

Calcul d'impact équivalent Carbone du reconditionnement d'ordinateurs.

Version 0.1

Ord*i*2.0

Octobre 2009

Licence

Ce document est sous licence “GNU Free documentation 1.3”, mis à part la présentation des acteurs, la présentation du contexte, le cahier des charges et les sources, ceci n'étant pas la production de ce site.

L'objet de cette Licence est de rendre tout manuel, livre ou autre document écrit « libre » au sens de la liberté d'utilisation, à savoir : assurer à chacun la liberté effective de le copier ou de le redistribuer, avec ou sans modifications, commercialement ou non. En outre, cette Licence garantit à l'auteur et à l'éditeur la reconnaissance de leur travail, sans qu'ils soient pour autant considérés comme responsables des modifications réalisées par des tiers.

Cette démarche est effectuée dans un souci de transparence, de réutilisation et modifications de données pouvant être sujette à débat.

Copyright (C) 2009. Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled “GNU Free Documentation License”.

Résumé

Ce document de travail est réalisé dans le cadre d'un partenariat entre l'association [La Fabrique du Libre](#) et le programme [Ordi 2.0](#), priorité gouvernementale de lutte contre la fracture numérique.

Son but est de vérifier que le fait de prolonger la durée de la vie d'un ordinateur est aussi intéressant sur le plan environnemental que sur le plan social.

Différents aspects du cycle de vie de trois types d'ordinateurs (Portable, à écran plat et à tube cathodique) y sont étudiés. Chacune des ces parties comprend un facteur d'incertitude différent.

Les aspects pris en compte sont ceux de la fabrication, du transport, du reconditionnement, de l'utilisation avant reconditionnement, de l'utilisation suite au reconditionnement et du démantèlement.

La fabrication d'ordinateur est connue en terme d'impact, via des données de l'ADEME. Celle d'un ordinateur portable provient d'une hypothèse de l'association « La Fabrique du Libre ».

Les transports pouvant être effectués par divers modes (routier, aérien ou ferroviaire), pendant les diverses phases de mobilité des ordinateurs, ceci sont synthétisés sous formes de tableau intégrant les possibilités multiples.

Les utilisations avant et après reconditionnement divergent dans leurs consommations énergétiques, les ordinateurs n'étant sollicités de la même manière.

Le reconditionnement en lui même a une consommation minime.

Faute de données due à l'apparition récente du démantèlement systématique des DEEE et d'autres problématique vues dans la partie concernant l'impact du démantèlement, il n'est pas possible de calculer cet impact.

Les hypothèses utilisées dans le cadre d'un reconditionnement pour des personnes précaires en France, ne permettent de démontrer qu'un crédit Carbone est possible. Le calcul effectué induit un impact minime, mais il n'est pas envisageable avec les incertitudes de calcul d'affirmer qu'il soit positif ou négatif.

Dans le cadre d'un reconditionnement pour des personnes précaires à l'étranger, le calcul est clairement un impact équivalent Carbone positif, ne permettant pas de bénéficier d'un crédit Carbone. Celui ci augmente grandement selon la distance des pays envisagés.

Les détails des calculs se trouvent dans ce rapport.

Afin de pouvoir intégrer les différents paramètres rentrant en compte pour le calcul, un tableur est consultable dans la partie [Téléchargement](#) du site <http://www.ressourcesdd.info/ordi>.

Il intègre les hypothèses données dans ce rapport, afin d'obtenir le bilan équivalent Carbone dans les différents cas de figure.

Table des matières

Introduction.....	1
Présentation du contexte et objectif.....	2
Présentation du contexte.....	2
Objectif détaillé du rapport.....	2
Cahier des charges.....	2
Présentation des acteurs.....	3
Ordi 2.0.....	3
La Fabrique du Libre.....	3
Bilan Carbone et consommations énergétiques.....	4
Fabrication d'un ordinateur.....	5
Ordinateurs portables.....	5
Résumé de la fabrication d'un ordinateur.....	5
Fonctionnement à l'année.....	6
PME et Centre d'Action Sociale.....	7
Écoles.....	8
Résumé du fonctionnement à l'année.....	9
Reconditionnement.....	10
Transport.....	11
Transport routier.....	11
Transport ferroviaire.....	13
Transport aérien.....	14
Démantèlement d'un ordinateur.....	16
Calcul de l'impact Carbone d'un ordinateur reconditionné.....	17
Méthodologie.....	17
Cadre du reconditionnement local.....	18
Cadre du reconditionnement vers les PEDs.....	19
Conclusion.....	20

Introduction

Ceci est un document de travail dans le cadre d'un partenariat entre l'association [La Fabrique du Libre](#) et le programme [Ordi 2.0](#), priorité gouvernementale de lutte contre la fracture numérique.

Le but de ce document est *de vérifier que le fait de prolonger la durée de la vie d'un ordinateur est aussi intéressant sur le plan environnemental. (...que sur le plan social NDLR).*

Il s'agit aussi de démontrer sans contestation possible et dans le cadre du respect d'une charte, que le reconditionnement d'un ordinateur est globalement positif en termes d'émissions de carbone, ce qui pourrait permettre de financer le reconditionnement (100 à 150 euros par machine) dans le cadre de fonds de compensation carbone, au même titre que la plantation d'arbres, le financement d'unités de production d'énergies renouvelables pour les PEDs (Pays en développement NDLR).

Présentation du contexte et objectif

Présentation du contexte

Des millions d'ordinateurs sont jetés chaque année en France comme ailleurs. Ce phénomène s'accélère du fait de la durée de vie de plus en plus courte des machines (effets de mode, usages, nouveaux systèmes et logiciels). Depuis un an la démarche DEEE (en 2007, NDLR) impose des règles nouvelles, notamment sur la responsabilité renforcée du producteur. Les besoins sont de plus en plus importants en usages numériques que ce soit pour l'économie, pour l'éducation, pour les loisirs mais aussi pour l'e-Inclusion (publics en difficultés : handicapés, personnes âgées), les démarches de développement durable, la substitution de transports. Les fractures numériques sont nombreuses. L'État français a même affirmé Parmi les machines mises au rebut, celles qui sont en état de marche pourraient ainsi être utilisées. Au-delà de la dimension sociale et économique, la dimension environnementale mérite d'être quantifiée.

Objectif détaillé du rapport

Il s'agit de vérifier que le fait de prolonger la durée de la vie d'un ordinateur est aussi intéressant sur le plan environnemental (que sur le plan social, NDLR). Cela permettra d'affiner la démarche méthodologique mais aussi de répondre aux questionnements des ONG de l'environnement, souvent un peu méfiante sur le déploiement à grande échelle des technologies. Il s'agit aussi de démontrer sans contestation possible et dans le cadre du respect d'une charte, que le reconditionnement d'un ordinateur est globalement positif en termes d'émissions de carbone, ce qui pourrait permettre de financer le reconditionnement (100 à 150 euros par machine) dans le cadre de fonds de compensation carbone, au même titre que la plantation d'arbres, le financement d'unités de production d'énergies renouvelables pour les PEDS Évidemment, les scénarios sont différents si l'ordinateur est réutilisé sur le territoire métropolitain, ou dans des pays en développement. Pour chaque cas, il sera étudié les différences entre ordinateurs portables et ordinateurs de bureau (unité centrale + écran). Le cas spécifique des différences entre écrans cathodiques et écrans plats sera étudié. Il sera aussi utile de traiter de la différence entre le démantèlement dans les PED et en France.

Cahier des charges

Évaluer l'impact carbone des actions de réutilisation des ordinateurs pour envisager la place de la réutilisation dans les mécanismes de compensation carbone.

Chiffres nécessaires : Bilan Carbone et équivalent électrique

1. Fabrication d'un ordinateur actuel
2. Fonctionnement à l'année (hypothèses : école, PME, action sociale).
3. Reconditionnement
4. Transport pour reconditionnement et pour envoi au futur utilisateur (au départ de France)
5. Transport pour livraison d'ordinateur neuf
6. Démantèlement d'un ordinateur

Source : Cahier des charges « Etude du Marché des équipements informatiques d'occasion en France », par Ordi 2.0, Plan numérique France 2012.

