sur:<http://www8.hp.com/be/fr/home.html> Consulté le: Août 2011.
- [Hirschl et al, 2003] Bernd Hirschl, Wilfried Konrad and Gerd Scholl. New concepts in product use for sustainable consumption. *Journal of Cleaner Production*, vol. 11, no. 8, pp. 873-881.
- [Hischier et al, 2010] Roland Hischier, Bo Weidema, Hans-Jörg Althaus, et al. *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods* 2010. 1-176.
- [Hitz et Smith, 2004] Samuel Hitz and Joel Smith. Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change*, vol. 14, no. 3, pp. 201-218.
- [Hoekstra, 2003] Arjen Y. Hoekstra. *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade.* 12-13 décembre 2002, IHE Delft.

- [Hoekstra et Chapagain, 2008] Arjen Y. Hoekstra and Ashok K. Chapagain. *Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources*, Wiley-Blackwell, 2008, 232p.
- [Hoekstra et al, 2011] Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya, et al. *The Water Footprint Assessment Manual Setting the global standard* 2011.
- [Houghton, 1995] John Theodore Houghton. *Climate Change 1994. Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 Emission scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge England, 1995, 339.
- [Hubert, 2011] Séverine Hubert. *LRE et méthodes d'équivalence*, CETE de Lyon, 2011. 1-31.
- [Huh et Chen, 1999] Chih-An Huh and Hung-Yu Chen. History of Lead Pollution Recorded in East China Sea Sediments. *Marine pollution bulletin*, vol. 38, no. 7, pp. 545-549.
- [Huijbregts et al, 2000] M. A. J. Huijbregts, U. Thissen, J. B. Guinée, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA. *Chemosphere*, vol. 41, no. 4, pp. 541-573.
- [Huijbregts, 1999] Mark A. J. Huijbregts. *Priority assessment of toxic substances in the frame of LCA. Time horizon dependency of toxicity potentials calculated with the multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA*, Faculty of Environmental Sciences, University of Amsterdam, 1999. 76p.
- [Huijbregts et al, 2010] Mark A. J. Huijbregts, Michael Z. Hauschild, Olivier Jolliet, et al. *USEtox™- User manual*, Usetox.org, 2010. 1-23.
- [INERIS, 2011] INERIS. *Guide de management SSE*, Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2011. 1-212.
- [Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire, 2012] Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire. *Baromètre IRSN 2012: La perception des risques et de la sécurité par les français*, Nanterre, 2012.
- [ISO 14001, 2004] ISO 14001. *Systèmes de management environnemental. Exigences et lignes directrices pour son utilisation. Norme européenne - norme française NF EN ISO 14001:2004*. 1-25.
- [ISO 14021, 1999] ISO 14021. *Environmental labels and declarations- Self declared environmental claims (Type II environmental labelling)*, Switzerland, 1999. 1-23.
- [ISO 14024, 1999] ISO 14024. *Environmental labels and declarations - Type I Environmental labelling - Principles and procedures*, Switzerland, 1999. 1-18.
- [ISO 14025, 2006] ISO 14025. *Environmental labels and declarations - Type III environmental declaration - Principles and procedures*, Switzerland, 2006. 1-25.

- [ISO 14031, 2000] ISO 14031. *Management Environnemental - Evaluation de la performance environnementale Lignes directrices Norme Européenne Norme Française NF EN ISO 140312000*. 1-35.
- [ISO 14040, 2006] ISO 14040. *Management environnemental. Analyse de cycle de vie, principes et cadre. Norme européenne – norme française NF EN ISO 140402006*. 1-23.
- [ISO 14044, 2006] ISO 14044. *Management environnemental. Analyse de cycle de vie. Exigences et Lignes directrices. Norme européenne – norme française NF EN ISO 140442006*. 1-59.
- [ISO 14064, 2006] ISO 14064. *Management environnemental. Gaz à effet de serre. Spécifications et Lignes directrices. Norme internationale ISO 14064*, Genève, 2006.
- [ISO 26000, 2010] ISO 26000. *Lignes directrices relatives à la Responsabilité Sociétale Norme internationale ISO 26000*, Genève, 2010. 1-88.
- [ISO 51 27, 2001] ISO 51 27. *Information et documentation. Vocabulaire Norme Européenne - Norme Française NF EN ISO 51272001*. 1-23.
- [Janin, 2000] Marc Janin. *Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus*. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Chambéry. Thèse de Doctorat. 2000. 423p.
- [Jazayeri et al, 2008] Seyed Jazayeri, Paul Kralovic, Afshin Honarvar, et al. *Analyse du cycle de vie comparative pour la production d'électricité de base en Ontario*, Canadian Energy Research Institute, 2008. 1-228.
- [Jenkin et al, 2011] Tracy A. Jenkin, Jane Webster and Lindsay McShane. An agenda for 'Green' information technology and systems research. *Information and Organization*, vol. 21, no. 1, pp. 17-40.
- [Johnstone, 2007] Nick Johnstone. *Environmental Policy and Corporate Behaviour*, 2007, 343p.
- [Jolliet et al, 2010] Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Crettaz, et al. *Analyse du Cycle de Vie: Comprendre et réaliser un écobilan*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2010, 302.
- [Jourdon, 2009] Camille Jourdon. *Uncertainty arising from sampling*. School of Mathematics and Statistics, 2009. 1-182.
- [Journal Officiel de la République Française, 2011] Journal Officiel de la République Française. *Décret n°2011-829 du 11 juillet 2011 relatif au bilan des émissions de gaz à effet de serre et au plan climat-énergie territorial*. Journal Officiel de la République Française du 12 juillet 2011.
- [Journal Officiel de la République Française, 2009a] Journal Officiel de la République Française. *Arrêté du 30 juin 2009 relatif à la procédure d'enregistrement et de déclaration au registre national pour les équipements électriques et électroniques prévu à l'article R. 543-202 du code de l'environnement*. Journal Officiel de la République Française du 9 juillet.

- [Journal Officiel de la République Française, 2009b] Journal Officiel de la République Française. *Loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*. Journal Officiel de la République Française du 5 août.
- [Journal Officiel de la République Française, 2008] Journal Officiel de la République Française. *Circulaire du 3 décembre 2008 relative à l'exemplarité de l'Etat au regard du développement durable dans le fonctionnement de ses services et de ses établissements publics*. Journal Officiel de la République Française du 12 février.
- [Journal Officiel de la République Française, 2005] Journal Officiel de la République Française. *Décret n° 2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements*. Journal Officiel de la République Française du 22 juillet 2005.
- [Journal Officiel de la République Française, 2001] Journal Officiel de la République Française. *Loi n° 2001-420 du 15 mai 2001 relative aux nouvelles régulations économiques*. Journal Officiel de la République Française du 15 mai.
- [Journal Officiel de la République Française, 1998] Journal Officiel de la République Française. *Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation*. Journal Officiel de la République Française du 3 mars.
- [Journal Officiel de la République Française, 1976] Journal Officiel de la République Française. *Loi n°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement*. Paris. Journal Officiel de la République Française du 19 juillet.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2010a] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Directive 2010/30/UE du parlement européen et du conseil du 19 mai 2010 concernant l'indication, par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, de la consommation en énergie et en autres ressources des produits liés à l'énergie (refonte)*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 18 juin.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2010b] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Directive 2010/75/UE du parlement européen et du conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution (refonte))*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 17 décembre.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2009] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Directive établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie (refonte)*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 31 octobre.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2008] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Règlement (CE) n°106/2008 du parlement européen et du conseil du 15 janvier 2008 concernant un programme communautaire d'étiquetage relatif à l'efficacité énergétique des équipements de bureau (refonte)*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 13 février.

- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2006a] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Règlement (CE) n°196/2006 de la Commission du 3 février 2006 modifiant l'annexe I du règlement (CE) n°761/2001 du Parlement européen et du Conseil afin de tenir compte de la norme européenne EN ISO 14001:2004, et abrogeant la décision 97/265/CE*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 4 février.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2006b] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Décision du conseil du 18 décembre 2006 relative à la conclusion de l'accord entre le gouvernement des États-Unis d'Amérique et la Communauté européenne concernant la coordination des programmes d'étiquetage relatifs à l'efficacité énergétique des équipements de bureau*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 28 décembre.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 2003] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Directive 2001/95/CE du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 13 février 2003.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 1996] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Directive 96/61/CE du 24 septembre 1996 concernant la prévention et la réduction intégrées de la pollution*. Journal Officiel de l'Union Européenne du 10 octobre.
- [Journal Officiel de l'Union Européenne, 1975] Journal Officiel de l'Union Européenne. *Directive n°75/442/CEE du 15/0775 relative aux déchets*. Journal Officiel de l'Union Européenne n° L 194 du 25 juillet.
- [Jullien et al., 2010] Agnès Jullien, Anne Ventura, Philippe Tamagny. *Eco-comparateurs en génie civil : quel jeu d'indicateurs ?* RGRA, n° 883, mars 2010, pp 21-27
- [Kennedy, 2006] Alcius Gérard Kennedy. *Politiques éducatives et adoption des technologies de l'information en République Démocratique du Congo : une analyse par la théorie d'adoption de l'innovation*.2006. 1-20.
- [Ko et Osei-Bryson, 2004] Myung Ko and Kweku-Muata Osei-Bryson. The productivity impact of information technology in the healthcare industry: an empirical study using a regression spline-based approach. *Information and Software Technology*, vol. 46, no. 1, pp. 65-73.
- [Laforest, 2008] Valérie Laforest. *Applying Best Available Techniques in Environmental Management Accounting: From the Definition to an Assessment Method*, 2008, p 29-47.
- [Lagaronne et al, 2003] Charles Lagaronne, Vincent Ramus, Eric Gallardo, et al. *Orientationservice - entreprises : renforcez votre offre industrielle avec du service.*, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie - DiGITIP, 2003. 1-15.
- [Laitner, 2002] John A. 'Skip' Laitner. Information Technology and U.S. Energy Consumption: Energy Hog, Productivity Tool, or Both? *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, no. 2, pp. 13-24.
- [Lapointe, 2004] Gilles Lapointe. *Notions de toxicologie*. 2004. 1-69.

- [Larsen, 2010] Henrik F. Larsen. *Modelling life cycle impacts of toxics on humans and ecosystems with the USEtoxTM model: USEtox ecotoxicity effect modelling*, Technical University of Denmark, 2010. 1-20.
- [Larsen et Hauschild, 2007] Henrik F. Larsen and Michael Z. Hauschild. GM-troph: A low data demand ecotoxicity effect indicator for use in LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, no. 2, pp. 79-91.
- [Larzabal, 2009] Hugo Larzabal. *Impact de l'informatique sur l'environnement*, Rapport de stage de 3^{ème} année à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne. 2009.
- [Lash et Wellington, 2007] Jonathan Lash and Fred Wellington. Competitive advantage on a warming planet. *Harvard Business Review*, vol. 85, no. 3, pp. 94-104.
- [Layet, 2007] Maxence Layet. TV : Les écrans plats anéantissent 15 ans d'efficacité énergétique [en ligne]. *Novethic*, pp. Août 2011. Disponible sur: http://www.novethic.fr/novethic/entreprise/pratiques_commerciales/produits/tv_echans_plats_aneantissent_15_ans_efficacite_energetique/106764.jsp.
- [Le Petit Robert, 2001] Le Petit Robert. *Le Petit Robert, Dictionnaire de la langue française*, 2001, 2842.
- [Le Pochat, 2008] Stéphane Le Pochat. *Eco-conception et ACV pour l'innovation et le développement durable: Logiciel SIMAPRO*, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, 2008. 1-10.
- [Le Teno, 2011] Hélène Le Teno. *Question relative au facteur de conversion pour la fabrication d'un ordinateur*, 2011.
- [Le Treut, 2003] Hervé Le Treut. Les scénarios globaux de changement climatique et leurs incertitudes. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 335, no. 6–7, pp. 525-533.
- [Leduc et Raymond, 2000] Gaétan Leduc and Michel Raymond. *L'évaluation des impacts environnementaux : Un outil d'aide à la décision*, Editions Multimondes, Québec, 2000, 403.
- [Lee et Farzipoor Saen, 2012] Ki-Hoon Lee and Reza Farzipoor Saen. Measuring corporate sustainability management: A data envelopment analysis approach. *International Journal of Production Economics*, In Press.
- [Lehni, 2000] Markus Lehni. *Eco-efficiency: Creating more value with less impact* 2000. 1-35.
- [Licoppe et Smoreda, 2005] Christian Licoppe and Zbigniew Smoreda. Are social networks technologically embedded?: How networks are changing today with changes in communication technology. *Social Networks*, vol. 27, no. 4, pp. 317-335.
- [Lopez Ontiveros, 2004] Miguel Angel Lopez Ontiveros. *Intégration des contraintes de remanufacturabilité en conception de produits*. Institut National Polytechnique de Grenoble. Thèse de doctorat. 2004. 133p.

