



**HAL**  
open science

## Green IT - Le matériel de l'immatériel

Olivier Ridoux

► **To cite this version:**

Olivier Ridoux. Green IT - Le matériel de l'immatériel. École d'ingénieur. France. 2020. hal-02492252

**HAL Id: hal-02492252**

**<https://hal.science/hal-02492252v1>**

Submitted on 11 Mar 2020

**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.

Le développement TIC, elles auront de plus en plus besoin de responsables chargés de mettre en œuvre une politique Green IT.

On découvre alors les risques et les opportunités que représentent les TIC pour le développement durable, avec cependant une asymétrie. Les risques se réalisent particulièrement lorsque le développement des TIC n'est pas contrôlé, alors que les opportunités ne se réalisent que lorsque ce développement est contrôlé.

Le Green IT est l'étude des technologies de l'information et de la communication (TIC) ou Information Technology - IT sous l'angle du développement durable (voir au dos). Les premières ont un développement qui est proprement exponentiel, et donc insoutenable à long terme, alors que le second se préoccupe juste-

# Green IT

## le matériel de l'immatriel

Oliver Ridoux - 2020

### Le développement exponentiel des TIC

Qu'est-ce qu'un développement exponentiel ? Le terme de exponentiel est trop souvent galvaudé pour dire beaucoup, ou pour évoquer un développement incontrôlé. Dans le cas des systèmes TIC on peut l'employer en son sens le plus rigoureux : un système a un développement exponentiel si une mesure de son développement est multipliée par une constante à intervalles de temps réguliers : si la mesure vaut 1 au temps t, elle vaudra k au temps t+1, k^2 au temps t+2, et k^n (soit e^{n ln k}) au temps t+n.

La plus fameuse des lois exponentielles de l'informatique est la loi de Moore : « La puissance des circuits intégrés double tous les 18 mois ». Il s'agit d'une loi empirique, une conjecture, postulée par Gordon Moore, co-fondateur de la société Intel, dès les premières années du développement des circuits intégrés. Doubler tous les 18 mois signifie la chose suivante : imaginons que la puissance des circuits intégrés vaille 1 en janvier 1970, elle vaudra 2 en juillet 1971, 4 en janvier 1973, environ 1000 en 1985, environ 1 million en 2000, et autour de 50 milliards aujourd'hui ! Cette loi qui pouvait sembler audacieuse au début a été observée jusqu'à maintenant. On peut la lire de 2 façons : 1 - Un processeur d'aujourd'hui est 50 milliard de fois plus puissant que celui de 1970. 2 - Le service rendu par le processeur de 1970 pourrait être rendu par un 50 milliardième du processeur d'aujourd'hui.

De façon similaire, on considère que « La capacité de stockage installée dans les datacenters (voir page 4) double tous les 15 mois » ; elle est donc multipliée par 16 tous les 5 ans. Si elle était de 1 en 2005, elle serait de 16 en 2010, et de environ 4000 aujourd'hui. Cette conjecture est aussi très bien vérifiée.

On trouve de telles lois/conjectures pour les coûts, « La capacité de stockage des disques durs par unité de coût double tous les ans », ou la loi de Koomey, « La capacité de calcul par unité de puissance électrique double tous les 18 mois ».

On peut trouver positives ces lois exponentielles qui promettent un accroissement extraordinaire des capacités des systèmes TIC. Malheureusement, elles ont aussi leur pendant côté consommation de ressources, ex. « La consommation électrique des datacenters double tous les 5 ans » ou « Le nombre de serveurs Internet est multiplié par 10 tous les 4 ou 5 ans ». De telles lois ne sont pas propres aux TIC ; toutes les grandes technologies ont connu un tel développement exponentiel avant de connaître l'éclatement de leur bulle.

« Our Common Future », rapport Brundtland (Oxford University Press, 1987)  
« Computers and the Environment », Kuehr et Williams (Kluwer, 2003)  
« Ecologie des infrastructures numériques », Flipo et al. (Hermès-Lavoisier, 2007)  
« Information Technology and Sustainability », Hilty (Books on Demand, 2008)  
« TIC et Développement durable », Breuil et al. (rapport gouvernemental, 2008)  
« Green IT », Corne, Forchorn, Guy et Pavia (Dunod, 2009)  
« Quel futur pour les métaux ? », Bihouix et de Guillebon (EDP Sciences, 2010)  
« Impacts écologiques des Technologies de l'information et de la Communication », EcoInfo (EDP Sciences, 2012)  
« Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines », The Green Grid (2012)  
« A Green IT Approach to Data Center Efficiency », IBM (2012)  
« Saison brune », Squarzonei (Delcourt, 2012)  
« La grande transformation », Leinfelder et al. (Cambourakis, 2015)  
« Le grand pillage », Bardi (Institut Veblen, 2015)  
« La guerre des métaux rares », Pitron (Les Liens qui Libèrent, 2018)  
« Data Centers and the Environment », Supernero (2018)