Présentation des acteurs

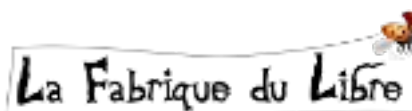
Ordi 2.0



Le Gouvernement français s'est engagé, avec le soutien de tous les acteurs de la Société de l'Information, à développer une filière nationale de collecte, de reconditionnement et de redistribution d'ordinateurs dans une démarche d'économie solidaire et de qualité environnementale.

Pour accélérer l'équipement à bas prix des publics en difficulté économique, le Secrétariat d'État chargé de la Prospective et du Développement de l'Economie Numérique a souhaité soutenir et encourager le déploiement, sous la marque « Ordi 2.0 », d'une filière nationale de collecte, de rénovation et de réemploi des ordinateurs.

La Fabrique du Libre



La Fabrique du Libre agit pour une réappropriation écologique des usages des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC).

L'association est tout à la fois un lieu d'expérimentation, un lieu d'échange, un atelier de construction et un endroit à rêver. C'est un lieu physique et numérique de partage des savoirs autour de l'informatique libre et écologique.

Le but n'est pas d'inventer de nouveaux designs, ode à la consommation de masse, mais d'amener et d'aider chacun-e à trouver les ressources à la création de machines personnelles et d'accompagner la réalisation de projets d'écologie informatique.

Bilan Carbone et consommations énergétiques

Ce rapport a pour but de fournir le bilan carbone et les consommations énergétique des points suivants :

- Fabrication d'un ordinateur actuel
- Fonctionnement à l'année (hypothèses : école, PME, action sociale).
- Reconditionnement
- Transport pour reconditionnement et pour envoi au futur utilisateur (au départ de France)
- Transport pour livraison d'ordinateur neuf
- Démantèlement d'un ordinateur

Remarques

Variations des consommations

Les consommations énergétiques sont extrêmement variable d'un ordinateur à un autre.

Les données existantes concernant ce sujet ne nous permettent pas d'entrevoir toutes les données inhérentes à chaque modèle. Nous considérerons ces données comme moyennes de référence, bien qu'étant fluctuantes dans le temps et selon le modèle considéré.

Dans l'approche de ce rapport, nous prendrons trois types d'ordinateurs en tant que référence :

- Ordinateur à écran plat
- Ordinateur à tube cathodique
- Ordinateur portable

Tableur

Afin de pouvoir gérer les différents paramètres rentrant en compte pour le calcul, un tableur est consultable dans la partie [Téléchargement](#) du site <http://www.ressourcesdd.info/ordi>.

Différentes hypothèses peuvent être calculées via ce système. Des mises à jour éventuelles peuvent également l'enrichir.

Fabrication d'un ordinateur

D'après les données de l'ADEME (voir [annexe 1](#)), l'équivalent Carbone de la fabrication d'un ordinateur à écran tube cathodique est de 185,8 kg, celui d'un ordinateur à écran plat étant de 344,5 kg.

La valeur indiquée dans le rapport originel est de 350,6 kg pour un ordinateur à écran plat, mais semble être due à une erreur d'addition.

Ordinateurs portables

Hypothèse de calcul par la Fabrique du Libre :

Etant donné le manque d'information concernant les ordinateurs portables, nous considérerons comme base les composants électroniques, le circuit imprimé, l'écran plat, la production des produits chimiques et des galettes de silicium.

Ordinateur portable	kg combustibles	% charbon	% gaz	équ. C
Composants électroniques	94	90%	10%	68,6
Circuit imprimé	14	49%	51%	11,4
Ecran plat	226	47%	53%	184,3
Production des produits chimiques	64	80%	20%	48,0
Production des galettes de silicium	17	20%	80%	14,8
Total	415			327,1

Tableau 1 : Calcul du facteur d'émission d'un ordinateur portable.

Résumé de la fabrication d'un ordinateur

Trois cas de figure ont été considérés pour l'impact équivalent Carbone de la fabrication d'un ordinateur.

- Ordinateur à écran plat
- Ordinateur à tube cathodique
- Ordinateur portable

Dans le cadre de l'ordinateur à écran plat (344,5 kg d'équivalent Carbone) et de l'ordinateur à tube cathodique (185,8 kg d'équivalent Carbone), les valeurs proviennent de l'ADEME.

Dans le cadre de l'ordinateur portable, la valeur est issue d'une hypothèse de calcul de l'association "La Fabrique du Libre". Cette hypothèse amène à un résultat de 327,1 kg d'équivalent Carbone.

Ces valeurs comportent un facteur d'incertitude de 30%.

Fonctionnement à l'année

Remarques :

Nos hypothèses de calcul se basent sur le calculateur d'énergie pour les systèmes PC, Energy Star¹. Bien qu'il existe un rapport de Remodece détaillant les consommations moyennes, celui-ci ne concerne que la consommation au sein des ménages.

Hypothèses globales :

- écran 17 pouce (pour tube cathodique et écran plat)
- 47 semaines de fonctionnement annuel (52 semaines de travail et 5 de vacances) pour les PME et centre d'action sociale, 160 jours pour les écoles.
- 23 grammes équivalent carbone par kWh d'électricité en analyse de cycle de vie (Valeur de référence utilisée par l'ADEME)

Le tableau suivant indique les hypothèses de consommation en fonction des différents modes.

Élément	Mode actif	Mode attente ²	Mode arrêt ³
Station de travail	150 W	20 W	10 W
Tube cathodique	73 W	3 W	3 W
Écran plat "économique" ⁴	25 W	1,2 W	1,2 W
Ordinateur portable "économique" ⁵	22 W	11 W	3 W

Tableau 2 : Hypothèses de consommation des éléments considérés suivant les modes.

1 http://www.eu-energystar.org/fr/fr_008b.shtml, réalisé par VHK pour la Commission européenne

2 La plupart des ordinateurs de bureau entrent en mode "attente" si on ne les touche pas pendant 20-30 minutes.

3 Pratiquement tous les PC modernes et de nombreux moniteurs (notamment les LCD) consomment de l'énergie quand ils sont éteints. La seule façon d'éviter cela est de les débrancher ou d'éteindre l'interrupteur de la prise à rallonge, si vous en utilisez une.

4 en coût, non pas en énergie

5 en coût, non pas en énergie

PME et Centre d'Action Sociale

Les éléments sont dans un premier temps considérés séparément, puis réassemblés, pour avoir une vision globale des types d'ordinateurs.

Éléments séparés

Une consommation type "PME et Centre d'Action Sociale" est faite en prenant en compte les divers modes de fonctionnement de l'appareil utilisé.

Élément\Consommation	Mode actif (4h/j) (en W)	Mode attente ⁶ (5h/j) (en W)	Mode arrêt ⁷ (15h/j) (en W)	Annuelle (kWh)	Annuelle (kg equ. C)
Station de travail (écran non inclus)	150	20	10	199,75	4,59
Tube cathodique	73	3	3	82,72	1,9
Écran plat "économique" ⁸	25	1,2	1,2	29,14	0,67
Ordinateur portable "économique" ⁹	22	11	3	44,18	1,02

Tableau 3 : Consommation des éléments séparés dans le cadre d'une consommation type "PME et Centre d'Action Sociale".

Éléments complets

Les constituants précédemment analysés sont à présent combinés.

Élément complet\Consommation	Annuelle (kWh)	Annuelle (kg equ. C)
Station de travail + Tube cathodique	282,47	6,5
Station de travail + Écran plat	228,89	5,26
Ordinateur portable "économique"	44,18	1,02

Tableau 4 : Consommation des éléments complet dans le cadre d'une consommation type "PME et Centre d'Action Sociale".

6 La plupart des ordinateurs de bureau entrent en mode "attente" si on ne les touche pas pendant 20-30 minutes.

7 Pratiquement tous les PC modernes et de nombreux moniteurs (notamment les LCD) consomment de l'énergie quand ils sont éteints. La seule façon d'éviter cela est de les débrancher ou d'éteindre l'interrupteur de la prise à rallonge, si vous en utilisez une.

