



**ADEME**

**Analyse comparée des impacts environnementaux  
de la communication par voie électronique**

**Volet Clé USB :  
Synthèse**

Juillet 2011

Bio Intelligence Service - La mesure du développement durable  
Ecologie industrielle - Santé nutritionnelle

Bio Intelligence Service S.A.S. - [bio@biois.com](mailto:bio@biois.com)  
20-22 Villa Deshayes - 75014 Paris - France  
Tél. +33 (0)1 53 90 11 80 - Fax. +33 (0)1 56 53 99 90

Contact Bio Intelligence Service S.A.S.

Yannick Le Guern/Laura Farrant

+ 33 (0)1 53 90 11 80

[yannick.leguern@biois.com](mailto:yannick.leguern@biois.com)

[laura.farrant@biois.com](mailto:laura.farrant@biois.com)

# Synthèse

## Contexte et objectifs de l'étude

Dans un contexte de forte croissance du secteur des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), l'ADEME souhaite **améliorer ses connaissances sur les impacts environnementaux engendrés par la communication électronique** et inciter à des comportements plus respectueux de l'environnement. Pour cela, l'ADEME s'intéresse en particulier à l'utilisation du courrier électronique, aux requêtes effectuées sur Internet, aux achats en ligne et à l'utilisation de support de transmission de documents de type clés USB.

Cette étude a pour objectif **d'évaluer les impacts environnementaux liés à l'échange d'informations par clé USB.**

Les bilans environnementaux réalisés dans cette étude sont établis selon la méthodologie des Analyses de Cycle de Vie (ACV) suivant les normes ISO 14040 et 14044. Pour valider la conformité de cette étude avec la série des normes ISO 14040, celle-ci a fait l'objet d'une **revue critique** réalisée par plusieurs experts indépendants.

## Unité fonctionnelle et Frontières du système

Le système étudié est destiné à être représentatif de l'échange d'informations via clé USB notamment dans un contexte professionnel. Il en effet courant de remettre des clés USB lors d'évènements type colloques ou salons. Le contexte choisi est donc celui d'une conférence avec présentation à la suite de laquelle des documents type rapports d'études sont remis au public sous forme numérique, via une clé USB. Dans les scénarios étudiés, la taille du document transmis est fixée à 10 Mo (200 pages en format PDF). L'étude propose aussi un comparatif avec la transmission du même document gravé sur un CD ou imprimé et remis de main à main.

Pour interpréter les résultats, on introduit une référence servant à exprimer le bilan matières et énergies du cycle de vie de chaque système. C'est l'unité fonctionnelle du bilan environnemental. Elle permet de quantifier les résultats d'une étude ACV par rapport au service rendu. Pour la clé USB, le service rendu est l'échange d'informations entre plusieurs personnes. L'unité fonctionnelle est donc la suivante :