- [Ma et al, 2009] Jinzhu Ma, Zhenyu Ding, Guoxiao Wei, et al. Sources of water pollution and evolution of water quality in the Wuwei basin of Shiyang river, Northwest China. *Journal of environmental management*, vol. 90, no. 2, pp. 1168-1177.
- [Madden et al, 2005] Katherine Madden, Rebekah Young, Kevin Brady, et al. *Eco-efficiency: Learning module*. 2005. 1-231.
- [Maussang et al, 2007] Nicolas Maussang, Tomohiko Sakao, Peggy Zwolinski, et al. A model for designing product-service systems using functional analysis and agent based model. 2007-08-28, .
- [Maussang-Detaille, 2008] Nicolas Maussang-Detaille. *Méthodologie de conception pour les systèmes produits-services*. Institut National Polytechnique de Grenoble. Thèse de doctorat. 2008. 174p.
- [Maxime et al, 2006] Dominique Maxime, Michèle Marcotte and Yves Arcand. Development of eco-efficiency indicators for the Canadian food and beverage industry. *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, no. 6-7, pp. 636-648.
- [Maystre et Bollinger, 1999] Lucien Yves Maystre and Dominique Bollinger. *: pratique et conseils*, Lausanne, 1999, .
- [MEDDTL, 2011] MEDDTL. *Site internet du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement*. Disponible sur: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/MEDDTL-Ministere-de-l-Ecologie-du.html> Consulté le: 25 mai 2011.
- [Médiamétrie et GfK , 2011] Médiamétrie and GfK. *Référence des équipements multimédias*, Levallois, 2011. 1-2.
- [Meric, 2009] Solène Meric. Méta IT : l'ordinateur Bordelais en phase avec le respect de l'environnement! [en ligne]. *Aqui! Environnement*. Disponible sur: <http://www.aqui.fr/environnements/meta-it-l-ordinateur-bordelais-en-phase-avec-le-respect-de-l-environnement,2537.html>.
- [Méta IT SAS, 2011] Méta IT SAS. , *ALT META IT: L'ordinateur Eco-conçu*. Disponible sur: <http://alt.meta-it.fr/> Consulté le: 10 octobre 2011.
- [Michel, 2001] Patrick Michel. *L'étude d'impact sur l'environnement: Objectifs, cadre réglementaire, conduite de l'évaluation*, 2001, 157p.
- [Mills et Huber, 1999] Mark Mills and Peter Huber. The Internet begins with coal: A preliminary exploration of the impact of the Internet on electricity consumption. *Greening Earth Society*, .
- [Ministry of Environmental Protection, 2009] Ministry of Environmental Protection. *The Explanation of Compiling Emission Standards of Pollutants from Rare Earths Industry*, 2009.
- [Mintzberg, 1990] Henry Mintzberg. *Le management, voyage au centre des organisations*, Edition d'Organisation, Paris, 1990, 570p.

- [Moll et al, 2005] Stephan Moll, Stefan Bringezu and Helmut Schütz. *Resource Use in European Countries: An estimate of materials and waste streams in the Community, including imports and exports using the instrument of material flow analysis, Wuppertal Report N°1*, Copenhagen, 2005. 1-105.
- [Moreau et al, 2011a] Valentine Moreau, Natacha Gondran and Valérie Laforest. Integrating Environmental Assessment Methods: Development of a New Approach. 2011-05-00; 2011-05-05; 2011-05-06, Braunschweig (Allemagne). Technische Universität Braunschweig, , pp. 272.
- [Moreau et al, 2011b] Valentine Moreau, Natacha Gondran and Valérie Laforest. Towards the Integration of Local and Global Environmental Assessment Methods: Application to Computer System Power Management. 2011-05-00; 2011-05-02; 2011-05-04, Braunschweig (Allemagne). Technische Universität Braunschweig, .
- [Moreau et al, 2009] Valentine Moreau, Natacha Gondran and Valérie Laforest. Impacts locaux ou planétaires, aspects directs ou indirects : Définitions, Limites et prise en compte dans l'évaluation environnementale. 2009-06-10; 2009-06-08, .
- [Morgan et Henrion, 1990] M. G. Morgan and M. Henrion. *Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*, Cambridge University Press, New York, 1990.
- [Mulumba, 2000] Martha Mulumba. *Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone*. 2000.
- [Munn, 2002] Ted Munn. *Encyclopedia of Global Environmental Change Causes and Consequences of Global Environmental Change (including natural as well as human forces)*, 2002, 3440p.
- [Murray et Acharya, 1997] Christopher J. L. Murray and Arnab K. Acharya. Understanding DALYs. *Journal of health economics*, vol. 16, no. 6, pp. 703-730.
- [Nauroy, 2011] Frédéric Nauroy. *Impact de l'épuisement des ressources naturelles sur les agrégats économiques*. 2011. 1-56.
- [Newsham et Tiller, 1994] G. R. Newsham and D. K. Tiller. The energy consumption of desktop computers: measurement and savings potential. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 4, pp. 1065-1072.
- [Newsham et Tiller, 1992] G. R. Newsham and D. K. Tiller. A case study of the energy consumption of desktop computers. pp. 1218.
- [Nodé-Langlois, 2011] Fabrice Nodé-Langlois. L'Europe s'inquiète de l'accès aux métaux rares [en ligne]. *Le Figaro*, , pp. 10 juillet 2011. Disponible sur: <http://www.lefigaro.fr/matieres-premieres/2010/06/18/04012-20100618ARTFIG00651-l-europe-s-inquiete-de-l-acces-aux-metaux-rares.php>. Consulté le: 10 juillet 2011.
- [OCDE, 2011] OCDE. , *Key ICT indicators*. Disponible sur: www.oecd.org/sti/ICTindicators Consulté le: juillet 2011.

- [OCDE, 2009] OCDE. *Pressures on West African land: Reconciling development and investment policies*, Bamako, Mali, 2009. 1-71.
- [OCDE, 2007] OCDE. *Eco-innovation, policy and globalisation: Making a world difference*. *OECD Observer*, vol. 264.
- [OCDE, 2001] OCDE. *Responsabilité élargie des producteurs: Manuel à l'intention des pouvoirs publics*, Les éditions de l'OCDE, Paris, France, 2001, 176.
- [OCDE, 1993] OCDE. *Core set of indicators for environmental performance reviews: A synthesis report by the Group on the State of the Environment*, Paris, 1993.
- [Office de la Langue Française, 2011] Office de la Langue Française. *Le grand dictionnaire terminologique*. Disponible sur: http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index800_1.asp Consulté le: 11 juillet 2011.
- [Oliver, 2005] Adam Oliver. *Disability Adjusted Life Years (DALYs) for Decision-making? An Overview of the Literature*: Julia A. Fox-Rushby; Office of Health Economics, 2002, 172 pages, ISBN 1-899040-37-4, £10. *Public health*, vol. 119, no. 2, pp. 155.
- [Olsthoorn et al, 2001] Xander Olsthoorn, Daniel Tyteca, Walter Wehrmeyer, et al. Environmental indicators for business: a review of the literature and standardisation methods. *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, no. 5, pp. 453-463.
- [ORSE, 2004] ORSE. *OREE Rapport de mission remis au gouvernement. Bilan critique de l'application par les entreprises de l'article 116 de la loi NRE.2004*. 1-69.
- [Overeem, 2009] Pauline Overeem. *Reset Corporate social responsibility in the global electronics supply chain*. 2009. 1-98.
- [Parlement et Conseil Européen, 2004] Parlement et Conseil Européen. *Directive 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux*. Journal Officiel de l'Union Européenne n° L 143. 30 avril.
- [Parlement et Conseil Européen, 2003a] Parlement et Conseil Européen. *Directive 2002/95/CE du 27 janvier 2003*. Journal Officiel de l'Union Européenne. 13 février.
- [Parlement et Conseil Européen, 2003b] Parlement et Conseil Européen. *Directive 2002/96/CE du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)*. Journal Officiel de l'Union Européenne. 13.02.2003.
- [Parlement Européen, 2010] Parlement Européen. *Towards a new Energy Strategy for Europe 2011-2020*. Disponible sur: <http://www.europarl.europa.eu/oeil/file.jsp?id=5862272¬iceType=null&language=en> Consulté le: juillet 2011.

- [Parry et al, 2007] M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, et al. *IPCC fourth assessment report: Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge, United Kingdom, 2007, 976p.
- [Personne, 1998] Marion Personne. *Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI: Evaluation des performances environnementales*. Institut National des Sciences Appliquées, Villeurbanne, France. 1998. 294p.
- [Plançon, 2009] Caroline Plançon. Enjeu des droits fonciers dans la gestion des ressources naturelles [en ligne]. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. Hors série 6, , pp. octobre 2011. Disponible sur: <http://vertigo.revues.org/9040>.
- [Poulain et Lefebvre, 2010] Laurent Poulain and Alain Lefebvre. *Cow-boys contre chemin de fer ou que savez-vous vraiment de l'informatique?* Kindle Edition, 2010, .
- [Prats, 2011] Alain Prats. *Documentation d'un système de management environnemental*. 2011. 1-9.
- [Priou, 2007] Christophe Priou. *Rapports législatifs de l'Assemblée Nationale* 2007. 1-75.
- [Raymond, 2009] Gaëlle Raymond. *Réduction des impacts environnementaux des ateliers de traitement de surfaces : Application de stratégies de production plus propres et plus sûres*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Thèse de doctorat. 2009. 279p.
- [Reflex'eco, 2011] Reflex'eco. , *La norme ISO 26000 est opérationnelle depuis novembre 2010*. Disponible sur: www.reflexeco.eu/standards/iso-26000 Consulté le: 9 septembre 2011.
- [Ritthoff et al, 2002] Michael Ritthoff, Holger Rohn and Christa Liedtke. *Calculating MIPS Resource productivity of products and services* 2002. 1-53.
- [Rivière, 2000] Carole Rivière. Les réseaux de sociabilité téléphonique. *Revue française de sociologie*, vol. 41, no. 4, pp. 685-717.
- [Rosenbaum et al, 2008] Ralph K. Rosenbaum, Till M. Bachman, Lois Swirsky Gold, et al. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 13, no. 7, pp. 532-546.
- [Rousseau, 2007] Yann Rousseau. *Evaluation économique des dommages environnementaux sur accidents industriels*, Etudes économiques et évaluation environnementale, Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable, 2007. 1-101.
- [Rousseaux, 2005] Patrick Rousseaux. Analyse du Cycle de Vie (ACV) [en ligne]. *Techniques de l'Ingénieur*, vol. G5500, , pp. février 2009. Disponible sur: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/batiment-et-environnement-ti540/analyse-du-cycle-de-vie-acv-g5500/>.

- [Rousseaux, 1993] Patrick Rousseaux. *Evaluation comparative de l'impact global du cycle de vie des produits*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Thèse de doctorat. 1993. 237p.
- [RTE et ADEME, 2007] RTE and ADEME. *Le contenu en CO₂ du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique*. Réseau de transport de l'électricité, 2007. 1-7.
- [Ruediger et Williams, 2003] Kuehr Ruediger and Eric Williams. *Computers and the environment: Understanding and managing their impacts*, 2003, 296p.
- [Saulou, 2006] Jean-Yves Saulou. *Tableaux de bords pour décideurs qualité*, 2ème, 2006, 192.
- [Sayagh et al., 2010] Shahinaz Sayagh, Anne Ventura, Tunq Hoang, Denis François, Agnès Jullien. *Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 54, no. 6. pp. 348-358.
- [Schafer et Weber, 2003] C. Schafer and C. Weber. Mobilfunk und energiebedarf. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, vol. 50, no. 4, pp. 237-241.
- [Schafer, 2009] Jason Schafer. *Internet Datacenter Supply - Midyear 2009 Update* 2009. 1-53.
- [Schaltegger et Burritt, 2010] Stefan Schaltegger and Roger L. Burritt. Sustainability accounting for companies: Catchphrase or decision support for business leaders? *Journal of World Business*, vol. 45, no. 4, pp. 375-384.
- [Schmidheiny, 1992] Stephan Schmidheiny. *Changing course: A global business perspectives on development and the environment*, WBCSD, 1992, 448p.
- [Schmidt-Bleek, 2001] Friedrich Bio Schmidt-Bleek. *Histoire du Facteur 10 et MIPS*, Camoules, France, 2001. 1-5.
- [Schneider et al, 2001] François Schneider, Friedrich Hinterberger, Roman Mesicek, et al. ECO-INFO-SOCIETY : Strategies for an Ecological Information Society. 10-12 octobre 2001, Zurich. Metropolis-Verlag, , pp. 831.
- [Schüler et al, 2011] Doris Schüler, Matthias Buchert, Ran Liu, et al. *Study on Rare Earths and Their Recycling Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament*, Darmstadt, Allemagne, 2011.
- [Servent et al, 2005] Jean-Pierre Servent, Christine Gauron and Marie-Hélène Boulay. *Les rayonnements ionisants: Prévention et maîtrise du risque*, 2005. 1-52.
- [Service de l'Observation et des Statistiques, 2011] Service de l'Observation et des Statistiques. *Chiffres et Statistiques n°207: Matières mobilisées par l'économie française de 1990 à 2008*, Commissariat général au développement durable, 2011. 1-6.
- [Smeets et Wetering, 1999] Edith Smeets and Rob Wetering. *Environmental indicators: typology and overview*. European Environment Agency, Technical Report N°25. 1999. 1-25.

- [Smoreda et Licoppe, 2001] Zbigniew Smoreda and Christian Licoppe. La téléphonie résidentielle des foyers : réseaux de sociabilité et cycle de vie. Bordeaux.
- [Souchon Foll, 2008] Laëtitia Souchon Foll. *TIC et Énergétique : Techniques d'estimation de consommation sur la hauteur, la structure et l'évolution de l'impact des TIC en France*. Institut National des Télécommunications de Paris. Thèse de doctorat. 2008. 172p.
- [Souchon Foll et al, 2007] Laëtitia Souchon Foll, Bernard Aebischer, Jacques Rofurier, et al. Infrastructure of the information society and its energy demand. 4 - 9 juin 2007, La Colle sur Loup, France. International Consulting on Energy, pp. 1215.
- [Steele, 2011] Rob Steele. Nous sommes responsables de nos actions. *ISO Focus+*, vol. 2, no. 3, pp. 8-9.
- [Stern, 2007] Nicholas Stern. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, 2007, 712.
- [Su et al, 2011] Shiliang Su, Dan Li, Qi Zhang, et al. Temporal trend and source apportionment of water pollution in different functional zones of Qiantang River, China. *Water research*, vol. 45, no. 4, pp. 1781-1795.
- [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010] Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Base de données Ecoinvent. [Computer Program].
- [Taeko, 2007] Aoe Taeko. Eco-efficiency and ecodesign in electrical and electronic products. *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, no. 15, pp. 1406-1414.
- [Thoben et al, 2001] K. D. Thoben, J. Eschenächer and H. Jagdev. Extended products: Evolving traditional product concepts. 27-29 juin 2001, Bremen. Centre for Concurrent Enterprising.
- [Tukker et al, 2001] Arnold Tukker, Harrie Buijst, Laurant van Oers, et al. *Risk to health and the environment related to the use of Lead in Products* 2001. 1-102.
- [Tukker et Tischner, 2006] Arnold Tukker and Ursula Tischner. *New business for Old Europe: Product-Service Development, Competitiveness and Sustainability*, Greenleaf Publishing, Sheffield (Royaume Uni), 2006, 72-98.
- [Tyteca, 2002] Daniel Tyteca. Problématique des indicateurs environnementaux et de développement durable. 8-11 octobre 2002, Liège.
- [Umeda et al, 2000] Y. Umeda, A. Nonomura and T. Tomiyama. Study on life-cycle design for the post mass production paradigm. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 14, no. 2, pp. 149-161.
- [Union Européenne, 2011] Union Européenne. *EUR-Lex: L'accès au droit de l'Union Européenne*. Disponible sur: <http://eur-lex.europa.eu/fr/index.htm> Consulté le: 15 novembre 2011.
- [Vadev, 2006] Vadev. Vadev® Distant meter reading system Version 1.0.1l. [Computer Program].