8 en coût, non pas en énergie

9 en coût, non pas en énergie

Écoles

Les éléments sont dans un premier temps considérés séparément, puis réassemblés, pour avoir une vision globale des types d'ordinateurs.

Éléments séparés

Une consommation type “École” est faite en prenant en compte les divers modes de fonctionnement de l'appareil utilisé.

Élément\Consommation	Mode actif (4h/j) (en W)	Mode attente ¹⁰ (5h/j) (en W)	Mode arrêt ¹¹ (15h/j) (en W)	Annuelle (kWh)	Annuelle (kg equ. C)
Station de travail (écran non inclus)	150	20	10	136	3,13
Tube cathodique	73	3	3	56,32	1,3
Écran plat “économique” ¹²	25	1,2	1,2	19,84	0,46
Ordinateur portable “économique” ¹³	22	11	3	30,08	0,69

Tableau 5 : Consommation des éléments séparés dans le cadre d'une consommation type “École”.

Éléments complets

Les constituants précédemment analysés sont à présent combinés.

Élément complet\Consommation	Annuelle (kWh)	Annuelle (kg equ. C)
Station de travail + Tube cathodique	192,32	4,42
Station de travail + Écran plat	155,84	3,58
Ordinateur portable “économique”	30,08	0,69

Tableau 6 : Consommation des éléments complet dans le cadre d'une consommation type “PME et Centre d'Action Sociale”.

10 La plupart des ordinateurs de bureau entrent en mode “attente” si on ne les touche pas pendant 20-30 minutes.

11 Pratiquement tous les PC modernes et de nombreux moniteurs (notamment les LCD) consomment de l'énergie quand ils sont éteints. La seule façon d'éviter cela est de les débrancher ou d'éteindre l'interrupteur de la prise à rallonge, si vous en utilisez une.

12 en coût, non pas en énergie

13 en coût, non pas en énergie

Résumé du fonctionnement à l'année

Dans le cadre des hypothèses de calculs, le bilan équivalent Carbone pour deux cas de figures est le suivant:

Cas de la PME/Centre d'action Sociale

Un ordinateur avec écran plat produit 5,26 kg equ. C/an, tandis qu'un ordinateur à tube cathodique produit 6,5 kg equ. C/an. Un ordinateur portable, produit 1,02 kg equ. C/an.

Cas d'une école

Un ordinateur avec écran plat produit 3,58 kg equ. C/an, tandis qu'un ordinateur à tube cathodique produit 4,42 kg equ. C/an. Un ordinateur portable, produit 0,69 kg equ. C/an.

Concernant les consommations d'électricité, un facteur d'incertitude de 10% est applicable.

Reconditionnement

Dans le cadre du reconditionnement, nous considérons l'acte du reconditionnement en lui même. Les espaces de stockages, les bureaux, les lieux de reconditionnement et le transport étant extrêmement fluctuant d'une structure à une autre.

Hypothèses :

- Les machines à reconditionner sont en état de marche avec des capacités suffisantes pour l'installation d'un nouveau système d'exploitation.
- L'installation d'un nouveau système est effectué en deux heures.

Le reconditionnement est fait sur un mode actif. (reprise des données de Energy Star)

Élément consommation	Mode actif (W)	Par ordinateur (kWh)	Par ordinateur (kg equ. C)
Station de travail + Tube cathodique	223	0,446	0,010258
Station de travail + Écran plat	175	0,350	0,00805
Ordinateur portable "économique"	22	0,044	0,001012

Tableau 7 : Consommation des éléments complets lors du reconditionnement.

Le reconditionnement d'un ordinateur à tube cathodique est donc de 10 g equ. C, celui d'un ordinateur à écran plat est de 8 g equ. C et de 1 kg equ. C pour un ordinateur portable.

Un facteur d'incertitude de 10% est applicable sur ces données.

Transport

Plusieurs cas de figure seront étudiés pour le transport d'ordinateur.

- Transport pour reconditionnement
- Transport pour envoi au futur utilisateur (au départ de France)
- Transport pour livraison d'ordinateur neuf

Quelque soit le motif du transport, trois cas de figures sont pris en compte. Le transport aérien, routier ou ferroviaire.

Transport routier

Le transport routier sera considéré selon différentes hypothèses, par camionnette ou par camion pour des volumes plus important et par type de carburant, essence ou diesel.

Autres hypothèses de calcul :

- Poids d'une unité centrale : 10 kilogrammes
- Poids d'un écran plat (17 pouce) : 5 kilogrammes
- Poids d'un écran à tube cathodique (17 pouce) : 15 kilogrammes
- Poids d'un ordinateur portable : 3 kilogrammes

Ces hypothèses peuvent être changées et recalculées à travers le [tableur](#).

Dans le tableau suivant, les poids inférieurs ou égaux à 3,5 tonnes, correspondent à une camionnette, les autres correspondant à un camion.

Classe de PTAC	Grammes équ. C par tonne.km
< 1,5 t essence	740,4
< 1,5 t diesel	680,8
1,5 à 2,5 t essence	483,4
1,5 à 2,5 t diesel	456,1
2,51 à 3,5 t essence	472,8
2,51 à 3,5 t diesel	340,7
3,5 t	331,7
3,51 à 5 t	285,4
5 à 6t	194,2
6,1 à 10,9 t	145,1
11 à 19 t	74,9
19,1 à 21 t	71,4
plus de 21 t	64,1

Tableau 8 : Impact équivalent Carbone en fonction de la classe du transport routier.

Calcul d'impact équivalent Carbone du reconditionnement d'ordinateurs.

En réintroduisant les données de poids, cela donne les valeurs contenues dans le tableau suivant.

Classe de PTAC	Grammes équ. C par Unité Centrale.km	Grammes équ. C par écran plat.km	Grammes équ. C par écran tube cathodique.km	Grammes équ. C par ordinateur portable.km
< 1,5 t essence	7,4	3,7	11,11	2,22
< 1,5 t diesel	6,81	3,4	10,21	2,04
1,5 à 2,5 t essence	4,83	2,42	7,25	1,45
1,5 à 2,5 t diesel	4,56	2,28	6,84	1,37
2,51 à 3,5 t essence	4,73	2,36	7,09	1,42
2,51 à 3,5 t diesel	3,41	1,7	5,11	1,02
3,5 t	3,32	1,66	4,98	1
3,51 à 5 t	2,85	1,43	4,28	0,86
5 à 6t	1,94	0,97	2,91	0,58
6,1 à 10,9 t	1,45	0,73	2,18	0,44
11 à 19 t	0,75	0,37	1,12	0,22
19,1 à 21 t	0,71	0,36	1,07	0,21
plus de 21 t	0,64	0,32	0,96	0,19

Tableau 9 : Impact équivalent Carbone des divers ordinateurs en fonction de la classe du transport routier.

Transport ferroviaire

Une tonne.km en transport ferroviaire en France correspond à 2,0 g équivalent carbone.

Milligrammes équ. C par Unité Centrale.km	20
Milligrammes équ. C par écran plat.km	10
Milligrammes équ. C par écran tube cathodique.km	30
Milligrammes équ. C par ordinateur portable.km	6

Tableau 10 : Impact équivalent Carbone de divers ordinateurs en fonction en transport ferroviaire.

Transport aérien

L'impact diverge selon le modèle d'avion employé pour le Fret.

Catégorie	Avion	Carburant max (litres)	Autonomie (pour la charge emportée) en km	Fret (tonnes)	Kg équ. C par tonne.km
Court-courrier	A318	23860	2778	16	1,044
Court-courrier	A318	23860	5186	10	0,895
Court-courrier	A319	29660	4593	18,5	0,680
Court-courrier	A319	29660	6852	11	0,765
Court-courrier	A320	29660	2675	20	1,078
Court-courrier	A320	29660	4116	15	0,934
Moyen-courrier	A300F	68150	5062	52	0,504
Moyen-courrier	A300F	68150	6297	43	0,490
Moyen-courrier	A310	75470	6482	33	0,689
Long-courrier	A330-200	139090	8149	104	0,319
Long-courrier	A330-200	139090	11112	68	0,358
Long-courrier	A340-600	194880	10371	147	0,248
Long-courrier	A340-600	194880	13890	80	0,341
Long-courrier	A380	310000	10408	150	0,386
Long-courrier	747-400	216840	13446	113	0,278

Tableau 11 : Impact équivalent Carbone en fonction du fret.