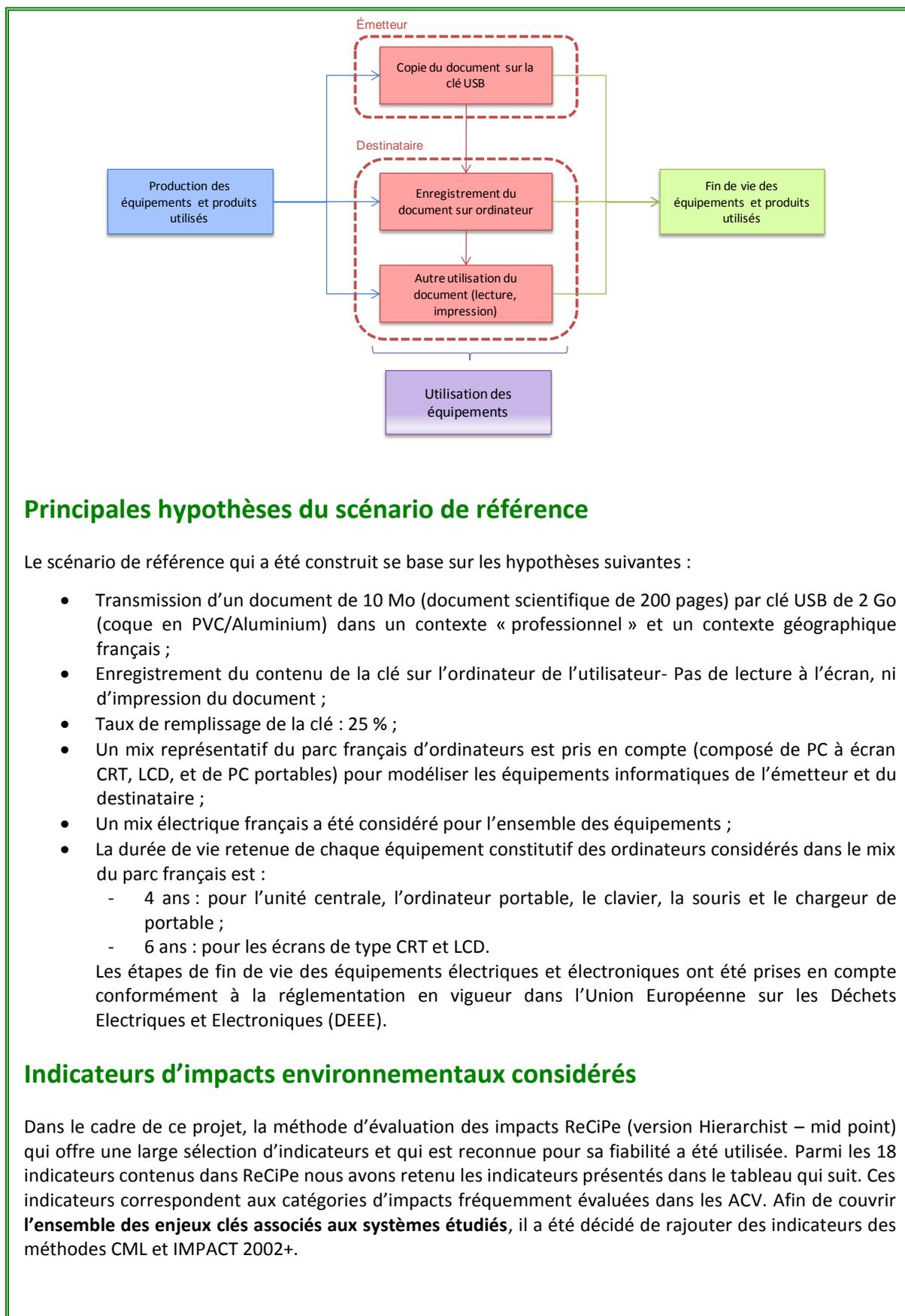
« Transmettre un document de 10 Mo à une personne »

Pour évaluer les impacts environnementaux de l'échange d'informations par clé USB, les phases suivantes ont été considérées :

- Fabrication des équipements électriques et électroniques (circuits intégrés, composants...) ;
- Copie du document sur la clé USB par l'émetteur ;
- Utilisation des éléments reçus (lecture à l'écran, enregistrement ou impression) ;

Le temps nécessaire à l'élaboration du document n'est pas pris en compte car dans le cadre du scénario choisi le document transmis n'a pas nécessairement été rédigé par la personne transmettant le document.

Une modélisation du système par « blocs » a été établie en fonction des étapes principales du cycle de vie de la transmission d'information par clé USB : bloc émetteur (créateur du document) et bloc destinataire qui reçoit la clé USB.