- [Van Grembergen et Amelinckx, 2002] W. Van Grembergen and I. Amelinckx. Measuring and managing e-business projects through the balanced scorecard. , pp. 9 pp.
- [Vassy, 1968] Arlette Vassy. Symposium sur l'ozone atmosphérique. 2-7 septembre 1968, Monaco. Centre National de la Recherche Scientifique, , pp. 307.
- [Vernadat, 1996] François B. Vernadat. *Enterprise modeling and integration: principles and applications*, Chapman & Hall, England, 1996, 513.
- [Victor, 2007] Jean-Claude Victor. *Mise en place du management Qualité, Sécurité, Environnement des systèmes et des produits*. 2007, 1-11.
- [Villot et al, 2011] Jonathan Villot, Natacha Gondran and Valérie Laforest. Labels de la construction: quelle contribution possible au facteur 4 ? *Développement Durable et territoires*, vol. Vol. 2, no. n° 1, pp. 8834.
- [Wackernagel, 1994] Mathis Wackernagel. . *Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability*. 1994.
- [Wati et Koo, 2011] Yulia Wati and Chulmo Koo. An introduction to the Green IT Balanced Scorecard as a Strategic IT Management System. 4-7 janvier, Hawaï. IEEE conferences, , pp. 1.
- [Wiedmann et Minx, 2007] Thomas Wiedmann and Jan Minx. *A definition of carbon Footprint*, ISA Research & Consulting, 2007. 3-11.
- [Wiedmann et al, 2006] Thomas Wiedmann, Jan Minx, John Barrett, et al. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input–output analysis. *Ecological Economics*, vol. 56, no. 1, pp. 28-48.
- [Wood, 2003] Christopher Wood. *Environmental Impact Assessment: A comparative review*, 2ème édition, 2003, 409p.
- [World Meteorological Organisation, 1992] World Meteorological Organisation. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991 Global Ozone Research and Monitoring Project*, Genève, 1992. 1-25.
- [World Water Assessment Program, 2009] World Water Assessment Program. *The United Nations World Water Development: Report 3: Water in a changing world*, Water Footprint Network, 2009.
- [WWF, 2011] WWF. *Guide pour un système d'information éco-responsable*, Paris, 2011. 1-24.
- [Zhu et al, 1997] W. Zhu, M. Kennedy, E. W. B. de Leer, et al. Distribution and modelling of rare earth elements in Chinese river sediments. *Science of The Total Environment*, vol. 204, no. 3, pp. 233-243.

Annexes

<i>Annexe 1: Liste des rapports de développement durable étudiés pour connaître la terminologie employée par les entreprises [Moreau et Al., 2009].....</i>	<i>301</i>
<i>Annexe 2 : Principales caractéristiques des labels concernant les équipements informatiques (ou des préoccupations qui leurs sont proches) [Bohas, 2011]</i>	<i>303</i>
<i>Annexe 3 : Illustration d'un fichier d'inventaire</i>	<i>305</i>
<i>Annexe 4 : Exemple de questionnaire à destination des responsables informatiques</i>	<i>307</i>
<i>Annexe 5: Onglets constituant le fichier Excel (captures d'écrans)</i>	<i>311</i>
<i>Annexe 6 : Résultats du tableau de bord environnemental pour l'ensemble des indicateurs environnementaux pour l'application Casino IT</i>	<i>315</i>
<i>Annexe 7: Fiche de suivi pour le recueil des données d'utilisation en parallèle de l'utilisation des équipements</i>	<i>327</i>
<i>Annexe 8: Incertitude relative à la taille de l'échantillon par rapport à la population mère [Jourdon, 2009] ..</i>	<i>329</i>
<i>Annexe 9 : Description de quelques méthodes de caractérisation des impacts</i>	<i>331</i>

Annexe 1: Liste des rapports de développement durable étudiés pour connaître la terminologie employée par les entreprises [Moreau et Al., 2009]

Société	Titre	Sous-titre	Année
ACCOR	Rapport Annuel	<i>L'esprit sourire</i>	2007
Air France KLM	Rapport de Développement Durable		2004/05
Air France KLM	Rapport de Développement Durable		2007/08
Atac	Une entreprise citoyenne. Notre rapport 2007 de développement durable		2007
Auchan	Auchan entreprise responsable 2007/2008		2008
BNP Paribas	Responsabilité sur la responsabilité sociale et environnementale 2007		2007
Groupe Carrefour	Rapport de Développement Durable	<i>Groupe Carrefour créateur d'échanges responsables</i>	2007
Casino	Rapport Développement Durable		2007
EDF	Rapport annuel	<i>Développement Durable</i>	2004
EDF	Rapport Développement Durable		2006
Egis	Rapport du Développement Durable	<i>Construisons ensemble un avenir durable</i>	2008
Fortis	Rapport de Développement Durable	<i>Une communauté inspirée</i>	2004
Fortis	Rapport de Développement Durable	<i>La croissance durable en point de mire</i>	2005
Fortis	Rapport de Développement Durable	<i>Jalons d'une croissance durable</i>	2006
Fortis	Rapport de Développement Durable	<i>Un nouveau pas vers la croissance durable</i>	2007
GDF	Rapport de Développement Durable		2007
Lafarge	Rapport de Développement Durable	<i>Construire notre valeur sur la durée</i>	2002
Lafarge	Rapport de Développement Durable	<i>Lafarge s'engage à traduire ses valeurs dans ses actes</i>	2003
Lafarge	Rapport de Développement Durable		2004
Lafarge	Rapport de Développement Durable		2005
Lafarge	Rapport de Développement Durable		2006
Lafarge	Rapport de Développement Durable	<i>Accompagner la croissance Poursuivre le dialogue Développer des solutions.</i>	2007
Neuf cegetel	Rapport de Développement Durable		2007
ONF	Rapport de Développement Durable		2007
PSA Peugeot-Citroën	Rapport d'activité et de Développement Durable		2007
PSA Peugeot-Citroën	<i>2008 en bref</i>		2008
Renault	Rapport annuel		2007
Rexel	Rapport de Développement Durable		2006
Sanofi Avantis	Rapport Développement Durable		2007
Sodexho	Rapport annuel	<i>Agir en entreprise citoyenne</i>	2006
Technip	Rapport de Développement Durable		2003
Total	<i>Les chemins du Développement Durable</i>		2003
Vivendi Universal	Rapport Développement Durable	<i>Notre responsabilité sociale, économique et environnementale</i>	2003
Vivendi Universal	Rapport Développement Durable	<i>Notre responsabilité sociale, économique et environnementale 2004-2005</i>	2005
Vivendi Universal	Rapport Développement Durable		2007
Vivendi Universal	Rapport Développement Durable		2008

Annexe 2 : Principales caractéristiques des labels concernant les équipements informatiques (ou des préoccupations qui leurs sont proches) [Bohas, 2011]

Type	Intitulé du label	Description	Disponibilité	Avantages	Limites	Thème	Domaine	Sous-Domaine
Type I	ECO-LABEL EUROPEEN	Créé par la Commission européenne en 1992 Analyse du cycle de vie du matériel Demande effectuée par les entreprises puis validation auprès de l'AFNOR	Base de données en ligne	Base de données accessible dans toutes les langues de l'UE Critères complets Label officiel en France	Pas de comparaison possible Peu de données disponibles sur les équipements informatiques (Non spécifique à l'informatique) Critères de recherche confus	Global	Produits	ACV
Type I	MARQUE NF ENVIRONNEMENT	Existe depuis 1991 et est délivrée par l'AFNOR Certification écologique officielle en France Distingue les produits dont l'impact sur l'environnement est réduit à performance équivalente Demande effectuée par les entreprises puis délivrée par l'AFNOR après audit et contrôles continus	Sur le site Internet, listes téléchargeables des produits labellisés	Label officiel en France Visé par le Ministère (MEDDTM), l'ADEME et l'AFNOR	Non spécifique aux équipements informatiques Beaucoup de catégories de produits prises en compte Site Internet pas toujours simple d'usage	Environnement	Environnement - Généralités	Impact produits
Type I	TCO	Créé par le syndicat des professionnels de bureau en 1995 (surtout pour écrans) Basé sur critères d'ergonomie, d'émission de champs électromagnétiques, de conso d'énergie... Demande effectuée par les entreprises puis TCO fait effectuer des tests par labos indépendants	Base de données en ligne	Etendu à plusieurs catégories de produits Critères stricts Base de données explicite pour les anglophones	Peu de constructeurs d'ordinateurs dont les produits sont labellisés	Global	Produits	ACV
Type I	BLUE ANGEL	Créé par le ministère de l'intérieur allemand puis approuvé par celui de l'Ecologie. 1977, + vieille certification au monde Critères très larges (ACV) Plusieurs catégories Demande par les entreprises	Base de données en ligne	Recherche facile dans la base de données	Base de données non exhaustive sur le matériel informatique Pas de comparaison possible	Global	Produits	ACV
Type I	GREENGUARD	Programme de certification créé par l'ONG Green Guard Environment Institute (GEI) 2001 Prend en compte la santé public et la qualité de vie 3 programmes de certification Demande par les entreprises puis questionnaire et tests	Base de données en ligne	Tests effectués par des laboratoires indépendants Durée limitée de la certification nécessitant une mise à jour des entreprises pour conserver le label	Label peu répandu Peu de constructeurs certifiés	Environnement	Environnement - Air	qualité air
Type I	CHOIX ENVIRONNEMENTAL	Programme canadien 1998 Symbole Eco-Logo Identifie produits respectueux de l'environnement Demande par les entreprises puis questionnaires et validation par experts + audits	Base de données en ligne	20 ans d'existence, 300 catégories de produits Tests et audits réalisés par des laboratoires indépendants Possibilité de créer une liste d'achat depuis le site Internet	Sociétés françaises non représentées dans la base de données	Environnement	Environnement - Généralités	Impact produits

Type I	NORDIC SWAN (CYGNE BLANC)	Créé par le conseil des ministres des pays nordiques 1989 Certifie P&S avec impact réduit sur l'environnement (ACV) Critères propres à chaque P ou S Demande par les entreprises + validation par laboratoires indépendants Durée 3 ans + visites de contrôle régulières	Base de données en ligne	Réunion de différents pays Recours à des laboratoires indépendants pour l'attribution Critères restrictifs	Certification méconnue en dehors des 5 pays	Global	Produits	ACV
Type II	ENERGY STAR	Créé par l'EPA (Environmental protection Agency) _ 1992 Garantit un matériel économe en veille et en fonctionnement Auto-déclaration	Base de données en ligne	Comparaison des produits Conseils avant et après achat Exigences en progression	Pas d'alternatives possibles dans les comparaisons	Energie	Energie - consommation	Eco-conception
Type II	80 PLUS	Programme créé par sociétés et instituts de recherches US en 2004 Mesure efficacité des alimentations électriques 3 niveaux de certifications (80% est la base)	Liste des constructeurs adhérant au programme	Calculateur en ligne permettant d'évaluer les économies	Peu d'informations disponibles	Energie	Energie - consommation	Eco-conception
Type II	EPEAT	Créé en 2006 par le Green Electronic Council. Soutenu par l'EPA Intègre les critères Energy Star Outil d'évaluation environnementale des produits permettant aux entreprises d'évaluer et comparer les matériels informatiques Mise en œuvre concrète du standard IEEE 1680-2006 51 critères, 8 catégories Auto déclaration et vérifications régulières	Base de données en ligne, Simplifie l'achat de matériel	Label le plus complet à ce jour en matière de Green IT Site complet pour guider l'utilisateur dans sa démarche d'achat Calculateur d'énergie en ligne pour évaluer les économies d'énergie	Très répandu aux USA mais encore confidentiel en France et en Europe	Global	Produits	ACV
Programme environnemental	China Standard Certification Center (Ancien CEPC - China Certification Center for Energy Conservation Products)	Programme chinois 1992 Promeut auprès des fabricants la conception de matériels efficaces d'un point de vue énergétique Adhésion volontaire		Promotion de l'efficacité énergétique auprès des constructeurs	Site officiel disponible en chinois uniquement	Energie	Energie - consommation	Eco-conception
Programme environnemental	PC3R	Programme à l'origine d'une association japonaise 2004 Promeut auprès des constructeurs et revendeurs les 3R du PC : Reduce, Re-use, Recycle (ACV) Participation volontaire	Liste des constructeurs et revendeurs adhérents au programme disponible en ligne	L'association propose le recyclage des ordinateurs	Programme méconnu en dehors du Japon	Global	Produits	ACV