En réintroduisant les données de poids, cela donne les valeurs contenues dans le tableau suivant.

Avion	Grammes équ. C par Unité Centrale.km	Grammes équ. C par écran plat.km	Grammes équ. C par écran tube cathodique.km	Grammes équ. C par ordinateur portable.km
A318	10,44	5,22	15,66	3,13
A318	8,95	4,48	13,43	2,69
A319	6,8	3,4	10,2	2,04
A319	7,65	3,83	11,48	2,3
A320	10,78	5,39	16,17	3,23
A320	9,34	4,67	14,01	2,8
A300F	5,04	2,52	7,56	1,51
A300F	4,9	2,45	7,35	1,47
A310	6,89	3,45	10,34	2,07
A330-2 00	3,19	1,6	4,79	0,96
A330-2 00	3,58	1,79	5,37	1,07
A340-6 00	2,48	1,24	3,72	0,74
A340-6 00	3,41	1,71	5,12	1,02
A380	3,86	1,93	5,79	1,16
747-400	2,78	1,39	4,17	0,83

Tableau 12 : Impact équivalent Carbone des divers ordinateurs en fonction du fret.

Conclusion transports

Étant donné la diversité des moyens de transport, les données sont intégrées dans le [tableur](#), où diverses hypothèses sont testables.

Les valeurs d'incertitudes sont contenues dans le "[Bilan Carbone Entreprise et collectivités par l'ADEME, Janvier 2007, GUIDE DES FACTEURS D'EMISSIONS, Version 5.0, Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées](#)".

Démantèlement d'un ordinateur

Il n'est pas possible à ce jour d'effectuer un impact équivalent carbone, même approximatif, du démantèlement d'un ordinateur. Les raisons en étant les suivantes :

- Grande diversité des composants
- Méconnaissance actuelle des plastiques de l'ordinateur¹⁴
- Mise en place récente du traitement des DEEE¹⁵
- Différentes méthodes de revalorisation, réutilisation, recyclage ou élimination
- Manque de données

Pour plus d'information, nous vous invitons à consulter l'[annexe 2](#) sur les procédés de démantèlement, ainsi qu'un rapport de l'ADEME, sur les divers traitements et caractérisations des plastiques contenus dans les DEEE (Caractérisation des plastiques contenus dans les DEEE et état des lieux de la valorisation des ces plastiques, ADEME, Juillet 2005)

On pourrait considérer qu'en dehors du transport, l'acte en lui même est nul, étant donné qu'il n'induit pas de consommation énergétique, de part les outils (pince coupante, tournevis...). Par contre, ce qui suit le démantèlement, via les réutilisations, recyclages, traitements, ..., induit un impact méconnu.

14 Avec la norme ISO 11469:2000, la nature des plastiques constituant les équipements récents sont identifiables via des pictogrammes. Ce qui pourra dans l'avenir permettre une meilleure connaissance de leur impact équivalent Carbone

15 Le décret relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements, a été publié au Journal officiel du 22 Juillet 2005.

Calcul de l'impact Carbone d'un ordinateur reconditionné

Afin d'effectuer le Calcul de l'impact Carbone d'un ordinateur reconditionné, il est nécessaire d'utiliser un tableur. Celui-ci est téléchargeable dans la partie [Téléchargement](#) du site <http://www.ressourcesdd.info/ordi>.

Méthodologie

L'impact Carbone d'un ordinateur reconditionné intègre les éléments suivants :

- Sa consommation au sein des ménages bénéficiaires sur sa durée de vie restante.
- L'absence d'achat d'un nouvel ordinateur et donc éléments liés (Fabrication, transport...)

La durée de vie au sein des ménages est de 2 ans. La moyenne d'utilisation en entreprise étant de 4 ans et sa durée de vie étant de 6 ans¹⁶.

Hypothèses

Les fonctionnements annuels¹⁷, au sein des ménages, des éléments composant un ordinateurs sont les suivants:

Unité centrale (en kWh/an)	227,3
Écran à tube cathodique (en kWh/an)	171,1
Écran plat (en kWh/an)	46,5
Ordinateur portable (en kWh/an)	35,4

Tableau 13 : Consommation au sein des ménages des éléments composant un ordinateur.

¹⁶ moyenne européenne en 2003, source Energy Star

¹⁷ "Mesure de la consommation des usages domestiques de l'audiovisuel et de l'informatique, Projet REMODECE, Rapport final ,Juillet 2008"

Cadre du reconditionnement local

Tout d'abord, il est important de considérer la donnée suivante.

L'impact équivalent Carbone d'un ordinateur reconditionné, tout au long de son cycle de vie restant, est de 18,3 kg equ. C pour un ordinateur à écran tube cathodique, 12,6 kg equ. C pour un ordinateur à écran plat et 1,6 kg equ. C pour un ordinateur portable¹⁸. Ceci ne considérant pas d'utilisateurs qui auraient achetés un ordinateur neuf, si ils n'avaient pas bénéficié d'un ordinateur reconditionné.

Un ordinateur reconditionné a donc un impact bien moindre, étant donné que l'on ne considère pas sa fabrication et les impacts liés à son impact équivalent Carbone.

Hypothèses

Dans le cadre du reconditionnement local (en France), on considère que 3% des utilisateurs auraient acheté un ordinateur neuf (valeur de l'hypothèse basse en raison de la précarité des bénéficiaires.)

L'hypothèse de transport pour le reconditionnement est de 50 kilomètres par camionnette (1,5 T à 2,5 T diesel).

Résultats

L'impact équivalent Carbone d'un ordinateur reconditionné localement est de 11,7 kg equ. C pour un ordinateur à écran tube cathodique, 1,5 kg equ. C pour un ordinateur à écran plat et -8,3 kg equ. C pour un ordinateur portable.

A noter pour l'ordinateur portable, qu'un chiffre négatif correspond à une économie équivalent Carbone réalisée.

18 via calcul du tableur

Cadre du reconditionnement vers les PEDs

Hypothèses

Dans le cadre du reconditionnement vers les PEDs, on considère qu'aucun des utilisateurs auraient acheté un ordinateur neuf (valeur de l'hypothèse basse en raison de la précarité des bénéficiaires.)

L'hypothèse de transport de reconditionnement est de 50 kilomètres par camionnette (1,5 T à 2,5 T diesel).

Les hypothèses de transport d'envoi sont de :

- 1500 kilomètres par avion A320 (20 T de fret), type “Afrique du Nord”.
- 10 000 kilomètres par avion A380, type “Amérique Latine”.

Résultats type “Afrique du Nord”

L'impact équivalent Carbone d'un ordinateur reconditionné vers l'Afrique du Nord est de 45,9 kg equ. C pour un ordinateur à écran tube cathodique, 29,1 kg equ. C pour un ordinateur à écran plat et 4,9 kg equ. C pour un ordinateur portable.

Résultats type “Amérique Latine”

L'impact équivalent Carbone d'un ordinateur reconditionné vers l'Afrique du Nord est de 115,4 kg equ. C pour un ordinateur à écran tube cathodique, 70,8 kg equ. C pour un ordinateur à écran plat et 13,3 kg equ. C pour un ordinateur portable.

Conclusion

Suite aux calculs, il n'est pas possible de dire que l'impact équivalent Carbone est réduit dans le cadre du reconditionnement.

En effet, si l'allongement du cycle de vie d'un ordinateur en entreprise permet la réduction d'impact équivalent Carbone, c'est due au fait que le parc est moins souvent renouvelé, donc moins de nouveaux ordinateurs sont fabriqués.