## Principales hypothèses du scénario de référence

Le scénario de référence qui a été construit se base sur les hypothèses suivantes :

- Transmission d'un document de 10 Mo (document scientifique de 200 pages) par clé USB de 2 Go (coque en PVC/Aluminium) dans un contexte « professionnel » et un contexte géographique français ;
- Enregistrement du contenu de la clé sur l'ordinateur de l'utilisateur- Pas de lecture à l'écran, ni d'impression du document ;
- Taux de remplissage de la clé : 25 % ;
- Un mix représentatif du parc français d'ordinateurs est pris en compte (composé de PC à écran CRT, LCD, et de PC portables) pour modéliser les équipements informatiques de l'émetteur et du destinataire ;
- Un mix électrique français a été considéré pour l'ensemble des équipements ;
- La durée de vie retenue de chaque équipement constitutif des ordinateurs considérés dans le mix du parc français est :
  - 4 ans : pour l'unité centrale, l'ordinateur portable, le clavier, la souris et le chargeur de portable ;
  - 6 ans : pour les écrans de type CRT et LCD.

Les étapes de fin de vie des équipements électriques et électroniques ont été prises en compte conformément à la réglementation en vigueur dans l'Union Européenne sur les Déchets Electriques et Electroniques (DEEE).

## Indicateurs d'impacts environnementaux considérés

Dans le cadre de ce projet, la méthode d'évaluation des impacts ReCiPe (version Hierarchist – mid point) qui offre une large sélection d'indicateurs et qui est reconnue pour sa fiabilité a été utilisée. Parmi les 18 indicateurs contenus dans ReCiPe nous avons retenu les indicateurs présentés dans le tableau qui suit. Ces indicateurs correspondent aux catégories d'impacts fréquemment évaluées dans les ACV. Afin de couvrir **l'ensemble des enjeux clés associés aux systèmes étudiés**, il a été décidé de rajouter des indicateurs des méthodes CML et IMPACT 2002+.

Indicateur	Unité	Méthode
Potentiel de changement climatique	g éq. CO <sub>2</sub>	ReCiPe
Potentiel de déplétion de la couche d'ozone	g éq.CFC-11	ReCiPe
Potentiel d'oxydation photochimique	g NMVOC	ReCiPe
Potentiel de formation de matière particulaire	g éq.PM10	ReCiPe
Potentiel de radiation ionisante	g éq.U235	ReCiPe
Potentiel d'acidification terrestre	g éq.SO <sub>2</sub>	ReCiPe
Potentiel d'eutrophisation en eau douce	g éq.P	ReCiPe
Potentiel d'eutrophisation marine	g éq.N	ReCiPe
Epuisement potentiel des métaux	g éq.Fe	ReCiPe
Epuisement potentiel des ressources fossiles	g éq.pétrole	ReCiPe
Epuisement potentiel des ressources naturelles :	g éq.Sb	CML
- Métaux rares	g éq.Sb	CML
- Ressources énergétiques	g éq.Sb	CML
Consommation d'énergie primaire non-renouvelable	MJ primaire	IMPACT 2002+
Consommation d'énergie primaire renouvelable	MJ primaire	IMPACT 2002+
Potentiel de toxicité humaine	g éq.1,4-DB	CML
Potentiel d'écotoxicité en eau douce	g éq.1,4-DB	CML
Potentiel d'écotoxicité marine	g éq.1,4-DB	CML
Potentiel d'écotoxicité terrestre	g éq.1,4-DB	CML
Potentiel d'écotoxicité sédimentaire	g éq.1,4-DB	CML

## Sources des données

L'ensemble des données nécessaires à la modélisation des équipements par lesquels transitent les flux d'information mis en œuvre lors de la transmission d'un document par clé USB, ainsi que l'utilisation qui peut en être faite (enregistrement, impression...) est issues d'importantes recherches bibliographiques et d'une collecte de données d'industriels (type de composants, procédés de fabrication...). Pour les données techniques sur la clé USB non disponibles, des données génériques ont été utilisées en substitution (base de données Ecolnvent, pesée, ...).

## Représentativité des données

Les données rassemblées pour évaluer l'impact de la phase de production des équipements et produits utilisés sont représentatives des technologies récentes (2000 à 2007) utilisées en Europe, et dans le monde.