ANNEXES

Annexe 3 : Illustration d'un fichier d'inventaire

id	poste	ip	reseau	noserie	modele	mac	adresse	station	vitesse	date liv	garantie
521			dhcp		Aucun			PC		00/01/1900	
538		193.49.165.112	3 Com Etherlink XL 10/100 PCI T		Compaq Deskpro EP Series		00:01:02:1B:6A:C2	PC	466/66MHz	00/01/1900	
539		193.49.165.111	Broadcom NetXtreme Gigabit	CNU5160K61	ordinateur portable hp compaq nc8000 PF196AA#ABA	001279C4BB9F		PCP	Pentium M 1,7 GHz	03/06/2005	
636		193.49.165.237	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C5290W/WH	Ordinateur HP Compaq dc5100 format compact (Pw188ET)	00-13-21-F7-44-ED		PC	3,00 GHz	02/08/2005	garantie 3 ans HP
637		193.49.165.235	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C5290W/WG	Ordinateur HP Compaq dc5100 format compact (Pw188ET)	00:13:21:F5:95:6C		PC	3,00 GHz	02/08/2005	HP 3 ans sur site J+1
638		193.49.165.128		C2C5360J00	Ordinateur HP Compaq dc5100 SFF format compact (Pw188ET)	00-14-C2-0E-C2-25		PC	3,00 GHz	03/08/2005	
639		193.49.165.125	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C5291V4X	Ordinateur HP Compaq dc5100 format compact (Pw188ET)	00:13:21:D5:8C:68		PC	3,00 GHz minimum	03/08/2005	3 ans sur site par HP
728		193.49.165.63	Intel(R) PRO/100VM network con	(2819054) 0151013422	Vsio VGN-TX1XP PCG-4F1M	00014A3894F4		PCP	1,20 GHz 753 400 MHz FSB	28/11/2005	extension 3 ans
815		193.49.165.44		C2C5481948	HP workstation Xw3300 quadri-cores			SERVEUR	2,4GHz- 2 AMD OPTERON double	12/12/2005	3 ans sur site
817		193.49.165.129	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C5480PN5	dc5100 SFF p/n: PM215AV	00-15-60-5C-69-E7		PCP	3,00 GHz	09/12/2005	garantie 3 ans
853		193.49.175.252	3C905C-TX 3Com Etherlink XL	8937CVN23381	Deskpro EP series	inconnue		PC	466 Mo	00/01/1900	
921		193.49.165.53	Broadcom NetXtreme	CNU6020TV	Compaq nw8240 PY442ET#ABF	00-14-C2-D5-TD50		PCP	2,13 GHz M770	12/06/2006	extension de garantie
937		193.49.165.117	3Com 3C920	CN-OC0330-12361-310-8015	DELL Precision M50 PP01X	00:0B:DB:16:84:56		PCP	2,00 GHz	00/01/1900	3 ans de base
942		193.49.165.187	Broadcom NetXtreme 57xx Gigabi	8WK3C2J (19382924251)	Optiplex GX620 DCSM	00-13-T2-A4-00-5D		PC	3,4 GHz	10/07/2006	3 ans J+1 site internal
944		193.49.165.88		C2C62633GL	DC7600SFF PU700AV			PC	3,4 GHz minimum	17/07/2006	GARANTIE STAND
953		193.49.165.89	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C6301JYV	HP compaq DC5100SFF p/n: PM215AV	00-17-A4-1F-97-87		PC	3,4 GHz-800Mhz-2Mo cache	03/06/2006	garantie 3 ans retour
954		193.49.165.149		sucon	DAF carte mere SUON	00:01:02:1B:63:AD		PC	800 MHz	00/01/1900	
956		193.49.165.45	HP NC7761 Gigabit Server Adapt	GB863FAFJ	HP serveur tour proliant ML350G4P	00-12-79-92-11-66		SERVEUR	3 GHZ-2 MO de cache-surcoudt du passage du processeur 3.2Gh	10/08/2006	ensemble garanti 3 an
1061		193.49.165.57	ethernet mini PCI 10/100 3Com	TW22701915	HP omnibook 500	00:04:76:50:98:40		PCP	352 MHz	00/01/1900	
1077		193.49.165.159		FR92428456	D76 XX	00:50:04:43:C8:75		PC	400mhz	00/01/1900	
1088		193.49.165.83	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	CNU62919D3	Compaq nc8430 p/n:ES589EA#ABF	00:15:60:CB:C8:F6		PCP	2 GHz T2400	20/11/2006	extension 3 ans offer
1098		193.49.165.229	Broadcom NetXtreme 57xx Gigabit Controlle	CN-U0F242-48643-6AH-2385	Dell Precision M65 PP04X	00:15:C5:C0:44:39		PCP	intel core 2 duo T7600 (2,33 MHz 4MB L2 cache 377MMHz FSB)	24/11/2006	
1111		193.49.165.42	oui	TN64440287	serveur SUN FIRE V240 (N32-XX42C1808B-E	00:14:4F:5D:B6:EA		SERVEUR	1,5 GHz	22/11/2006	Sun Fire V240. Misc
1141		193.49.165.94	3com etherlink xl 10/10		DAF	00:04:76:8E:01:1B		PC	700MHz	00/01/1900	
1151		193.49.165.100	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C6435GCV	xw 4400 HP Workstation p/n ET115AV	00:19:BB:53:1F:D3		PC	2,67 GHz processeur Core2 Duo E6700	20/12/2006	extension de garantie
1161		193.49.165.172	etherlink3 isapnp 3com		veetra vl	00:10:4B:53:1C:93		PC	500MHz	00/01/1900	
1172		193.49.165.56	Accton Series Fast	NULL	Omnibook XE3	00:D0:53:31:2E:FF		PCP	800 MHz	00/01/1900	NULL
1193		193.49.165.136	Xircou creditcard ether. 10/100		Armado E500	00:10:A4:F56:3F:24		PCP	400 Mhz	00/01/1900	
1201		193.49.165	Intel PRO/100 VE Network Conne	Interzed 022550	Interzed	00-E0-18-A4-36-6B		PC	2,66 GHz	00/01/1900	
1209		193.49.165.213	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	CNU72327F3	NC 8430 RU629ET#ABF	00-176A4-E7-79-BB		PCP	1,83 GHZ	21/06/2007	3 ans
1210		193.49.165.210	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	CNU72327T0	NC 8430	00-17-A4-E7-59-40		PCP	1,83 GHZ	21/06/2007	3 ans
1230		193.49.165.177	BroadCom NetXtreme Gigabit Eth	HUB72515XL	portable HP NC 8430 256MB RCTO p/n EM741AV	00-17-A4-E5-48-42		PCP	T5500 2.0 GHz 4 MB L2 cache 667 MHz	29/06/2007	3 ans sur site enlève
1231		193.49.165.199	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C72528G3	DC 5700 mini-tour	00:1A:4B:49:8F:11		PC	1,80 GHz	29/06/2007	3 ans sur site interve
1232		193.49.165.197	BroadCom NetXtreme Gigabit Eth	C2C72528G8	DC 5700 mini-tour EW287AV	00:1B:78:52:D7:6B		PC	1,80 GHz	29/06/2007	3 ans sur site interve
1233		193.49.165.211	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	C2C7260RGF	Station de travail HP Xw4400 workstation	00-1B-78-A6-A3-47		PC	E6700 2.67 GHz	02/07/2007	garantie 3 ans sur sit
1266		193.49.165.221	BroadCom NetXtreme Gigabit Eth	HUB7320JY9	portable HP NC8430 256MB RCTO p/n EM741AV	00-1A-4B-5B-A2-39		PCP	T5500 1,66 MHz	24/08/2007	3 ans sur site enlève
1267		193.49.165.209	BroadCom NetXtreme Gigabit Eth	HUB7320Jw/W	portable HP NC 8430 256MB RCTO p/n EM741AV	00-1A-4B-5C-2D-D6		PCP	T5500 1,66 MHz	30/08/2007	3 ans enlèvement et r
1287		193.49.165.46	HP NC373i Multifunction Gigabi	CZJ7320003	HP serveur tour proliant ML350G5	00-1C-CA-45-74-52		SERVEUR	5130 bi coeurs 2,00 GHz 4 Mo de cahe BUS 1333Mhz	30/08/2007	garantie 3 ans sur sit
1305		193.49.165.217	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	cac7325gnr	PC DC5700 mini-tour	00-1B-78-82-86-4B		PC	1,76 GHz	24/08/2007	3 ans sur site interve
1306		193.49.165.214	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	cac7325gpp	PC DC5700 mini-tour	00-1B-78-82-85-4E		PC	1,80 GHz	24/08/2007	3 ans sur site interve
1307		193.49.165.215	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	cac7325gpm	PC DC5700 mini-tour	00-1B-78-82-85-46		PC	1,78 GHz	24/08/2007	3 ans sur site interve
1308		193.49.165.216	Broadcom NetXtreme Gigabit Eth	cac7325gps	PC DC5700 mini-tour	00-1B-78-7F-2F-22		PC	1,80 GHz	24/08/2007	3 ans sur site interve
1483		193.49.165.218	Broadcom NetXtreme Gigabit Ethe	C2C7460GY6	Xw4400 workstation	00:1C:C4:87:4E:95		PC	E6700 2.67 GHz	21/11/2007	3 ans sur site
1519		193.49.165.33	Mirwell Yukon 88E8055 PCI-E Gb	28278150 5001775	VsioT231MWN-Pr PCG-4N2M	00-1A-80-D2-57-08		PCP	1,20 GHz U7600	NULL	3 ans 18/04/2011
1537								PC	q6600 2.4ghz, 1066MHz, 4Mo	04/06/2008	3ans j+1 sur site
1538		193.49.165.233	Intel 82566DM-2Gigabit Network	33364159327	Optiplex 755 MT	00-1E-4F-EC-1F-1B		PC	q6600 2.4ghz, 1066MHz, 4Mo	04/06/2008	3ans j+1 sur site
1551		193.49.165.232	Intel 82566DM Gigabit Connecti	C2C8183IKD	DC5800aM	00-1E-0B-36-3B-1D		PC	E8200 2.66GHz 6Mo, 1333MHz	04/06/2008	3ans j+1 sur site
1615		193.49.165.48	3Com EtherLink XL 10/100 PCI	2003149		00-04-75-BE-23-F2		PC	2,4 GHz	NULL	
1616		193.49.165.51	Rhine III VT6105	2003184		00-0c-6c-08-85-51		PC	2,4 GHz	NULL	
1648		193.49.165.188	Broadcom NetXtreme 57xx gigabi	82JFY3J	Precision Workstation N-Series T5400	00-1E-4F-E5-6E-51		PC	E5420 (2.5GHz, 1333Mhz, 2x6Mb, Quad Core)	25/08/2008	3 ans sur site J+1
1649		193.49.165.82	Broadcom NetXtreme 57xx gigabi	72JKY3J	Precision Workstation N-Series T5400	00-1E-4F-F8-F6-CE		PC	E5420 (2.5GHz, 1333Mhz, 2x6Mb, Quad Core)	25/08/2008	3 ans sur site J+1
1650		193.49.165.87	Broadcom NetXtreme 57xx gigabi	C2JFY3J	Precision Workstation T 5400 N-Series T5400	00-21-9B-2D-FE-87		PCP	E5420 (2.5GHz, 1333Mhz, 2x6Mb, Quad Core)	25/08/2008	3 ans sur site J+1
1694		193.49.165.230	Broadcom NetXtreme 57xx Gigabi	D3MP204J	Precision M4300	00-21-70-7F-6D-D8		PCP	T9300 2.5 GHz, 6MB,	17/10/2008	3 ans J+1 sur site
1695		193.49.165.228	Broadcom NetXtreme 57xx Gigabi	DGLP204J	Precision M4300 PP04X	00-21-70-7F-6E-BF		PCP	T9300 2.5 GHz, 6MB,	17/10/2008	3 ans J+1 sur site
1696		193.49.165.226	Broadcom NetXtreme 57xx Gigabi	4MP204J	Precision M4300 PP04X	00-21-70-7F-6F-18		PCP	T9300 2.5 GHz, 6MB,	17/10/2008	3 ans J+1 sur site
1697		193.49.165.227	Broadcom NetXtreme 57xx Gigabi	1MP204J	Precision M4300 PP04	00-21-70-7F-6B-A6		PCP	T9300 2.5 GHz, 6MB,	17/10/2008	3 ans J+1 sur site

Annexe 4 : Exemple de questionnaire à destination des responsables informatiques

Questionnaire à destination des utilisateurs des équipements faisant l'objet de mesures

Informations générales :

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Etablissement :2. Equipement :3. Nom :4. Equipe : |
|---|

Informations relatives à l'utilisation de l'équipement ayant fait l'objet de mesures :

5. Quel est traditionnellement votre rythme d'utilisation de l'ordinateur ? (nb h/jour ; nb j/semaine ; ...)
6. Quel a été votre rythme d'utilisation de l'ordinateur durant la semaine ? (Y-a-t-il eu des jours où vous n'avez pas été là ? en déplacement par exemple)
7. Que faites-vous quand vous quittez votre poste le midi ?
8. Que faites-vous quand vous quittez votre poste le soir ?
9. Que faites-vous quand vous quittez votre poste le week-end ?
10. Quel type d'activité faites-vous sur votre poste ?
11. Votre ordinateur se met-il en veille automatiquement ?
Au bout de combien de temps ?
Est-ce-vous qui avez paramétré cette mise en veille ?

Informations relatives aux pratiques :

12. Avez-vous des consignes à respecter concernant l'utilisation de votre (vos) installation(s) informatique(s), et en particulier, ses consommations d'électricité et ses impacts sur l'environnement ?