Dans le cas de personnes précaires, si ils n'avaient pas bénéficié d'ordinateur de reconditionnement, la plupart n'en auraient pas. Donc, dans le cas de précaires, l'allongement du cycle de vie revient également à une consommation énergétique, un impact de transport et de reconditionnement supplémentaires. Dans ce cas, on ne peut pas dire qu'il y aurait moins d'ordinateurs fabriqués, à moins de considérer qu'une part d'entre eux auraient tout de même acheté des ordinateurs neufs. En admettant que l'acquisition d'ordinateurs neufs par des précaires atteigne les 3%, la réduction d'impact équivalent Carbone n'est toujours pas flagrante.

On peut cependant dire qu'étant donné qu'une deuxième vie est donnée à l'ordinateur, son impact carbone est bien moindre. (11 fois moindre pour un ordinateur à écran cathodique, 28 pour un ordinateur à écran plat et 200 fois pour un ordinateur portable). Mais cet impact s'ajoute tout de même au pré-existant. Suivant l'hypothèse d'acquisition d'ordinateurs neufs par des précaires, on peut obtenir un faible bilan Carbone négatif, mais les incertitudes inhérentes au calcul ne permettent pas de valider ce faible bilan Carbone négatif.

Dans le cadre d'envoi aux PEDs, cet impact augmente encore plus via le transport, sans considérer les problèmes de traitement des DEEE, une fois arrivé dans les pays. Un rapport émis par la Toxics Link met en évidence que 70 % des déchets électroniques et électriques mis en décharge à New Delhi (Inde) provenaient d'exportation de pays industrialisés.

En conclusion, si la réutilisation d'ordinateur par des précaires a un faible impact au niveau local et n'entraîne pas de catastrophe environnementale, cela n'est pas le cas vers les PED.

L'attrait social de la pratique de reconditionnement, n'a pas ou peu d'impact environnemental positif ou négatif.

Calcul d'impact équivalent Carbone du reconditionnement d'ordinateurs.

ANNEXES



Octobre 2009

Table des matières

Fabrication d'un ordinateur.....	1
Fabrication des puces.....	1
Circuits imprimés.....	2
Ecrans.....	2
Autres constituants et total.....	3
Démantèlement.....	5
Démantèlement des unités centrales.....	5
Les cartes informatiques.....	6
Démantèlement des écrans.....	6
Traitement des périphériques et des câbles.....	7
Valoriser les matériaux dans une filière adaptée.....	8
Contrôle des pollutions et élimination.....	11

Fabrication d'un ordinateur

Afin de considérer l'impact équivalent Carbone de la fabrication d'un ordinateur, il est nécessaire de considérer la fabrication de ses composants.

Pour ceci, nous avons utilisé des données de l'ADEME^{19 20}, consultables dans la partie [Téléchargement](http://www.ressourcesdd.info/ordi) du site <http://www.ressourcesdd.info/ordi>.

Fabrication des puces

Un chercheur de l'Université des Nations Unies, Eric Williams, a publié dans un rapport intitulé "Computers and the Environment ; understanding and managing their impacts"²¹ un article détaillant les consommations d'énergie fossile liées à la production des divers sous-ensembles intervenant dans un ordinateur personnel.

On y trouve tout d'abord les chiffres suivants relatifs à la fabrication des composants (micro-processeur, par exemple) à partir des "galettes" de silicium. La fabrication de la galette n'est pas prise en compte ; il s'agit donc de la consommation d'énergie liée à la seule production des puces à partir des galettes. L'année de référence est 2002 et il s'agit de calculs personnels de l'auteur de cette publication.

Fabrication des puces	Par puce	Total Monde	Par ordinateur
Consommation d'électricité (kWh)	2,9	52 000 000 000	281
Consommation directe de combustibles fossiles (GJ)	0,0016	28 000 000	0,155
Consommation globale de combustibles fossiles ²² (kg)	0,97	17 000 000 000	94

Tableau 1 : type et consommation d'énergie pour la fabrication de puce.

En supposant que le charbon représente 70% de la génération d'électricité, que la consommation directe de combustibles est uniquement du gaz, et enfin que le rendement des centrales est de 50%, nous arrivons à un pourcentage de 90% pour le charbon et 10% pour le gaz dans la répartition entre combustibles fossiles primaires (les 94 kg de combustibles fossiles "contenus" dans les puces d'un ordinateur se répartissent donc en 9,4 kg de gaz et le reste de charbon).

Dans la mesure où les combustibles fossiles utilisés sont donnés en unités de poids et non en unités d'énergie, il faut noter que plus la part du gaz est importante, et plus les émissions sont élevées. Cela est normal : par unité de poids les émissions de CO₂ du gaz sont supérieures à celles du charbon (car une tonne de charbon contient moins d'énergie qu'une tonne de gaz).

19 Extrait de "Bilan Carbone par l'ADEME, Avril 2005, Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées (version 3.0)"

20 Extrait de "Bilan Carbone Entreprise et collectivités par l'ADEME, Janvier 2007, GUIDE DES FACTEURS D'EMISSIONS, Version 5.0, Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées"

21 publié par Kluwers Academic Publishers, 2004

22 inclut la production de l'électricité ; les fabricants de puces sont au Japon et aux USA, où l'électricité issue de combustibles fossiles représente environ les deux tiers du total, ainsi qu'en Europe, où le fossile représente environ 50% du total.

Ainsi les hypothèses ci-dessus conduisent à surestimer le poids du charbon dans le total (car une partie de l'électricité est faite au gaz, une autre - plus modeste - au pétrole, et enfin il y a peut-être un peu de pétrole dans les consommations directes).

Il y a donc peu de chances que le mix retenu conduise à surestimer les émissions de CO₂ si les poids de combustibles "contenus" dans cette fabrication sont correctement calculés par l'auteur.

Circuits imprimés

La même référence bibliographique que ci-dessus donne ensuite des valeurs pour la fabrication des circuits imprimés qui accueilleront les composants (source EIAJ, année de référence 1997).

Fabrication des circuits imprimés	Total Monde	Par ordinateur
Consommation d'électricité (kWh)	4 670 000 000	27
Consommation directe de combustibles fossiles (litres de pétrole)	975 000 000	5,6
Consommation globale de combustibles fossiles (kg)	2 380 000 000	14

Tableau 2 : type et consommation d'énergie pour la fabrication de circuits imprimés.

Avec les mêmes hypothèses qu'au paragraphe précédent, le charbon représente 50% de l'énergie fossile primaire.

Ecrans

La même référence bibliographique que ci-dessus donne ensuite des valeurs correspondant respectivement à la fabrication des tubes cathodiques (source EIAJ, année de référence 1997), et des écrans plats (source EPA, année de référence 2002). Pour les tubes cathodiques, ce sont les données de l'industrie japonaise qui ont servi de référence.

Fabrication des tubes cathodiques	Japon 1995	Par tube
Consommation d'électricité (kWh)	914 200 000	21
Consommation directe de combustibles fossiles (litres de pétrole)	1 330 000	3
Consommation globale de combustibles fossiles (kg)	414 000	9,5

Tableau 3 : consommation d'énergie pour la fabrication de tubes cathodiques.

Pour les écrans plats, les données sont les suivantes :

Fabrication des écrans plats	Par écran plat (kg)
Consommation d'électricité (kWh)	87
Consommation directe de combustibles fossiles (98% de gaz)	198

Consommation globale de combustibles fossiles (kg) 226

Tableau 4 : consommation d'énergie pour la fabrication d'écrans plats.

Avec les mêmes hypothèses qu'au paragraphe précédent, le charbon représente respectivement 58% (tubes) et 47% (écrans plats) de l'énergie fossile primaire.

Autres constituants et total

Il reste encore à préciser les consommations de combustibles fossiles liées à la production :

- des matériaux servant à faire les boîtiers des ordinateurs et des écrans à tubes,
- des galettes de silicium pour les fondeurs de composants,
- des produits chimiques et matériaux de base (acier, plastique, verre...) utilisés pour la production des ordinateurs.