L'étude se base sur un contexte professionnel en France. Un contexte géographique français a donc été considéré pour l'émetteur et le récepteur. La consommation d'électricité étant l'un des enjeux principaux associés aux nouvelles technologies de l'information, il est important que l'inventaire de cycle de vie utilisé pour modéliser la production d'électricité soit représentatif du contexte géographique et temporel considéré: les consommations d'électricité sont donc modélisées par le modèle énergétique français pour tous les équipements personnels (ordinateurs, écrans,...). Les scénarios de gestion en fin de vie retenus pour ces équipements sont aussi représentatifs du contexte français.

## Scénarios alternatifs étudiés

Plusieurs scénarios ont été construits : un scénario de référence correspondant à la « transmission d'un document de 10 Mo par clé USB », ainsi que des scénarios alternatifs modélisés afin d'étudier l'influence de différents paramètres.

Ces scénarios alternatifs, présentés ci-après, permettent d'évaluer la portée des conclusions obtenues en étudiant la sensibilité des résultats à la variation de certains paramètres clés. Les paramètres analysés sont les suivants :

- Composition de la coque : la coque de la clé USB peut être faite d'une multitude de matériaux. Pour cette analyse, six ont été retenus : l'acier, l'aluminium, le PVC, l'ABS, le bambou et le caoutchouc.
- Composition interne : nombre de composants discrets (résistances, condensateurs, transistors et LEDs) et taille du circuit imprimé.
- Capacité de la clé : ce paramètre influence le coefficient d'allocation qui détermine la « part » de la clé qui est sollicitée pour la transmission du document considéré.
- Taux de remplissage de la clé : ce paramètre influence le coefficient d'allocation qui détermine la « part » de la clé qui est sollicitée pour la transmission du document considéré.
- Mix énergétique considéré pour l'ordinateur de l'utilisateur : il s'agit du modèle énergétique utilisé pour modéliser la production d'électricité. Pour un pays donné, il correspond à la proportion des différentes sources dans la production d'énergie (nucléaire, charbon,...). Deux variantes avec des mix énergétiques « Europe » et « Monde » ont été retenues pour les analyses de sensibilité.
- Comportement du destinataire : lecture à l'écran, impression du document.

## Résultats obtenus pour le scénario de référence

Les tableaux ci-après présentent les résultats de l'étude en termes d'impacts potentiels pour l'unité fonctionnelle retenue – Transmettre un document de 10 Mo à une personne.

Les résultats pour les 20 indicateurs d'impact potentiel sont présentés par étape du cycle de vie de la clé USB : production, assemblage, transport, utilisation et fin de vie. La phase d'utilisation regroupe l'ensemble des étapes associées à la copie du document transmis sur la clé et à l'utilisation du document par le destinataire. Les impacts associés à la production et à la fin de vie de l'ordinateur utilisé sont donc compris au sein de la phase d'utilisation.

Méthode et Indicateur		Unité	TOTAL	Production	Assemblage	Transport	Utilisation	Fin de vie
ReCIPE	Potentiel de réchauffement climatique	g éq. CO <sub>2</sub>	10,8	77%	1%	1%	24%	-2%
	Potentiel de déplétion de la couche d'ozone	µg éq. CFC-11	1,43E-06	57%	0%	1%	42%	-1%
	Potentiel d'oxydation photochimique	mg NMVOC	0,0406	83%	1%	3%	21%	-7%
	Potentiel de formation de matière particulaire	mg éq. PM <sub>10</sub>	0,0341	90%	1%	1%	13%	-6%
	Potentiel de radiation ionisante	g éq. <sup>235</sup> U	8,12	54%	0%	0%	47%	-1%
	Potentiel d'acidification terrestre	mg éq. SO <sub>2</sub>	0,127	91%	0%	1%	11%	-3%
	Potentiel d'eutrophisation en eau douce	mg éq. P	2,23E-03	84%	0%	0%	16%	-1%
	Potentiel d'eutrophisation marine	mg éq. N eq	0,0105	39%	0%	1%	63%	-3%
	Epuisement potentiel des métaux	g éq. Fe	5,89	104%	15%	0%	27%	-46%
	Epuisement potentiel des ressources fossiles	g éq. pétrole	3,03	80%	1%	1%	20%	-2%