- OUI
- NON (si la réponse est non, passez à la partie 20)
- Ne sais pas
- a. Qui vous a transmis ces consignes ?
 - Services généraux
 - Services informatiques :
 - de l'établissement
 - du service
 - Responsable d'établissement
 - Autres (précisez)
- b. Ces consignes sont-elles formalisées dans un document qui vous a été transmis ?
 - OUI
 - NON
 - Ne sais pas
- c. Existe-t-il des consignes informelles?
 - OUI
 - NON
 - Ne sais pas
- d. De quelle nature sont ces consignes ?
 - Obligations
 - Indications
 - Recommandations
 - Autres (précisez) :
- e. Ces consignes peuvent-elles nous être transmises ?
 - OUI
 - NON
 - Ne sais pas
- f. Quelques exemples de consignes :
 -
 -
 -

13. Ces consignes sont-elles très précises ?

- OUI
- NON
- Ne sais pas

14. Ces consignes sont-elles bien respectées ?

- OUI
- NON

- Ne sais pas
15. Vous semblent-elles adaptées à votre situation ?
- OUI
 - NON
 - Ne sais pas
16. Y a-t-il des risques à ne pas respecter ces consignes ? (erreur du système, vieillissement prématuré du matériel, surconsommation, ...)
- OUI
 - NON
 - Ne sais pas
17. Connaissez-vous des initiatives ou des pratiques menées au sein de votre établissement et qui pourraient être appliquées comme consignes par votre établissement et les établissements similaires afin de réduire les consommations énergétiques et impacts environnementaux liés à l'utilisation de l'informatique ?
- OUI
 - NON
 - Ne sais pas

Lesquelles :

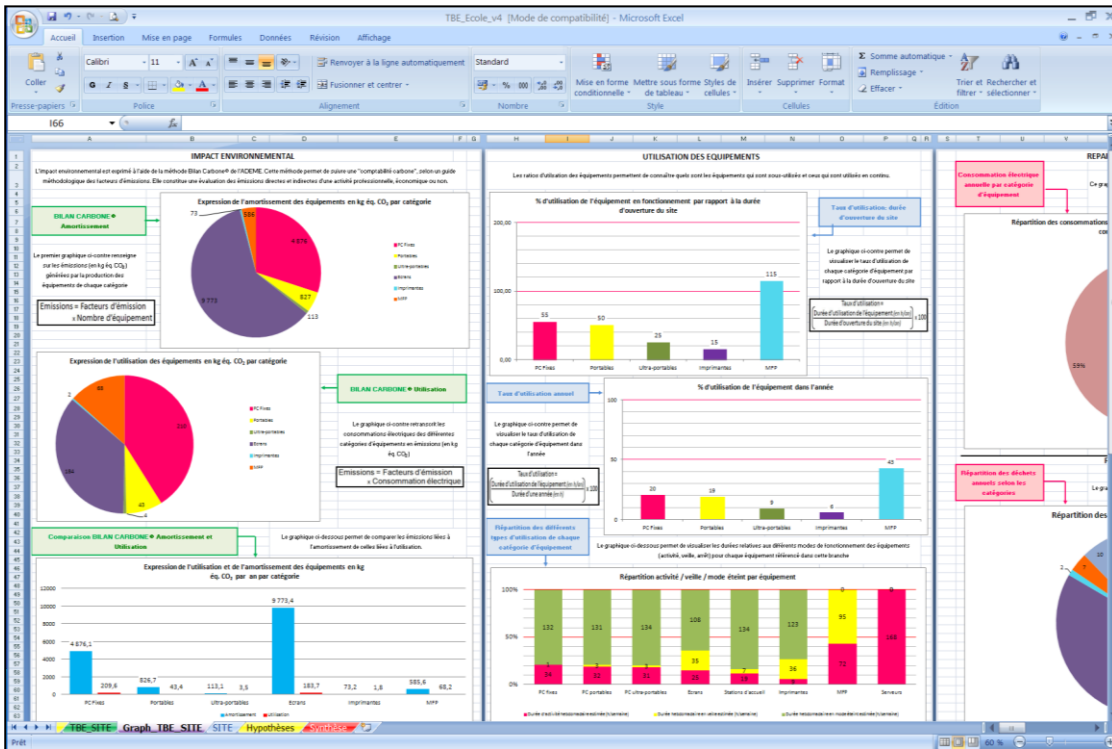
-
-
-

Annexe 5: Onglets constituants le fichier Excel (captures d'écrans)

Onglet Description du site :

The screenshot displays a Microsoft Excel spreadsheet titled 'TBE_Ecole_v4 (Mode de compatibilité)'. The spreadsheet is organized into columns labeled A through S. The columns include: 'Catégorie de matériel', 'Modèles', 'Puissance maximale nominale (W)', 'Quantité', 'Puissance maximale totale (W)', 'Puissance nominale de l'équipement', 'Puissance nominale de l'ensemble des équipements', 'Durée d'activité hebdomadaire estimée (heures)', 'Estimation de la consommation en énergie (kWh)', 'Puissance nominale en veille, mesurée sur un poste (W)', 'Puissance nominale en veille, mesurée pour l'ensemble des postes (W)', 'Ratio des puissances en veille et en activité', 'Durée hebdomadaire de consommation en veille (heures)', 'Estimation de la consommation en énergie (kWh)', 'Ratio temps en veille / temps d'activité', 'Puissance nominale en mode veille, mesurée sur un poste (W)', 'Puissance nominale en mode veille, mesurée pour l'ensemble des postes (W)', 'Durée hebdomadaire estimée (heures)', and 'Estimation de la consommation en mode veille (kWh)'. The rows list various equipment types such as 'PC fixes', 'PC portables', 'PC ultraportables', 'Ecrans', 'Imprimantes', 'MPP', and 'Serveurs', with specific models and their associated energy consumption data.

Onglet Graphiques



Onglet TBE :

	Unités	Quantité	Consommation électrique		Statuts d'utilisation		Déchets amenés		Apports/consommation			Changement climatique (PFG titre)						
			Consommation électrique totale	Ratio de consommation (%) de consommation de chaque équipement par rapport à la consommation totale (après réajustement de site)	Ratio de consommation (%) de la consommation de chaque catégorie d'équipement par rapport à la consommation totale du site	% d'utilisation de l'équipement dans l'année	% d'utilisation de l'équipement en fonctionnement par rapport à la date d'ouverture du site	Poids des déchets (kg/t)	Facteurs d'émission	Emissions (kg C eq)	Emissions (kg CO2 eq)	Emissions (kg CO2 eq)	Emissions (kg CO2 eq)	Emissions (kg CO2 eq)	Facteurs de conversion	Emissions (kg CO2 eq)	Facteurs de conversion (kg CO2 eq)	kg CO2 eq
Surfaces	m ²	307																
PCFert	kg	294,24	0,0	0,0	20,4	54,8	45,7	296	102,2	424,4	602	512	200	270	1027,8	1,26	228,9	
Thermal	kg	19,34	0,0	0,0	0,7	10,4	5,7	20,8	105,4	602	107	41,2	240	632,7	1,26	41,3		
Électrique	kg	292,52	0,0	0,0	19,2	39,2	52,0	275,2	972,0	602	500	161,2	90,0	998,2	1,26	20,5		

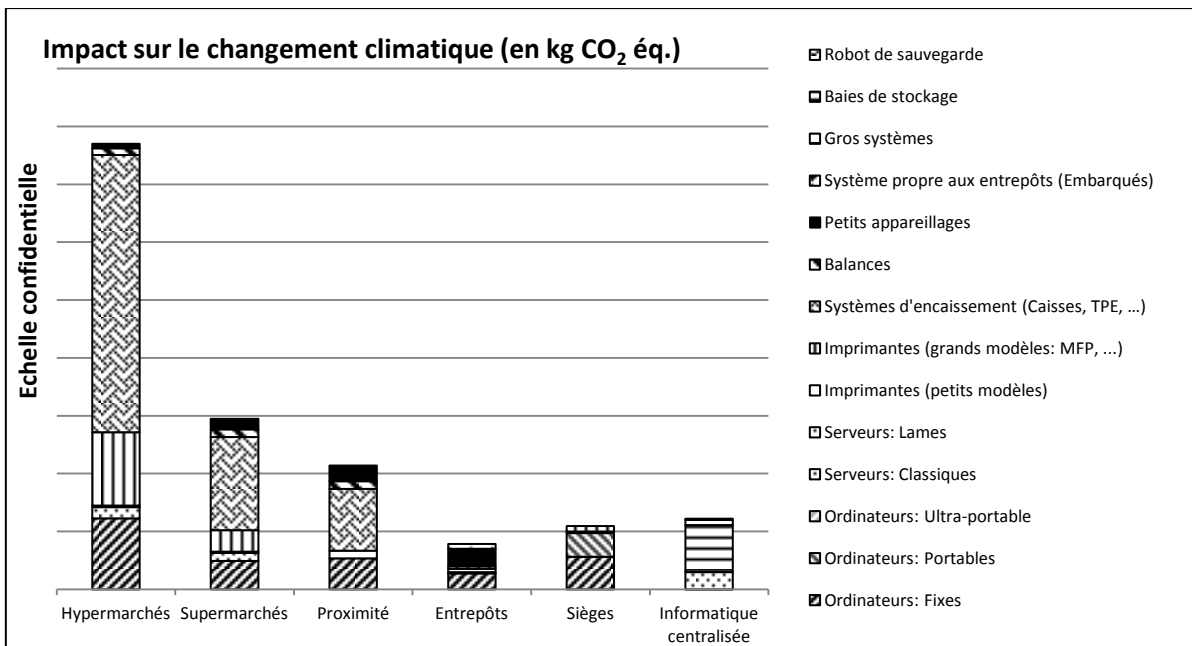
Onglet Synthèse

The 'Onglet Synthèse' provides a visual summary of the environmental impact and energy consumption data. It features three main sections:

- IMPACT ENVIRONNEMENTAL:** Includes bar charts showing CO2 emissions and other environmental indicators across different categories.
- CONSOUMATIONS ELECTRIQUES:** Uses pie charts to show the distribution of electricity consumption across various equipment types.
- EQUIPEMENTS COMPARABLES:** Contains multiple pie charts comparing the energy efficiency and CO2 emissions of different equipment models.

Annexe 6 : Résultats du tableau de bord environnemental pour l'ensemble des indicateurs environnementaux pour l'application Casino IT

Expression de l'impact sur le changement climatique



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur le changement climatique. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

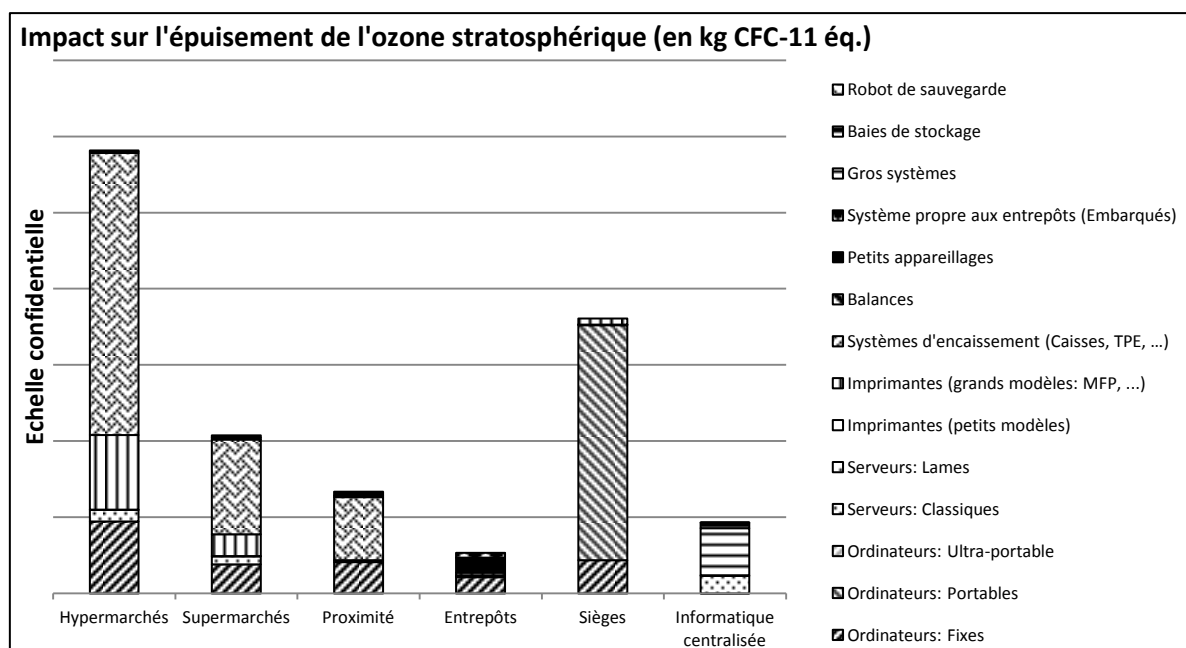
Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Expression de l'impact sur l'épuisement de l'ozone stratosphérique



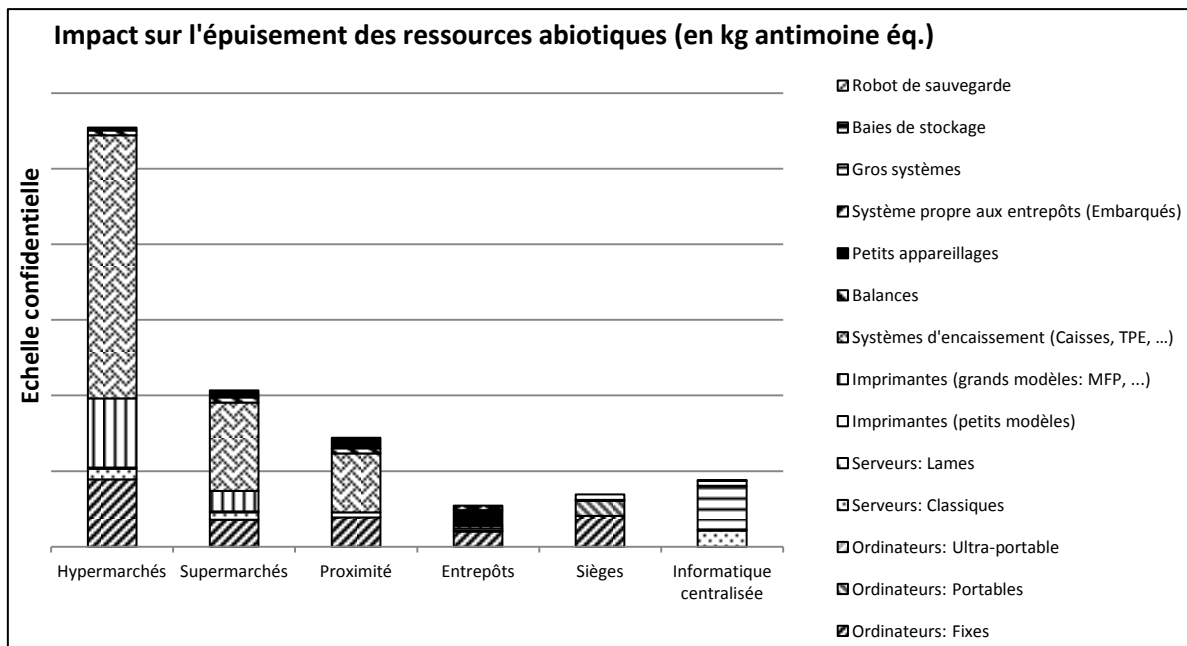
Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'épuisement de l'ozone stratosphérique. La deuxième catégorie d'établissements ayant le plus grand impact sur l'épuisement de l'ozone stratosphérique sont les bâtiments du siège avec près de 80% de l'impact lié aux ordinateurs portables.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Expression de l'impact sur l'épuisement des ressources abiotiques