Sans précisions sur la part de l'électricité, les valeurs contenues dans la publication exploitée sont les suivantes :

Fabrication des matériaux	Kg de combustibles fossiles par ordinateur
Matériaux pour le boîtier de l'unité centrale	21
Matériaux pour le boîtier de l'écran	22
Production des galettes de silicium	17
Production des produits chimiques nécessaires	64

Tableau 5 : Kg de combustibles fossiles utilisés pour la fabrication des matériaux annexes d'un ordinateur.

La proportion de charbon dans l'énergie primaire sera supposée être de 40% pour la production des matériaux de base (qui est surtout gourmande en chaleur, donc en consommation directe de gaz). En tout état de cause la variation de ce pourcentage ne joue qu'à la marge. Avec ces diverses données nous aboutissons au total suivant pour un ordinateur de bureau à écran

Ordinateur de bureau à tube cathodique	kg combustibles	% charbon	% gaz	kg. équ. C
Composants électroniques	94	90%	10%	68,6
Circuit imprimé	14	49%	51%	11,4
Tube cathodique	9,5	58%	42%	7,5
Matériaux pour le boîtier de l'unité centrale	21	40%	60%	17,4
Matériaux pour le boîtier de l'écran	22	40%	60%	18,2
Production des produits chimiques	64	80%	20%	48,0
Production des galettes de silicium	17	20%	80%	14,8
Total	241,5			185,8

Tableau 6 : calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à tube cathodique

En première approximation, et avec un facteur d'incertitude de 30%, un ordinateur de bureau à écran cathodique se verra affecté d'un facteur d'émission de 185 kg équivalent carbone.

Notons que cette valeur ne tient pas compte des émissions d'halocarbures intervenant à l'occasion de la fabrication des composants (et qui peuvent représenter un équivalent carbone, pour certains sites, proche de ce qui est lié à la consommation directe de combustibles fossiles), des émissions liées à la chaîne de commercialisation (transport, chauffage des magasins, publicité, etc).

Une unité centrale seule pourra être créditée d'un facteur d'émission de 140 kg équivalent carbone (on déduit le tube, les matériaux pour le boîtier de l'écran, et la moitié des émissions pour les produits chimiques amont).

Pour un ordinateur à écran plat, les données deviennent alors les suivantes :

Ordinateur de bureau à écran plat	kg combustibles	% charbon	% gaz	kg. équ. C
Composants électroniques	94	90%	10%	68,6
Circuit imprimé	14	49%	51%	11,4
Ecran plat	226	47%	53%	184,3
Matériaux pour le boîtier de l'unité centrale	21	40%	60%	17,4
Production des produits chimiques	64	80%	20%	48,0
Production des galettes de silicium	17	20%	80%	14,8
Total	436			344,5

Tableau 7 : calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à écran plat

En première approximation, et avec un facteur d'incertitude de 30% également, un ordinateur de bureau à écran plat se verra affecté d'un facteur d'émission de 350 kg équivalent carbone.

démantèlement

(Source TICETHIC, http://www.ticethic.com/guide_chp170.html?lang=fr)

Les équipements à démanteler sont issus du tri effectué à l'entrepôt et regroupent les équipements qui ne peuvent ni être reconditionnés, ni réparés. Le démantèlement consiste à extraire les pièces détachées réutilisables et à assurer une dépollution et un tri efficace des autres pièces pour les envoyer en filières de valorisation.

Il est primordial que le démantèlement soit réalisé conformément aux réglementations, préserve la sécurité et la santé des travailleurs ainsi que l'environnement. L'ensemble des opérations de manipulation sont potentiellement sources de blessures, de coupures et d'inhalation de poussières. Afin d'éviter les accidents et de contrôler les émissions atmosphériques, il est recommandé d'établir une procédure qui décrive l'ensemble des gestes adaptés aux différentes opérations. Parallèlement, les employés doivent être formés aux dangers potentiels liés à la toxicité des équipements sur lesquels ils interviennent. Cette formation peut se faire via des fiches de sécurité placardées dans l'entreprise.

démantèlement des unités centrales

L'étape de démantèlement consiste à extraire les différents matériaux constitutifs des UC et à les trier en lots homogènes qui pourront être valorisés par des industries appropriées. Cependant, il n'est pas toujours nécessaire de démanteler tous les composants d'un ordinateur : certains composants envoyés dans des industries appropriées peuvent être valorisés tels quels.

Le boîtier de l'UC

Retirer le boîtier de l'unité centrale est la première opération à mener pour démanteler un ordinateur et avoir accès aux composants internes. Le boîtier doit être ensuite trié selon le type de matériau : plastique ou métal. Une fois triés, les boîtiers peuvent être mis en balles pour être expédiés à un recycleur. Cependant, du fait de la complexité de la composition des plastiques, il est souvent difficile d'identifier les types de plastiques pour les trier en catégories homogènes. Mais depuis l'édiction de la norme ISO 11469:2000, la nature des plastiques constituant les équipements récents sont identifiables via des pictogrammes. En outre, selon une étude menée par l'ADEME, les boîtiers des UC sont généralement composés de plastique ABS (acrylonitrile butadiène styrène), de plastique composite ABS/PC (polycarbonate), ou de plastique composite ABS/HIPS (high impact polystyrène).

Le boîtier d'alimentation

Le boîtier d'alimentation est constitué d'un radiateur, d'un ventilateur, d'interfaces de connexion, de câbles et connecteurs, d'un circuit imprimé et d'un transformateur. Plusieurs fils de couleurs partent du boîtier d'alimentation vers différentes pièces de l'ordinateur. Il faut dégager tous les fils qui sont reliés aux différentes pièces et retirer les quelques vis qui retiennent le boîtier d'alimentation à l'ordinateur. Il faut encore couper les connecteurs blancs avec une cisaille et couper la natte de fils afin de recycler ces derniers séparément. Certains composants comme les circuits imprimés qui contiennent des piles ou les câbles électriques externes contenant du PVC peuvent être classés comme déchets dangereux, et devraient donc être extraits et traités en conséquence.

Le disque dur

Le disque dur est constitué d'un couvercle, d'un boîtier métallique, d'un disque de données et d'une carte de circuits imprimés. Il faut retirer le couvercle d'aluminium en dévissant six à huit petites vis et faire de même avec la carte informatique qui se trouve au-dessous. Le reste des éléments constitutifs du disque peuvent être triés dans des conteneurs stockant de l'aluminium mélangé. D'autres lecteurs type CD-Rom ont une composition similaire et peuvent être démantelés de la même manière.

Les cartes informatiques

Un ordinateur contient de nombreuses cartes de circuits imprimés. La principale carte est la carte-mère : tous les composants de l'ordinateur y sont reliés. Trois types de pièces doivent être retirés de cette carte : les barrettes de mémoire, les microprocesseurs et les piles. Les piles sont des déchets dangereux et doivent subir un traitement spécifique. Les autres cartes, plus petites, sont insérées dans la carte mère, il s'agit de cartes-filles. Les cartes-filles regroupent les cartes vidéo, cartes réseau, cartes son et autres. Elles possèdent toutes au moins un connecteur et des contacts de couleur or. Toutes ces cartes, les barrettes mémoires et les microprocesseurs doivent être rassemblées en lots homogènes pour être valorisées séparément.

Les microprocesseurs

Les ordinateurs ne contiennent généralement qu'un seul microprocesseur qui est inséré dans la carte-mère. Ils mesurent généralement 5 cm par 5 cm et ont 2,5 cm d'épaisseur. Ils sont généralement recouverts d'un radiateur en aluminium et d'un ventilateur qu'il faut d'abord retirer afin de pouvoir récupérer le microprocesseur. Il est important de ne pas couper les connecteurs des fils car le microprocesseur deviendrait inutilisable.