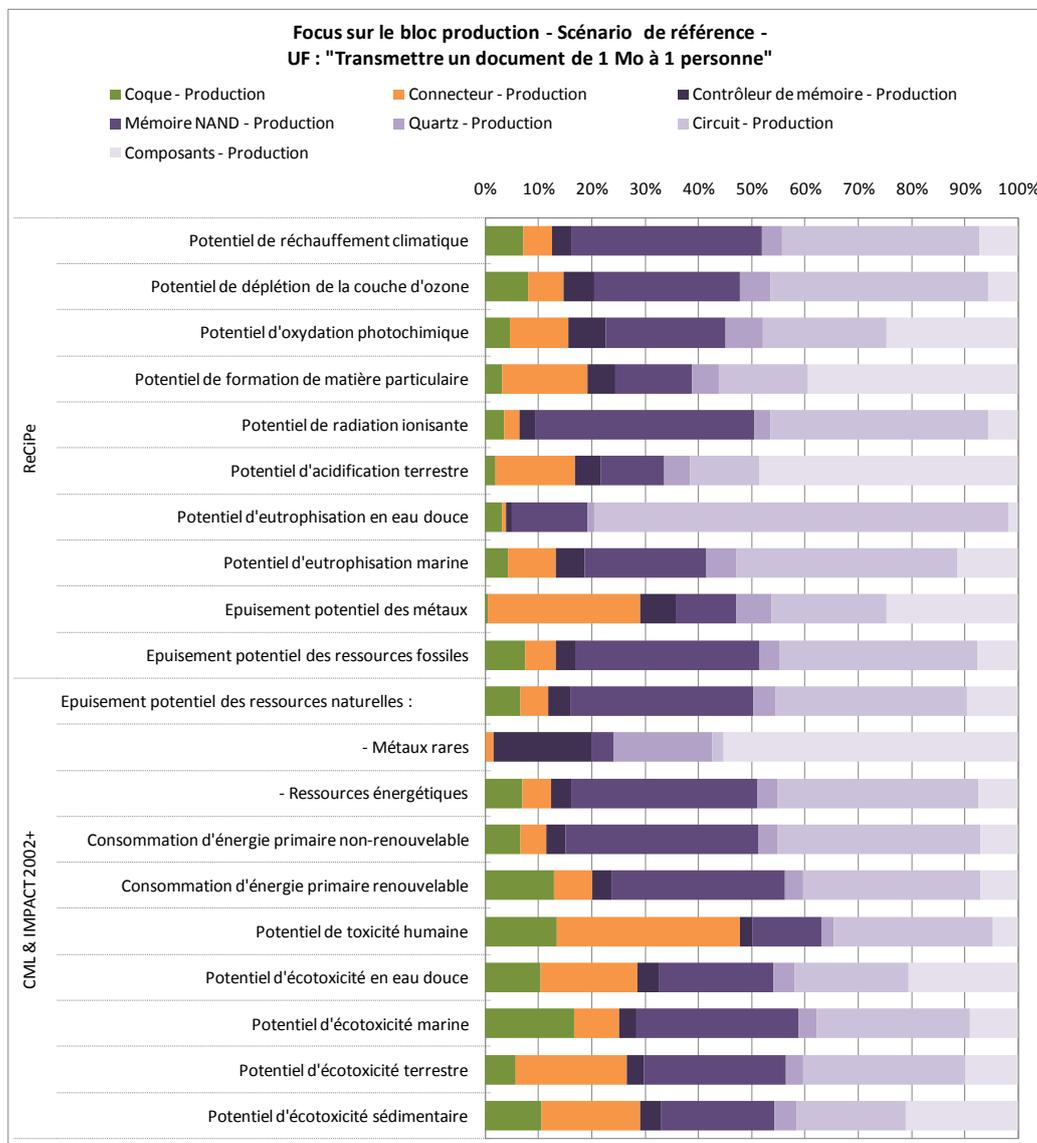
Méthode et Indicateur		Unité	TOTAL	Production	Assemblage	Transport	Utilisation	Fin de vie
CMIL & IMPACT 2002+	Epuisement potentiel des ressources naturelles :	mg éq. Sb	75,1	81%	1%	1%	20%	-3%
	- Métaux rares	mg éq. Sb	1,09	101%	0%	0%	13%	-13%
	- Ressources énergétiques	mg éq. Sb	72,0	80%	1%	1%	20%	-2%
	Consommation d'énergie primaire non-renouvelable	MJ primaire	0,211	71%	1%	1%	30%	-2%
	Consommation d'énergie primaire renouvelable	MJ primaire	0,0126	78%	1%	0%	27%	-6%
	Potentiel de toxicité humaine	g éq. 1,4-DB	16,3	88%	1%	0%	19%	-7%
	Potentiel d'écotoxicité en eau douce	g éq. 1,4-DB	5,44	36%	0%	0%	21%	42%
	Potentiel d'écotoxicité marine	kg 1,4-DB eq	13,8	52%	0%	0%	47%	1%
	Potentiel d'écotoxicité terrestre	mg 1,4-DB eq	122	85%	1%	0%	19%	-4%
	Potentiel d'écotoxicité sédimentaire	g 1,4-DB eq	13,2	34%	0%	0%	21%	44%