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'épuisement des ressources abiotiques. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

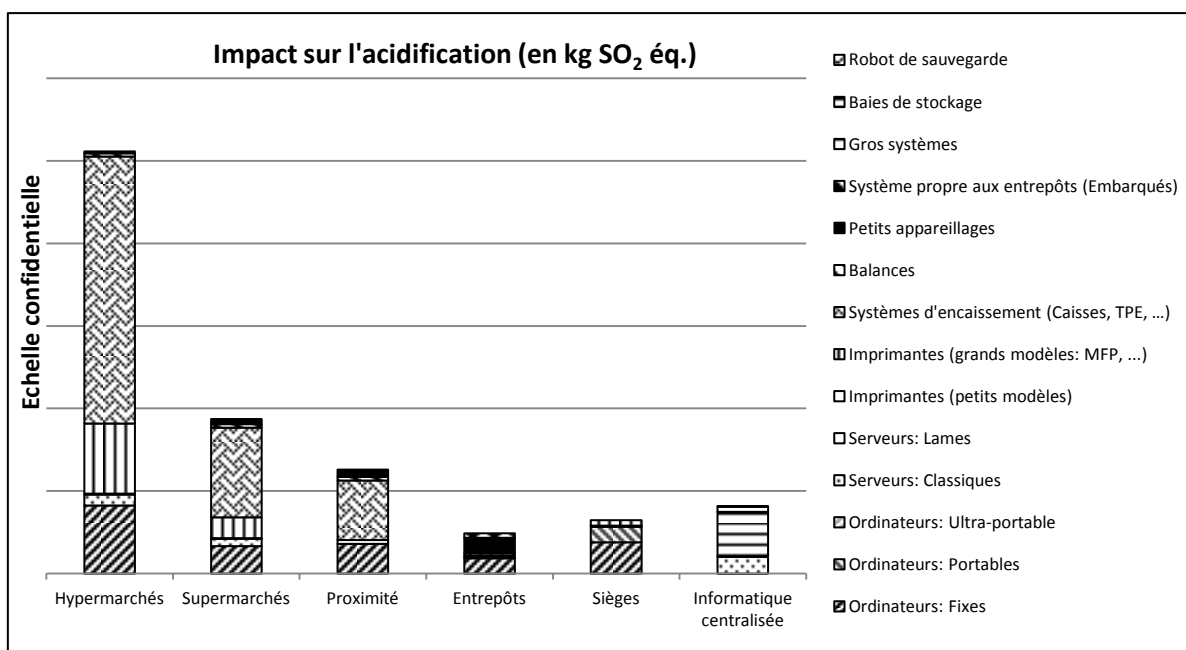
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur l'épuisement des ressources abiotiques des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur l'acidification



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'acidification. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

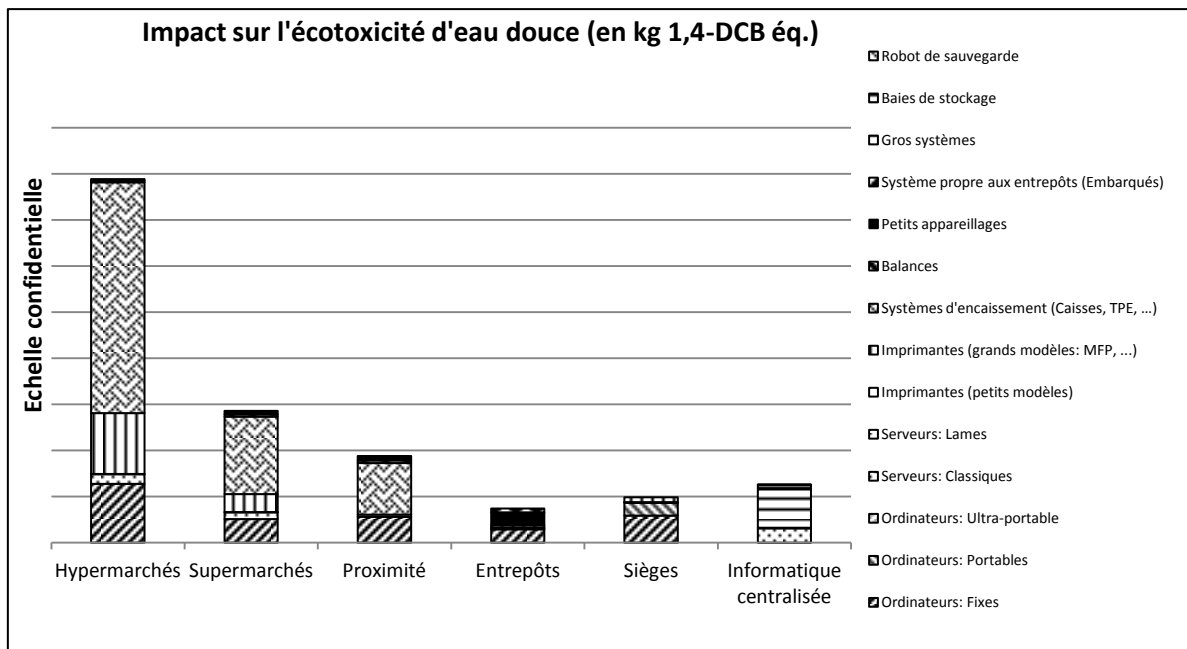
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur l'acidification des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur l'écotoxicité d'eau douce



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'écotoxicité d'eau douce. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

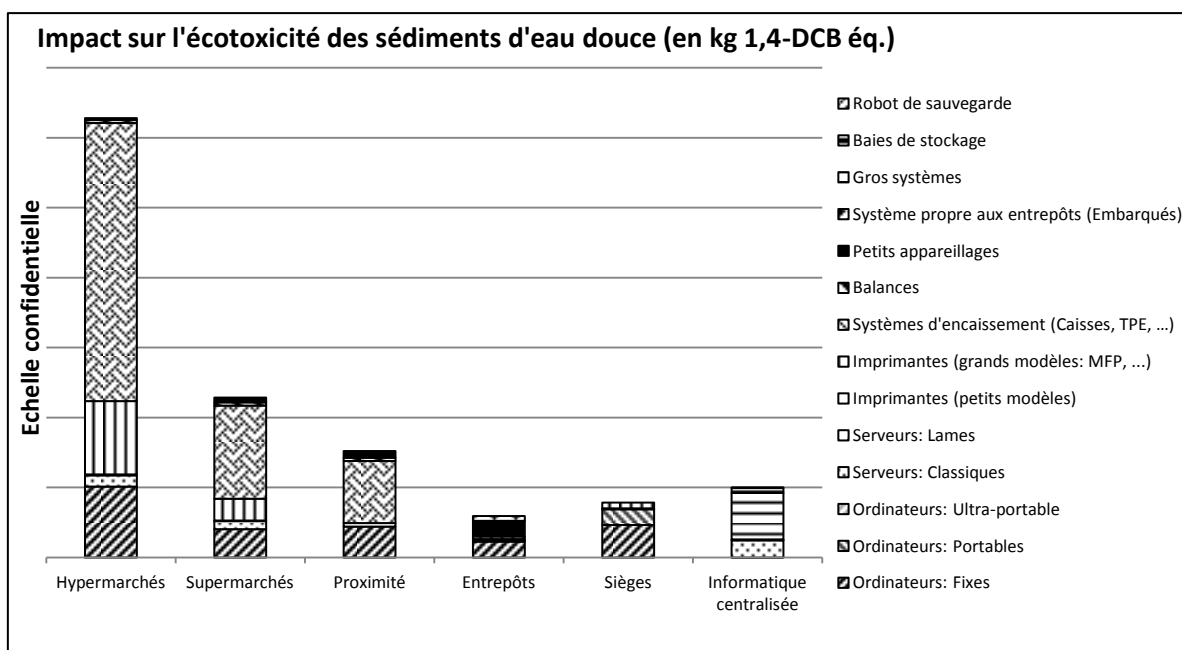
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur l'écotoxicité d'eau douce des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur l'écotoxicité des sédiments d'eau douce



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'écotoxicité des sédiments d'eau douce. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

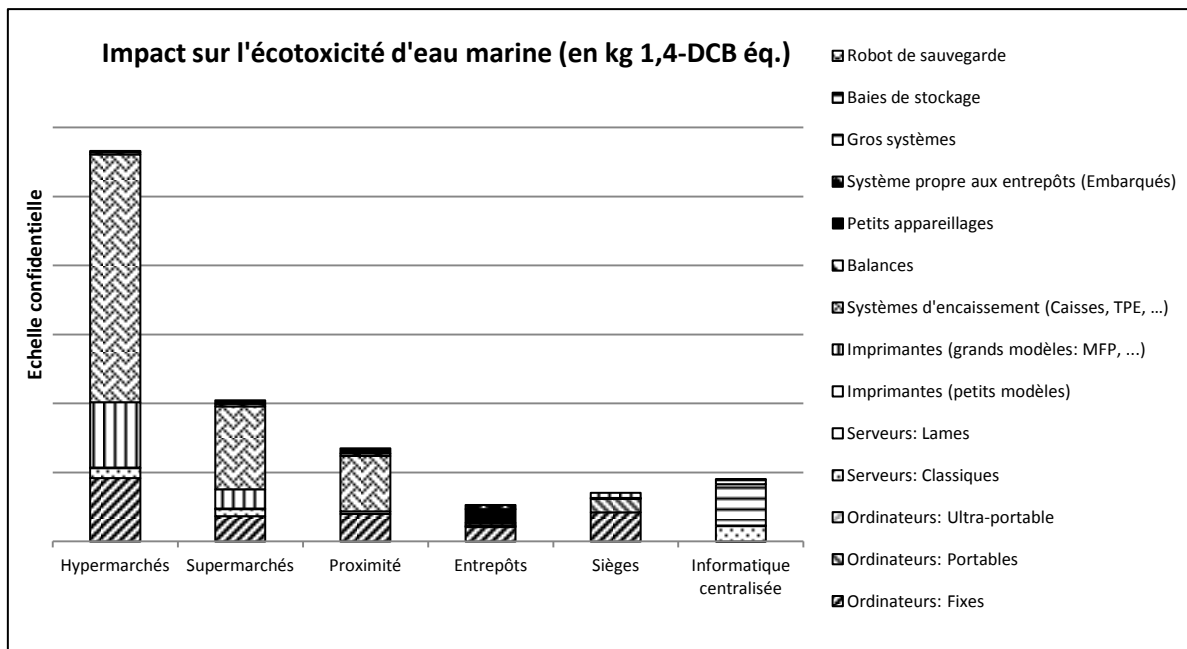
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur l'écotoxicité des sédiments d'eau douce des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur l'écotoxicité de l'eau marine



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'écotoxicité de l'eau marine. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

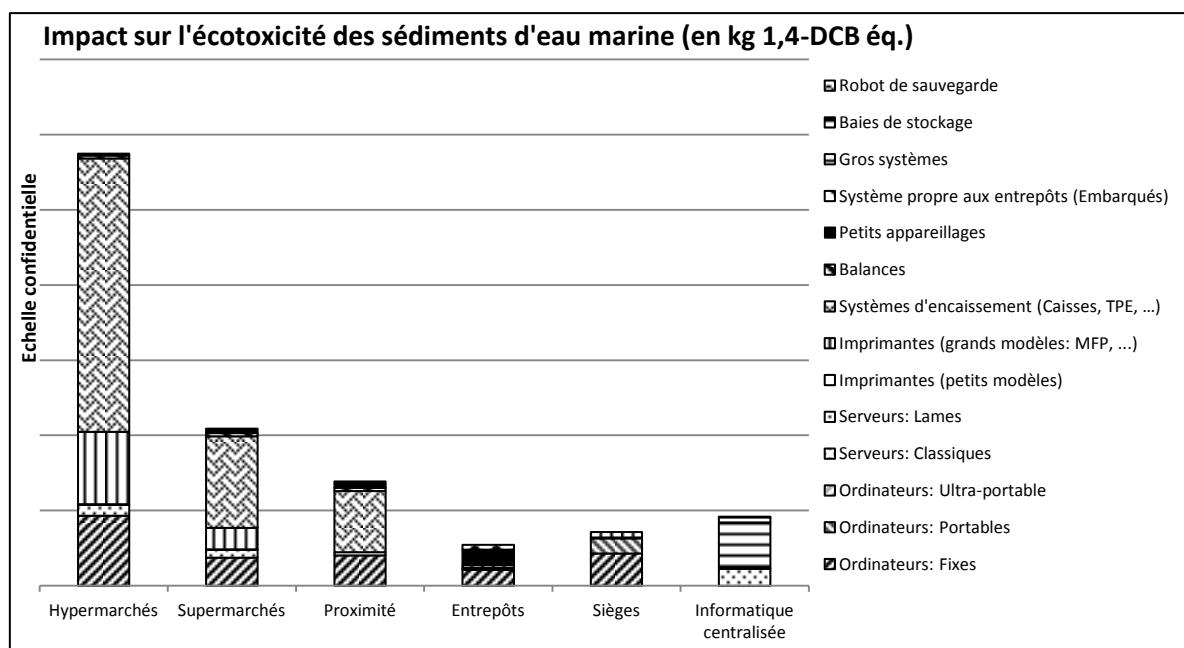
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur l'écotoxicité de l'eau marine des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur l'écotoxicité des sédiments d'eau marine



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'écotoxicité des sédiments d'eau marine. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