Extraction des polluants

Au regard de la réglementation européenne, trois éléments d'une UC sont particulièrement polluants : les piles boutons, les petits condensateurs électrolytiques et les LED. La pile bouton est généralement maintenue mécaniquement ou soudée sur la carte. Elle doit être retirée de la carte-mère sans quoi, lors du broyage, elle pourrait s'ouvrir et exposer l'anode de lithium. Les petits condensateurs électrolytiques se trouvent sur les vieux circuits imprimés de gros équipements informatiques, tels que les serveurs ou les grosses imprimantes. Ils doivent être collectés séparément car ils peuvent contenir des liquides corrosifs ; c'est pourquoi les condensateurs plus grands que 25 cm² doivent être retirés avant broyage et valorisation. Enfin, les LED présentes sur certains circuits imprimés devraient être retirées à cause de la présence d'arséniure de gallium.

démantèlement des écrans

Contenu d'un écran CRT

Le tube cathodique contient de loin la plus grande quantité de substances dangereuses dans un ordinateur. Un tube cathodique d'ancienne génération peut contenir 2 à 3 kilogrammes de plomb, tandis que les tubes récents n'en contiennent généralement pas plus d'1 kilogramme. Les écrans CRT (Cathode Ray Tube) sont constitués d'un boîtier en plastique (ABS/PC) et d'un tube à

rayonnement cathodique lui-même formé d'une dalle plate, en verre au baryum, soudée par une fritte à un cône en verre au plomb, d'un canon à électrons, d'un circuit imprimé et de câbles.

La face interne de la dalle de l'écran est recouverte d'une couche fluorescente et phosphorescente, aussi connue sous le nom de luminophore, qui a la particularité d'émettre un rayonnement lumineux lorsqu'elle est excitée par un bombardement électronique. La composition de cette couche électroluminescente est variable selon les fabricants. Les luminophores sont en général composés de matériaux difficiles à recycler comme des oxydes de terres rares, du phosphore, de l'oxyde de fer, du graphite, du plomb, des silicates, des sulfures de cadmium et des tungstates de cadmium. Selon l'OCDE, le cône de l'écran contient entre 20 et 24% de plomb, l'embouchure entre 28 et 30% et la fritte environ 80%. La dalle, elle, peut contenir du plomb encapsulé dans le verre, qui peut être libéré si le verre est brisé et suite à l'érosion.

Démantèlement de l'écran CRT

En-dehors de la coque plastique, aucune opération de démantèlement d'un écran ne doit être menée sans équipements adaptés. Seules les filières industrielles possédant des équipements aptes à isoler les matériaux dangereux contenus dans les tubes sont susceptibles de traiter les écrans cathodiques.

Pour démanteler les écrans CRT, le technicien doit d'abord récupérer la coque plastique et la trier selon son pictogramme. Une fois triées, les coques peuvent être mises en balles pour être expédiées à un recycleur de plastiques. Une fois la coque enlevée, il faut couper tous les fils internes afin d'être en mesure de retirer les composants (circuits imprimés, composants métalliques, fil écran, etc.).

L'enlèvement du canon à électrons est réalisé en desserrant la vis qui le maintient sur le bout du tube à rayons cathodiques, cette opération a pour but d'éviter de casser et de percer le tube pour « mettre à l'atmosphère » et limiter les risques sanitaires et de pollution. Une fois le canon retiré, il faut continuer à enlever le reste des composants pour obtenir, à la toute fin, uniquement le tube à rayons cathodiques. Ensuite, les tubes doivent être traités dans une unité de traitement spécialement conçue pour répondre aux exigences les plus strictes en matière de protection de l'environnement, de la santé et de la sécurité au travail.

Démantèlement de l'écran plat

Les écrans LCD (Liquid Cristal Display) remplacent peu à peu les écrans CRT sur le marché. Ils sont constitués d'un boîtier plastique, d'une couche de cristal liquide comprise entre deux plaques de verre revêtues de matériaux conducteurs et de lampes à rétroéclairage contenant du mercure aussi appelées lampes à décharge. Le cristal liquide est dérivé du butylaniline, substance pouvant être considérée comme toxique pour la santé et dangereuse pour l'environnement en cas de mauvaises manipulations. Il n'existe que peu de technologies pour traiter les écrans plats, mais ils peuvent malgré tout être pris en charge par des sites de valorisation à condition d'être manipulés et traités avec des précautions particulières.

Traitement des périphériques et des câbles

Les câbles gainés

Il y a deux sortes de câbles dans un ordinateur : les connecteurs et les petits câbles colorés qui

proviennent du boîtier d'alimentation. Les connecteurs, en plastiques noir, doivent être extraits avant de récupérer les câbles. Les câbles sont donc collectés séparément et recyclés pour récupérer les métaux non-ferreux (cuivre, aluminium) qui sont alors renvoyés vers des raffineurs. Les câbles électriques isolés, comme les fils d'alimentation, doivent si possible être séparés des équipements informatiques car ils demandent un traitement particulier en raison de la gaine en PVC qui contient du chlore et qui, pour cette raison, est classée comme déchet dangereux par l'Union Européenne.

Les batteries

Les batteries utilisées dans les ordinateurs portables, en tant que déchets dangereux, doivent être extraites manuellement et triées selon leur catégorie : batterie nickel-cadmium (Ni-Cd), batterie à hydrure métallique de nickel (NiMH : corrosif) ou batterie au lithium. Certains accumulateurs au plomb sont également utilisés. Les batteries doivent être manipulées de manière à éviter les courts-circuits et courants externes intempestifs. Une fois triées, les batteries doivent être stockées en petites quantités et séparées physiquement les unes des autres afin d'éviter tout risque d'explosion ou d'incendie. Elles doivent ensuite être envoyées vers les installations spécialisées dans le traitement adéquat des batteries.

Le clavier

Un clavier est composé de plusieurs circuits imprimés et de plastique. Le clavier et les touches peuvent être de plastique ABS ou de plastique composite ABS/PC (environ 1 kg).

Valoriser les matériaux dans une filière adaptée

L'étape de valorisation suit les étapes de démantèlement et de tri. La valorisation nécessite de lourds investissements industriels pour être réalisée dans des conditions optimales de sécurité et de protection de l'environnement. Elle est souvent sous-traitée car le site de recyclage ne possède généralement pas les technologies appropriées ni les volumes suffisants pour faire tourner de telles installations. Si des composants informatiques sont enfouis ou incinérés, les substances dangereuses qu'ils contiennent peuvent engendrer des risques pour la santé et l'environnement. Ces risques peuvent être réduits grâce à des méthodes de travail appropriées, la maîtrise du processus d'incinération et l'utilisation d'outils de contrôle des émissions atmosphériques. Dans le cadre de la protection de la santé et de la sécurité, la connaissance des risques et l'implantation de mesures de contrôle et de réduction des risques sont une priorité. Pour prévenir ces risques, l'entrepreneur doit trouver les partenaires industriels les plus appropriés pour traiter et valoriser les lots homogènes de matériaux issus des opérations de démantèlement. Il doit trouver les industries offrant les meilleurs avantages économiques et écologiques.

Les plastiques

Après l'extraction des matières et dans l'objectif de réduire les coûts logistiques, il est possible de réduire les volumes en utilisant des outils tels que des presses à balles pour les plastiques et le carton. La mise en balle ne demande ni compétences particulières ni équipements onéreux, et les machines peuvent être achetées d'occasion. Pour de grands volumes, il est possible d'utiliser un broyeur tel qu'un granulateur. Après identification et homogénéisation, les plastiques seront expédiés pour valorisation sous forme de balles pesant environ 150 kg. C'est une étape intéressante pour les recycleurs car elle génère des lots de matériaux homogènes qui peuvent être négociés à bon

prix avec les recycleurs industriels. Même s'il existe un marché des plastiques recyclés, il est entravé par de nombreux obstacles. Le premier est la présence de produits retardateurs de flammes (brome) dans de nombreux équipements informatiques, réduisant l'homogénéité des plastiques et interdisant leur recyclage, ces substances étant désormais interdites pour la fabrication de nouveaux équipements. Le second est la présence d'étiquettes et de pièces métalliques fixées sur les pièces plastiques qui minorent également la qualité du produit. C'est pourquoi il est dans l'intérêt de l'entrepreneur de mener correctement les opérations de démantèlement afin de constituer des lots de plastiques homogènes et de grande qualité, qui pourront être revendus au meilleur prix.