L'impact de la **production de la clé USB prédomine pour tous les indicateurs**. Ces résultats illustrent ainsi l'importance de l'étape de production des composants électroniques. On observe notamment que la totalité de la contribution à l'indicateur d'épuisement potentiel des métaux provient de l'étape de production des composants de la clé USB.

Les impacts potentiels associés à la phase d'utilisation de la clé USB sont associés à la **sollicitation de l'ordinateur pour la copie et l'enregistrement du document**. C'est essentiellement l'étape de production de l'ordinateur qui est à l'origine des impacts observés.

• **Focus sur la phase « production »**

La figure qui suit présente le détail de la contribution de la production de ces sept éléments constitutifs d'une clé USB : coque, connecteur, circuit imprimé, contrôleur, mémoire NAND, quartz et composants discrets (résistances, condensateurs et transistors).



**Les éléments électroniques contribuent largement à la plupart des impacts**, notamment au potentiel de radiation ionisante, au potentiel d'eutrophisation en eau douce, et à l'épuisement potentiel des métaux rares.

## Normation

La normation permet de hiérarchiser les impacts potentiels sur l'environnement et de faciliter l'appréhension de l'ampleur des dommages ou des bénéfices en rapportant les indicateurs d'impact à une unité commune, l'équivalent habitant. Ce processus de normation consiste à ramener les impacts potentiels générés tout au long du cycle de vie aux impacts générés par un européen en 1 année.

Le tableau suivant présente les impacts de 10 000 000 Unités Fonctionnelles normés par les impacts générés par un habitant Européen en un an pour les deux scénarios. Les indicateurs avec des impacts mineurs apparaissent en jaune, ceux avec un impact moyen en orange et ceux avec un impact majeur en rouge.

	Indicateur	Valeur de référence par an et par habitant		Résultats normés pour le scénario de référence (pour 10 000 000 d'UF)
ReCiPe	Potentiel d'eutrophisation en eau douce	0.25	kg éq P	88
	Epuisement potentiel des métaux	714	kg éq Fe	82
	Potentiel d'acidification terrestre	34	kg éq SO2	37
	Potentiel de formation de matière particulaire	15	kg éq PM10	22.9
	Epuisement potentiel des ressources fossiles	1 901	kg éq pétrole	16.0
	Potentiel de radiation ionisante	6 250	kg éq U235	13.0
	Potentiel de réchauffement climatique	11 236	kg éq CO2	9.7
	Potentiel d'eutrophisation marine	12	kg éq N	8.4
	Potentiel d'oxydation photochimique	56	kg éq NMVOC	7.2
	Potentiel de déplétion de la couche d'ozone	0.022	kg éq CFC-11	0.6
CML & IMPACT 2002+	Potentiel d'écotoxicité sédimentaire	415	kg éq 1,4-DB	318
	Potentiel d'écotoxicité en eau douce	210	kg éq 1,4-DB	259
	Potentiel de toxicité humaine	2 800	kg éq 1,4-DB	58
	Potentiel d'écotoxicité terrestre	70	kg éq 1,4-DB	17.4
	Epuisement potentiel des ressources naturelles	60	kg éq Sb	12.5