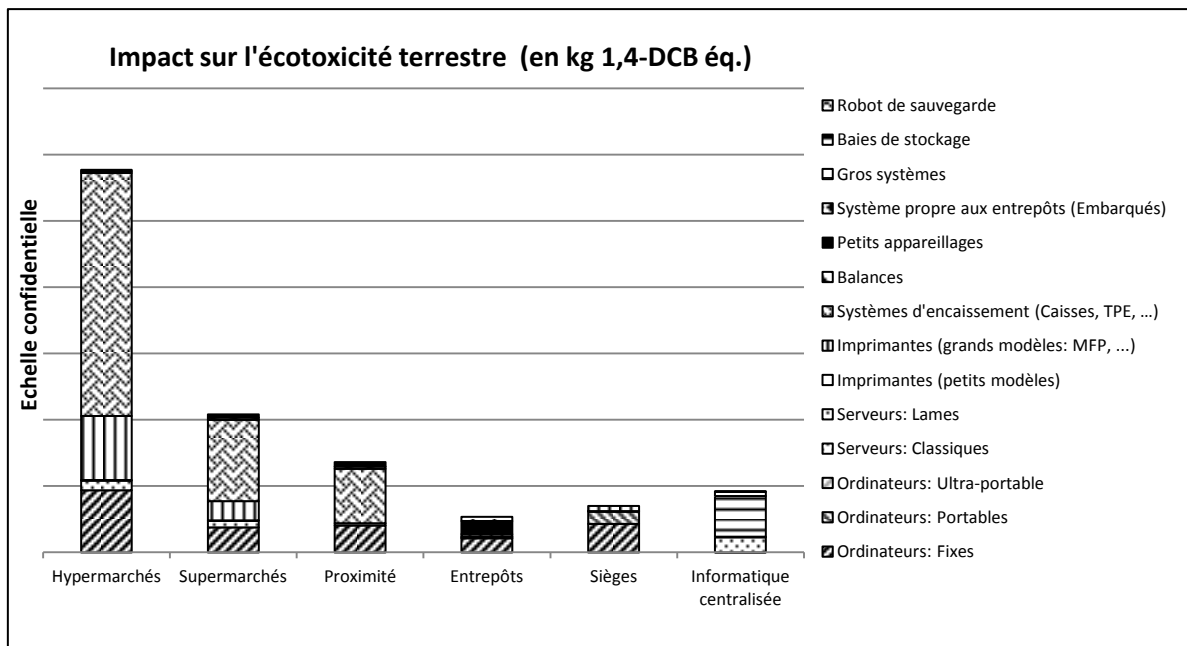
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareils nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur l'écotoxicité des sédiments d'eau marine des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur l'écotoxicité terrestre



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur l'écotoxicité terrestre. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

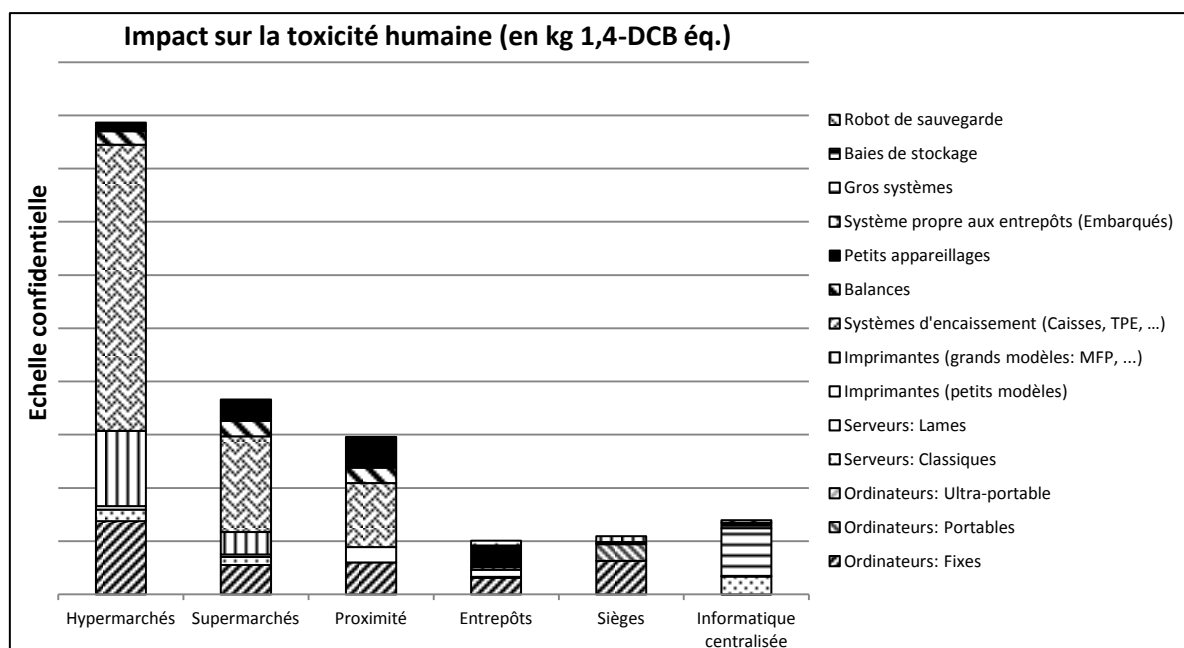
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareillages nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur l'écotoxicité terrestre des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur la toxicité humaine



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur la toxicité humaine. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes. De plus, l'impact lié aux petits appareils est plus important que pour les autres impacts. Pour les magasins de proximité, cette catégorie d'équipement obtient même un impact équivalent à l'impact lié aux ordinateurs fixes.

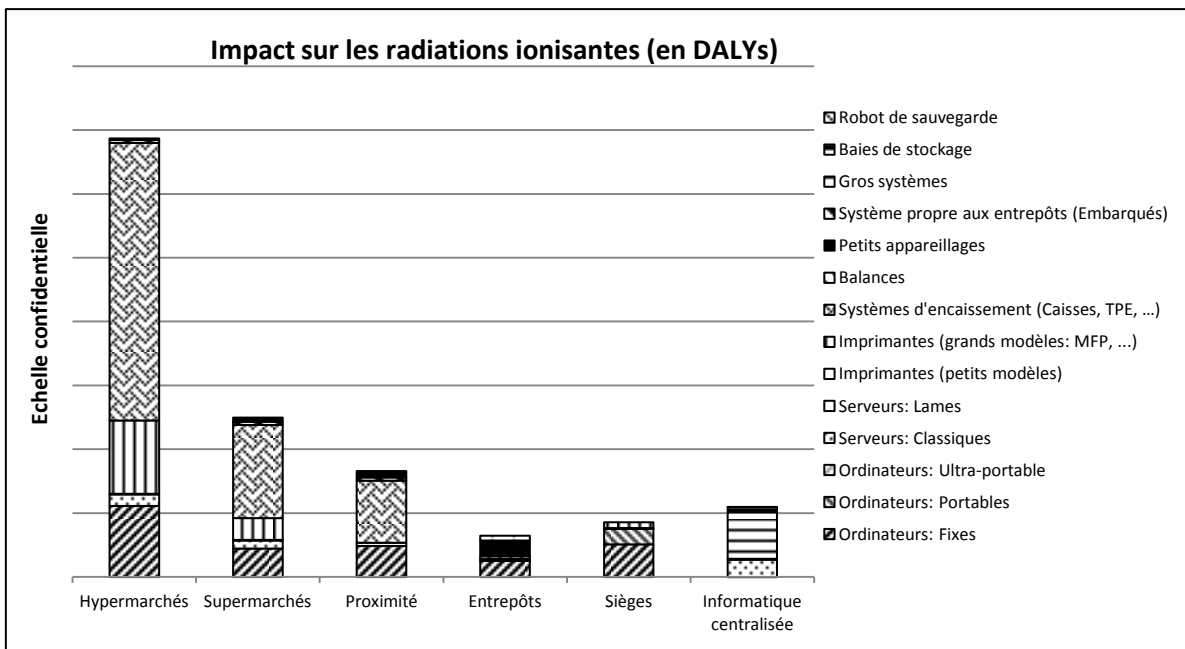
Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareils nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur la toxicité humaine des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Expression de l'impact sur les radiations ionisantes



Les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact sur les radiations ionisantes. Les supermarchés sont la deuxième catégorie, mais ne représentent qu'un tiers de l'impact des hypermarchés.

Pour les trois types de magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), la plus grande part de l'impact est liée aux systèmes d'encaissement, puis aux ordinateurs fixes.

Pour les entrepôts, l'impact repose principalement sur deux types d'équipements : les ordinateurs fixes et l'ensemble des appareils nécessaires à la réalisation des commandes.

Les ordinateurs fixes puis les portables assument la quasi-totalité de l'impact pour les établissements constituant le siège.

Enfin, les gros systèmes et les serveurs sont les catégories les plus impactantes pour l'informatique centralisée.

Les résultats pour l'impact sur les radiations ionisantes des différents établissements et la répartition en fonction des équipements au sein de ces établissements rappellent les résultats obtenus pour l'impact sur le changement climatique.

Conclusion sur les résultats du tableau de bord environnemental pour l'ensemble des indicateurs environnementaux pour l'application Casino IT

Excepté pour l'impact relatif à l'ozone stratosphérique, ce sont les trois types de magasins qui ont le plus d'impact. Pour l'ensemble des impacts environnementaux, les hypermarchés sont la catégorie d'établissements ayant le plus d'impact. Une explication réside dans le nombre d'établissement et la quantité d'équipements présents dans cette catégorie. De plus, au sein même des hypermarchés, se sont les systèmes d'encaissement qui représentent la plus grande part des émissions, quel que soit l'impact considéré. Les équipements relatifs aux systèmes d'encaissement sont de plus, la catégorie d'équipements la plus impactante, pour les trois types de magasins.

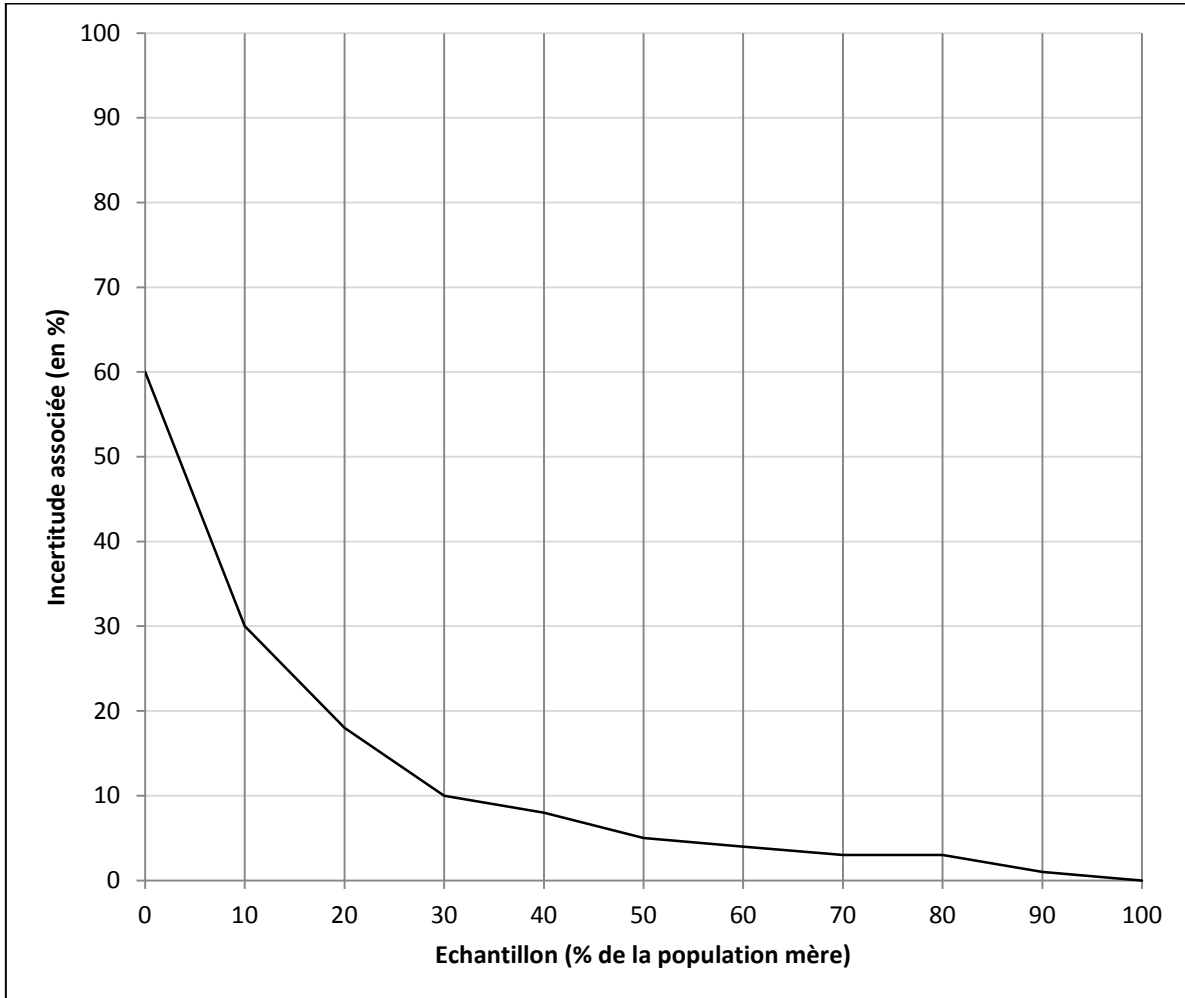
En ce qui concerne l'ozone stratosphérique, les bâtiments du siège représentent les établissements les plus impactants. Cet impact important est lié aux ordinateurs portables, catégorie d'équipements la plus impactante.

En conclusion, les établissements dont les plus impacts sont les plus importants sont les magasins (hypermarchés, supermarchés et proximité), puis l'informatique centralisée, les bâtiments du siège et enfin les entrepôts. Ce classement est identique pour l'ensemble des impacts environnementaux considéré excepté pour l'épuisement de l'ozone stratosphérique dont les bâtiments du siège sont la seconde catégorie la plus impactante derrière les hypermarchés. Ce changement de classement est lié à la présence importante de portables et d'ultra-portables dans ce type d'établissement.