Les métaux

Pour maximiser ses profits, l'entrepreneur a également intérêt à vendre des lots de métal aussi homogènes que possible. Le fer contenu dans la structure de l'UC représente la plus grande quantité de métal utilisé dans un ordinateur. Il peut être vendu à des ferrailleurs, des aciéristes ou des négociants. Les équipements informatiques contiennent également des métaux non-ferreux comme le cuivre (jusqu'à 1,5 kg) et l'aluminium, ou le plomb et l'étain en plus petites quantités. Ces métaux, cependant, sont souvent mélangés à d'autres composants comme les circuits imprimés et leur séparation nécessite l'utilisation de technologies avancées. La valorisation des métaux reste malgré tout très intéressante pour l'entrepreneur car il peut les revendre en lots homogènes ou mélangés.

Les circuits imprimés

Dans un ordinateur usagé, les circuits imprimés font partie des composants ayant le plus de valeur. Ils peuvent d'une part contenir des éléments qui peuvent être extraits et revendus pour réemploi, mais ils contiennent avant tout des métaux de valeur qui peuvent être revendus à une fonderie. Pour optimiser la valeur de ces cartes, il est nécessaire de les trier selon la quantité de métaux précieux qu'elles comportent. Leur prix dépend du marché des métaux précieux, de l'homogénéité des lots et de la quantité. La valorisation des circuits imprimés doit être réalisée par des industries spécialisées, afin de prévenir tout risque pour la santé et l'environnement. Certains circuits imprimés comme les circuits d'alimentation et les circuits placés dans les écrans contiennent en moyenne moins de 100 g d'or par tonne : ce sont des « cartes pauvres ». D'autres cartes comme les cartes graphiques, les cartes audio, les cartes réseau contiennent beaucoup plus de métaux précieux : ces « cartes riches » peuvent contenir entre 400 et 500 g d'or par tonne et sont souvent issues d'ordinateurs portables et de téléphones portables. Les « cartes très riches », contenant plus de 500 g d'or par tonne, proviennent de serveurs informatiques ou de centres téléphoniques.

Une fois à la fonderie, les différents métaux (or, cuivre, argent, selenium, tellurium, plomb, palladium etc.) sont valorisés grâce à des processus industriels. Considérant la complexité des technologies utilisées et leur fort potentiel de pollution, l'entrepreneur doit veiller à vendre ses circuits imprimés à des industries aptes à mener les opérations de valorisation dans le respect de l'environnement.

Les batteries

Les batteries et accumulateurs ne sont pas nécessairement dangereux en l'état. Leur contenu, cependant, peut avoir un impact sur l'environnement. C'est pourquoi, l'entreprise doit assurer la sécurité de l'aire de stockage avant tout traitement.

Dans un ordinateur, la pile bouton est souvent composée d'une anode de lithium. Du lithium exposé à l'oxygène ou à l'humidité de l'air peut générer de la chaleur et potentiellement du gaz d'hydrogène, et un incendie peut donc survenir pendant les opérations de broyage. Une pile bouton au lithium peut être valorisée après qu'elle ait été complètement déchargée afin d'éliminer tout potentiel de réactivité pendant les phases de broyage et de séparation gravitaire. Il est donc conseillé à l'entrepreneur de revendre ces batteries à des industries qui possèdent les équipements et les technologies adéquates et nécessaires à leur valorisation. Certaines batteries, toutefois, n'ont aucune valeur et l'entrepreneur sera responsable financièrement de leur bon recyclage.

Les câbles

Les câbles peuvent être broyés avant d'être envoyés vers des industries spécialisées dans la séparation des fragments de cuivre et de leur gaine plastique. Ces industries utilisent généralement divers processus physiques pour séparer ces matériaux, afin d'obtenir des lots de cuivre et de plastiques parfaitement homogènes. Les câbles ou résidus de câbles peuvent également être incinérés dans des installations équipées pour éviter toute formation de substances nocives comme les di-benzofuranes chlorés et les di-benzodioxines.

Les tubes cathodiques

Il est vivement conseillé à l'entrepreneur de laisser à des entreprises spécialisées la responsabilité de traiter les tubes. Cependant, l'entrepreneur peut envisager d'investir dans une unité industrielle de séparation mécanique du verre conique (contenant du plomb lixiviable), et du verre plat (contenant du plomb dans sa matrice). Une telle installation permet de réaliser la découpe des tubes tout en protégeant les opérateurs de l'inhalation de poussières et en contrôlant de manière efficace les émissions dans l'air. L'installation doit être équipée pour nettoyer le verre et récupérer les couches électroluminescentes. Le personnel effectuant la séparation mécanisée du verre doit être protégé contre l'inhalation des poussières provoquées par la rupture du tube et qui sont susceptibles de contenir du plomb, de l'oxyde de baryum ou des matières phosphorescentes. C'est pourquoi des processus humides sont souvent utilisés. Une fois les terres rares récupérées, les verres au plomb et au baryum peuvent être envoyés vers des filières industrielles de valorisation spécialisées, après analyse des concentrations de plomb.

Il existe deux manières de valoriser le verre des CRT. La première concerne les industries fabriquant de nouveaux écrans cathodiques à partir de verre CRT recyclé. Ces industries demandent souvent que le verre de la dalle soit séparé du verre du cône, pour leur permettre de bien doser les quantités de plomb voulues dans le produit. L'autre solution consiste à acheminer le verre vers les fonderies de plomb qui utilisent le verre comme fondant dans leur procédé et récupèrent le plomb contenu dans le verre.

Les canons à électrons

Le canon à électrons d'un écran CRT contient un piège à gaz (environ 1 à 2 grammes, châssis compris), du baryum et des dérivés du baryum (l'oxyde de baryum est considéré comme une substance nocive). Durant les opérations de broyage, le piège à gaz est susceptible de relâcher des poussières de baryum nocives. En conséquence, plusieurs pays imposent qu'il soit retiré. Une fois retiré, le piège à gaz doit être stocké séparément, éloigné de toute source d'humidité car le baryum est aisément lessivable et soluble. Les pièges à gaz doivent être envoyés vers un incinérateur équipé de systèmes aptes à protéger l'environnement. Le canon à électron en lui-même peut être envoyé à

un ferrailleur qui pourra valoriser le cuivre qu'il contient.

Les écrans plats

La Directive DEEE demande que les écrans LCD dont la surface excède 100 cm² soient gérés séparément, ainsi que tous les écrans rétro-éclairés par des lampes à décharges, car elles contiennent du mercure. Selon un document rédigé par le groupe de travail de l'OCDE sur la prévention des déchets et le recyclage, intitulé « Manuel d'application pour la gestion écologique des déchets », les écrans plats peuvent être envoyés à une fonderie pour la valorisation des métaux non-ferreux, à la condition que l'industriel soit équipé d'un système de traitement des fumées qui minimise l'émission de dioxines, et garantit la séparation ou la neutralisation du mercure. Les écrans plats doivent être traités avec des processus de valorisation ou de traitement thermique dans des incinérateurs autorisés et équipés de système de protection de l'environnement, notamment des systèmes modernes de filtration des fumées. Après l'extraction des lampes à décharges, celles-ci devraient être envoyées vers des installations spécialisées dans la valorisation du mercure ou vers des incinérateurs de déchets dangereux autorisés et équipés de systèmes modernes de filtration des fumées.

Contrôle des pollutions et élimination

Au sein d'un ordinateur, certains composants ne peuvent être recyclés. Ces composants, surtout des plastiques et des résines contenant des retardateurs de flamme, doivent être incinérés ou enfouis d'une manière qui préserve l'environnement. Cependant, dans certains pays, l'enfouissement de déchets est interdit. Selon la Convention de Bâle, ces matériaux doivent préférentiellement être valorisés énergétiquement, plutôt qu'enfouis ou incinérés sans valorisation thermique. L'incinérateur doit donc être conçu de manière à limiter la formation et l'émission de furanes et de dioxines, et doit être équipé avec des systèmes de filtration des fumées modernes. Les cendres résultant de la combustion des matériaux, ou les matériaux ne pouvant être valorisés « devraient être gérés d'une manière qui soit compatible avec la protection de l'environnement, quel que soit le lieu où ils sont éliminés ».