	Impacts supérieurs à 100 équivalents habitant
	Impacts compris entre 30 et 100 équivalents habitant
	Impacts inférieurs à 30 équivalents habitant

Parmi les indicateurs ReCiPe, les enjeux environnementaux principaux sont : **l'épuisement potentiel des métaux, le potentiel d'eutrophication en eau douce et marine, le potentiel d'acidification terrestre.** Parmi les indicateurs CML et IMPACT 2002+, les indicateurs relatifs au **potentiels d'écotoxicité en eau douce et sédimentaires** et au **potentiel de toxicité humaine** ressortent comme prioritaires. Cependant il est important de rappeler qu'une grande incertitude est liée aux indicateurs de toxicité.

## Conclusions

### RESULTATS DE L'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

#### QUELS SONT LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET CHIFFRES CLES ?

La normation des résultats a permis de mettre en lumière les enjeux environnementaux relatifs à la transmission d'information par clé USB. Il s'agit de :

- **L'épuisement potentiel des métaux:** cet indicateur reflète l'enjeu lié à l'emploi de métaux rares (cuivre, aluminium et métaux rares) dans l'industrie électronique. **L'équivalent de 6 g de fer** [5 – 8 g éq. Fe] sont potentiellement consommés dès lors que l'on transmet un document de 10 Mo à une personne grâce à une clé USB. Ainsi, la contribution à l'épuisement des métaux liée à la transmission d'un document de 10 Mo à 1000 personnes à l'occasion d'un colloque par exemple équivaut à la masse d'environ 200 canettes de boisson en

fer blanc.

- **Le potentiel d'eutrophisation en eau douce** : la contribution à cet indicateur est associée à consommation d'eau nécessaire à la fabrication des « galettes » des circuits imprimés de la clé USB.  
L'équivalent de 2 g de phosphate [1.5 – 3.7 g éq. P] sont potentiellement émis dans l'eau dès lors que l'on transmet un document de 10 Mo à 1 000 personnes grâce à une clé USB.
- **Le potentiel d'acidification terrestre** : cet indicateur ressort comme un enjeu significatif du fait des émissions de dioxyde de soufre lors de la production des composants électroniques.  
L'équivalent de 1,30 g de SO<sub>2</sub> [0.9 – 1.5 g éq. SO<sub>2</sub>] sont émis dans l'air dès lors que l'on transmet un document de 10 Mo à 1 000 personnes grâce à une clé USB.

Il ressort de l'étude que transmettre un document de 10 Mo à 1 personne par clé USB équivaut à l'émission d'environ 11 g d'équivalent CO<sub>2</sub>. Ainsi, les émissions correspondant à la transmission d'un document de 10 Mo à 1000 personnes à l'occasion d'un colloque par exemple représentent les mêmes impacts potentiels sur le changement climatique qu'un trajet d'un peu plus de 80 kilomètres en voiture.

Il faut noter que les résultats obtenus sont étroitement liés à l'estimation de la « part » de la clé USB allouée à la transmission du document considéré, qui dépend de la capacité de la clé USB et de son taux de remplissage.

Par ailleurs il est important de rappeler que la réutilisation possible de la clé USB n'a pas été prise en compte. En effet nous nous sommes placés dans le cadre d'une distribution de la clé lors d'un colloque et avons donc considéré que la clé est dédiée à la transmission des documents en relation avec le colloque. Dans le cas où la clé serait amenée à être réutilisée ultérieurement, les impacts associés à la transmission d'un document seraient moindres.