Annexe 7: Fiche de suivi pour le recueil des données d'utilisation en parallèle de l'utilisation des équipements

Date et heure		Type d'activité (<i>Word, internet, logiciel...</i>)	Commentaires
Début	Fin		

Annexe 8: Incertitude relative à la taille de l'échantillon par rapport à la population mère [Jourdon, 2009]



Annexe 9 : Description de quelques méthodes de caractérisation des impacts**- CML 2001 :**

En 2001, le centre des sciences environnementales de l'Université de Leiden (CML) publie un nouveau «guide opérationnel pour les normes ISO». Ce guide décrit la procédure à appliquer pour mener un projet ACV selon les normes ISO. Pour l'étape d'évaluation des impacts de l'ACV un ensemble de plusieurs catégories d'impact, de méthodes et de facteurs de caractérisation pour une longue liste de substances est recommandé (les ressources de la nature / émissions à la nature). Pour mettre en œuvre ces méthodes dans l'inventaire du cycle de vie de la base de données, il est nécessaire d'affecter les facteurs de caractérisation des flux élémentaires de ressources et de polluants déclarés dans cette base de données. Le travail vise donc à relier les facteurs d'évaluation d'impact proposé pour l'approche axée sur les problèmes dans le cadre de la méthode CML 2001 aux donnéesecoinvent. Cela permettra de faciliter l'utilisation de la base de données et d'éviter les écarts dus à des malentendus ou des interprétations différentes des rapports originaux. Les facteurs d'impact dans la version 2.2 de la base de données Ecoinvent (2010) ont été mis à jour en utilisant la version 3.3 (Décembre 2007) de la feuille de calcul fournie par CML.

- IMPACT 2002+ :

IMPACT 2002+ est une méthodologie d'évaluation des impacts initialement développée à l'Institut Fédéral Suisse de Technologie de Lausanne (EPFL). Les évolutions actuelles sont menées par la même équipe de chercheurs regroupés désormais sous le nom de « Ecoinvent – Cycle de vie des systèmes » (Lausanne). La méthodologie actuelle propose la mise en œuvre d'une évaluation réalisable par une approche combinée impact intermédiaire et dommages, reliant l'ensemble des résultats de l'inventaire du cycle de vie (flux élémentaires et autres interventions) via 14 catégories d'indicateurs intermédiaires et jusqu'à quatre catégories de dommages (Jolliet et al., 2003b). Cette méthodologie reprend deux avantages : l'utilisation d'indicateurs « midpoint » tels que CML (Guinée et al., 2001) et les indicateurs de dommages tels que Ecoindicator 99 (Goedkoop & Spriensma, 2000).

Les facteurs de caractérisation de la toxicité humaine et de l'écotoxicité (aquatique et terrestre) sont extraits de la méthodologie IMPACT 2002 - évaluation de l'impact des produits chimiques toxiques (Pennington et al, 2005).

Les facteurs de caractérisation pour les autres catégories sont adaptés à partir des méthodes de caractérisation existantes à savoir Eco-indicator 99, CML 2001, le GIEC et la demande énergétique cumulée.

Pour intégrer IMPACT 2002+ dans la base de données Ecoinvent, de nouveaux concepts et méthodes ont été développés, notamment pour l'évaluation comparative de la toxicité et l'écotoxicité humaine. Les facteurs de dégradation de l'homme sont calculés pour les effets cancérigènes et non-cancérigènes, employant des fractions d'admission déterminées par l'intermédiaire des courbes dose-réponse d'un contaminant. Le transfert des contaminants dans l'alimentation humaine n'est plus basé sur des enquêtes de consommation, mais représente les

niveaux de production agricole et animale. En outre, le caractère intermittent des précipitations est considéré. Les facteurs, pour la toxicité humaine et pour l'écotoxicité, sont basés sur les réponses significatives plutôt que sur des hypothèses prudentes établies par les scientifiques.

La méthode IMPACT 2002 + (version 2.1) fournit actuellement des facteurs de caractérisation pour près de 1500 résultats d'inventaires de cycle de vie différents.

- **EcoIndicator 99**

La méthode «Eco-indicateur 99" a été publiée en 1999. Afin de l'appliquer dans la phase d'inventaire du cycle de vie de la base de données, il est nécessaire d'attribuer les facteurs de dommages aux flux élémentaires des ressources et des polluants déclarés dans la base de données. Le travail vise à relier la méthode d'évaluation d'impact Eco-indicateur 99 aux données de la base de données Ecoinvent, afin de faciliter l'utilisation et d'éviter les écarts dus à des malentendus ou des interprétations différentes des rapports originaux. Les nouveaux facteurs de dommages obtenus à l'aide de la méthode Eco-indicateur 99 ont été extrapolés pour certaines substances contribuant à l'effet de serre et à la couche d'ozone.

- **TRACI**

De 1996 à 2003, l'agence de protection de l'environnement américaine (EPA) a travaillé sur la détermination d'une méthode d'évaluation des impacts. L'objectif étant de développer le meilleur outil d'évaluation d'impact du cycle de vie. Une étude bibliographique a été menée pour déterminer l'applicabilité, la sophistication et l'exhaustivité de toutes les méthodes existantes.

Lorsque le développement de TRACI a commencé, il a été rapidement mis en avant que les méthodes européennes étaient largement répandues aux Etats-Unis, néanmoins, aucune simulation n'avaient été menées aux Etats-Unis. Par conséquent, comme aucun outil n'existait aux États-Unis l'EPA américaine a décidé de commencer le développement d'un outil qui pourrait être utilisé pour effectuer une évaluation d'impact avec les meilleures méthodologies applicables dans chaque catégorie. Cet effort de recherche a été appelé TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts* – Outil pour la réduction et l'évaluation des produits chimiques et d'autres impacts environnementaux). La méthodologie a été développée spécifiquement pour les Etats-Unis en utilisant les paramètres d'entrée américains. La spécificité du site est disponible pour plusieurs des catégories d'impact, mais dans tous les cas une valeur moyenne américaine existe lorsque l'emplacement est indéterminé. Les valeurs moyennes ont été mises en œuvre dans les données de la base Ecoinvent.

- **EDIP**

La méthode EDIP a été développée en 1997 et en 2003. EDIP est l'abréviation de « *Environmental Design of Industrial Products* ». Cette méthode est le résultat d'un effort de quatre ans dans le milieu des années 1990 au Danemark, dont l'Université Technique du Danemark, plusieurs entreprises de l'industrie danoise, ainsi que l'agence de protection de l'environnement danoise. Le rapport final du projet a été publié en 1997 (Wenzel et al., 1997). Un rapport avec l'information

scientifique plus détaillée concernant les facteurs d'impact différents est paru l'année suivante (Hauschild & Wenzel, 1998). Pour la mise en œuvre dans la base de données, ces données les plus à jour (2007) sont utilisés.

Afin d'utiliser cette méthode avec les données d'une base comme Ecoinvent, les facteurs d'équivalence de la méthode EDIP'97 doivent être liés à des flux élémentaires respectifs au sein de Ecoinvent. Une procédure de mise en œuvre a été nécessaire et des hypothèses ont été émises par l'auteur. Cela devrait contribuer à améliorer l'utilisation de la base de données Ecoinvent tout en utilisant la méthode EDIP'97 et aboutir à des résultats comparables entre ACV différentes qui utilisent la même base de données et la même méthode d'évaluation d'impact.

En 2003, la méthode évolue et inclut la modélisation spatiale des facteurs de caractérisation. Par conséquent, EDIP97 n'est pas remplacé par EDIP03. Ce sont deux méthodes développées sur la même base mais aboutissant à des informations différentes.

Les facteurs de caractérisation de EDIP03 prennent en compte une plus grande part de la chaîne de causalité et ce pour toutes les catégories d'impacts, ce qui comprend donc la modélisation de la dispersion de la substance et l'augmentation de l'exposition subséquente. Pour un certain nombre de catégories d'impact, la modélisation comprend également les antécédents d'exposition et la vulnérabilité des systèmes-cibles pour permettre l'évaluation du dépassement des seuils.

Par conséquent, la pertinence environnementale des impacts calculés est supérieure. En effet, en tenant compte du système-cible, les impacts évalués reflètent plus fidèlement les effets réels sur l'environnement à partir des substances observées. De plus, ils sont plus faciles et plus sûrs à interpréter en termes de dommages environnementaux. Les facteurs de caractérisation et les nouvelles références de normalisation ont été développés pour plusieurs impacts environnementaux :

- acidification
- eutrophisation terrestre
- exposition à l'ozone photochimique des plantes
- exposition à l'ozone photochimique des êtres humains
- aquatiques eutrophisation
- toxicité humaine via l'exposition de l'air
- écotoxicité

Pour les catégories d'impacts à l'échelle mondiale comme le réchauffement climatique et l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, les facteurs de caractérisation sont mis à jour avec les dernières recommandations du GIEC et de l'OMM / PNUE. Dans la méthodologie EDIP03 (Hauschild & Potting, 2005) il est recommandé que cette méthodologie de caractérisation soit utilisée comme une alternative à EDIP97 pour effectuer la caractérisation du site générique (c'est à dire sans tenir compte des informations spatiales). Pour les catégories d'impacts locaux, la pertinence environnementale des impacts potentiels est plus élevée, et offre la possibilité de quantifier et de réduire la variation spatiale. EDIP97 peut toujours être utilisé si une nouvelle ACV doit être comparée avec les résultats antérieurs basés sur la méthodologie et les facteurs EDIP97.

NNT : 2012 EMSE 0659

Valentine Moreau

METHODOLOGICAL PROPOSAL TO REPRESENT THE LOCAL AND GLOBAL, DIRECT AND INDIRECT ENVIRONMENTAL IMPACTS OF A SERVICE – APPLICATION TO INFORMATION TECHNOLOGY

Speciality: Science and Environmental Engineering

Keywords: Environmental Assessment, Environnemental Impacts, Information Technologies, Environnemental Dashboard

Summary:

Services based on information technology in public and private sectors are growing. Therefore, the energy demand is more and more important to supply computer equipments within organizations and data-centers. So, environmental impacts of ICT are mostly "delocalised" and "invisible" from the end user.

Gradually, the environmental issue takes place in the sector of information technology resulting in the new concept of the "Green IT". Nowadays, designers and users are seeking to assess the environmental impacts of information technology. In a context of environmental assessment for decision-making, the objective of this thesis is to assess the environmental impacts of devices of an organization. For this, we consider an approach to combine a product LCA approach with an inventory of data specific to a site.

Literature searches have highlighted the specific and methodological needs in terms of impact assessment. Thus, a methodology for the expression of local and global environmental impacts associated with the production and use stages of information technology present within an organization is proposed. Applied in a partnership with a multinational society and validated by its application in a research laboratory, this methodology centralizes both generic data available in databases and specific data collected from users of the organization studied. This phase, key point of the methodology, provides firstly an inventory of present equipments and secondly the knowledge and comprehension of the actual behavior of users by the way of both a survey plus power and electric consumption measurements of representative equipments of the panel inventoried (use of acquisition boxes of values known as "energy meter").

The environmental assessment approach developed in this work aims to highlight the environmental impact of the information technology's equipments within an organization. One of the main results shows that the most environmental impacts are due to the production phase than the use phase. Moreover, the method helps to identify areas for improvement: selection and equipment management, individual behavior, usage policy, choice of an eco-friendly policy... So, by a calculation of eco-efficiency involving environmental and economic gains, solutions responding to the development strategy of the organization studied can be selected.

NNT : 2012 EMSE 0659

Valentine Moreau

PROPOSITION METHODOLOGIQUE POUR EXPRIMER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LOCAUX ET PLANETAIRES, DIRECT ET INDIRECT D'UN SERVICE – APPLICATION AUX TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

Mots clés : Evaluation environnementale, Impacts environnementaux, Technologies de l'information, Tableau de Bord Environnemental

Résumé :

Les services basés sur les technologies de l'information dans les secteurs publics et privés sont en pleine croissance. Par conséquent, la demande énergétique est de plus en plus importante pour alimenter les équipements informatiques au sein des établissements utilisateurs et dans les data-centres. A cette phase de consommation, facilement identifiable par les utilisateurs, s'ajoute la phase de production des équipements dont les conséquences sur l'environnement sont difficilement perceptibles par les utilisateurs. Ainsi, les impacts environnementaux des TIC paraissent principalement « délocalisés » et « invisibles » par rapport à l'utilisateur final.

Progressivement, l'enjeu environnemental prend sa place dans la logique du secteur des technologies de l'information, aboutissant au concept de « Green IT ». Concepteurs et utilisateurs cherchent désormais à évaluer les impacts environnementaux des technologies de l'information. Dans un contexte d'évaluation environnementale pour l'aide à la décision, l'objectif de cette thèse est d'évaluer les impacts environnementaux des équipements informatiques d'une organisation. Pour cela, nous envisageons une démarche qui vise à enrichir l'approche produit de type ACV par l'ajout de données spécifiques à l'organisation étudiée.

Les recherches bibliographiques ont permis de dégager les spécificités et les besoins méthodologiques en termes d'évaluation des impacts. Ainsi, une méthodologie permettant l'expression des impacts environnementaux locaux et planétaires liés à la fabrication et à l'utilisation des technologies de l'information au sein d'une organisation est proposée. Appliquée lors d'un partenariat avec une entreprise multinationale de la grande distribution et validée par son application dans un centre de recherche, cette méthodologie centralise à la fois des données génériques disponibles dans des bases de données et des données spécifiques recueillies auprès des utilisateurs de l'organisation étudiée. Cette étape de terrain, point central de la méthodologie, permet dans un premier temps d'obtenir l'inventaire des équipements présents et dans un second temps de connaître et de comprendre le comportement réel des utilisateurs via une enquête et des mesures de puissances et de consommations électriques des équipements représentatifs du panel inventorié (utilisation de boîtiers d'acquisition de valeurs dits « économètre »).

L'approche d'évaluation environnementale des systèmes informatiques développée au cours de ce travail a pour objectif de mettre en exergue les répercussions sur l'environnement que peuvent avoir les technologies de l'information au sein d'une organisation. Un des résultats principaux montre que la majorité des impacts environnementaux sont plus liés à la phase de production qu'à la phase d'utilisation. De plus, cette méthode aide à l'identification des pistes d'améliorations : choix et gestion des équipements, comportement individuel, charte d'utilisation, choix d'une politique éco-responsable... Ainsi, par un calcul d'éco-efficience mettant en jeu les gains environnementaux et économiques, les solutions répondant à la stratégie de développement de l'organisation étudiée peuvent être sélectionnées.