### **D'OU VIENNENT LES IMPACTS?**

L'étape de production de la clé USB apparaît comme l'étape du cycle de vie la plus contributrice au bilan environnemental de la transmission d'informations par clé USB. Le second poste est la **production de l'ordinateur** sollicité dans le cadre de la phase d'utilisation de la clé USB. En effet, les procédés de fabrication des éléments électroniques à la fois de la clé USB et de l'ordinateur utilisé sont hautement consommateurs d'énergie, d'eau et de métaux rares, ce qui explique le fort impact de ces éléments sur la plupart des indicateurs.

Par ailleurs dès lors que l'utilisateur lit à l'écran le document transmis ou l'imprime, les impacts potentiels associés à l'étape de transmission du document deviennent négligeables en comparaison des impacts associés à l'utilisation du document.

### **QUELS SONT LES PARAMETRES CLES?**

Les analyses de sensibilité ont mis en avant que les résultats sont sensibles à différents paramètres. Le tableau présente les différents paramètres étudiés en fonction de leur influence sur les résultats. Il apparaît que les paramètres les plus sensibles sont : **le comportement du destinataire, la capacité et le taux de remplissage de la clé.**

Paramètre	Scénario « Acheter en ligne un produit »
Influence du comportement du destinataire (lecture à l'écran, impression du document)	+++
Influence de la capacité de la clé	+++
Influence du taux de remplissage de la clé	+++
Influence de la composition de la coque	++
Influence de la composition interne (nombre de composants discrets, taille du circuit imprimé)	++
Influence du mix énergétique	+
+++ Effet majeur ; ++ Effet moyen ; + Effet mineur ; ≈ Pas d'effet notable	

### REDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ASSOCIE A L'UTILISATION D'UNE CLE USB

Afin de limiter ou réduire l'impact environnemental associé à la transmission d'un document par clé USB, l'enjeu est d'optimiser le ratio entre la taille du circuit imprimé et le nombre de composants électronique d'une part et la capacité de la clé USB d'autre part. En effet, les composants électroniques ayant un impact environnemental important, **il est préférable d'opter pour une clé USB offrant une large capacité de stockage pour une taille physique minimale.**

Par ailleurs **la réutilisation de la clé est à encourager** puisque plus la quantité de données transitant par la clé sur sa durée de vie est élevée, plus l'impact de la production sera amorti sur le nombre de ces documents.

### LIMITES ET INCERTITUDES DE L'ETUDE

Les données spécifiques sont peu disponibles en ce qui concerne la clé USB. En effet, aucun fabricant n'a pu être contacté. La modélisation du système « clé USB » est donc basée sur des hypothèses formulées par BIO.

La variabilité des matériaux utilisés pour fabriquer la coque, des tailles physiques de clés USB ainsi que de leurs capacités sont autant d'éléments qui font obstacles à la modélisation d'une clé USB « typique ».

En ce qui concerne l'impression du document, ainsi que la comparaison du scénario de référence avec la transmission d'un document imprimé, la modélisation de l'imprimante comprend un paramètre dont l'influence est importante sur l'impact de son utilisation : le nombre d'impressions durant le cycle de vie de l'imprimante. Les hypothèses pour l'amortissement des équipements est, de manière générale, un limite de l'étude.

Les résultats présentés sont par ailleurs issus des calculs réalisés en utilisant les modèles de la méthode d'évaluation des impacts Recipe et CML. Les impacts évalués sont des impacts potentiels (maximum) puisqu'aucune différenciation spatiale et temporelle n'est considérée. Les résultats de l'évaluation environnementale sont des expressions relatives qui ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, des marges de sécurité ou les risques. À ce titre, ces résultats ne doivent pas constituer l'unique base d'affirmation comparative destinée à être divulguée au public, dans la mesure où des informations supplémentaires seraient nécessaires pour remédier à certaines des limitations propres aux méthodes d'évaluation des impacts.