### Bibliographie

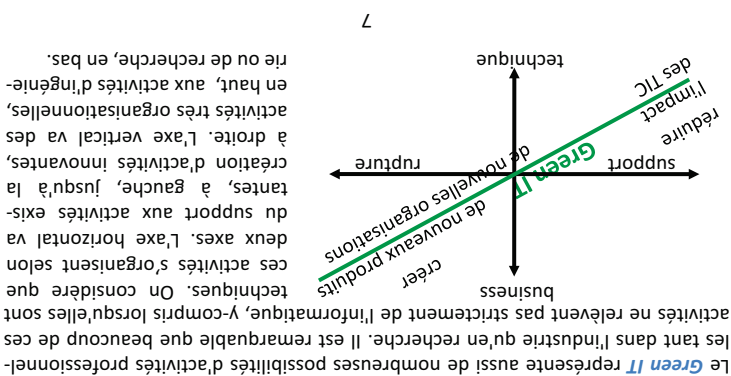
Des réglementations peuvent devoir s'imposer, soit pour encadrer les méthodologies, ACV, indicateurs, mesures, etc., soit pour encadrer les usages. Recommander. Le Green IT peut prendre une forme technique dans l'écoconception de systèmes, et les logiciels, durables, mais prend aussi une forme organisationnelle pour les matériels et logiciels, durables, mais prend aussi une forme organisationnelle pour les logiciels et aux systèmes. S'adressant à des organisations extrêmement complexes, elle doit s'obliger à une analyse de cycle de vie rigoureuse des systèmes TIC, et de leur influence sur d'autres systèmes et sur les usages. L'ACV est une méthode standard du développement durable, qu'on a pu appliquer assez facilement aux équipements TIC élémentaires, mais qu'on ne sait pas encore bien appliquer aux logiciels et aux systèmes. Elle ne peut pas se réduire aux questions environnementales, et encore moins aux questions énergétiques.

### Conclusions et perspectives

### Analyse de cycle de vie des systèmes TIC

L'ACV des systèmes TIC soulève de grandes difficultés pour les plus complexes d'entre eux, qui sont aussi les plus critiques, ex. Internet, le Web, le Cloud. Elle soulève d'autres difficultés, aussi grandes, pour le logiciel, qui est souvent responsable de la mauvaise utilisation du matériel, mais ne se laisse pas facilement analyser. Là où elle a pu être faite, l'ACV révèle de sévères menaces contre la durabilité, tant au niveau matériel par des consommations invisibles (ex. les veilles), par des coûts de fabrication disproportionnés, et une phase de démantèlement mal gérée, qu'au niveau logiciel, où l'essentiel de l'accroissement de performance du matériel est consommé par l'accroissement de la taille des logiciels. Ces deux questions, l'ACV des systèmes TIC et des logiciels, et l'écoconception de ces mêmes systèmes et logiciels afin qu'ils soient durables, sont des questions d'ingénierie et de recherche qu'il est urgent de traiter.

Pendant, on sait assez bien faire l'ACV des équipements matériels individuels. Celle-ci révèle des particularités des TIC.  
**Phase d'exploitation très courte** : ex. moins de 2 ans pour les téléphones portables et un peu plus pour les PC portables. De ce fait, la phase de production domine le cycle de vie en terme d'impact (ex. bilan carbone et consommation de ressources).  
**Utilisation de ressources critiques** : c-à-d. des ressources qui sont soit à disponibilité réduite à coût constant (ex. moins de 15 ans pour l'indium, métal utilisé dans les écrans plats), soit disponibles dans très peu de régions (ex. l'Afrique du Sud détient 80 % des réserves de platine), soit spécifiques à l'industrie TIC (ex. l'indium à nouveau - attention, le silicium est un faux ami, son principal consommateur est la sidérurgie), soit qui n'ont pas de solution de substitution connue (ex. les terres rares) soit qu'on ne sait pas recycler efficacement et qui sont donc irrémédiablement perdues après usage (ex. indium et terres rares, toujours eux). Sans oublier l'eau qui est abondamment consommée dans les procédés de photolithographie utilisés pour produire les circuits intégrés, les écrans, et les circuits imprimés (au total, plusieurs m³ d'eau pour un PC fixe), mais aussi dans les procédés d'extraction de minéraux (ex. mines de cuivre) ou de production d'électricité (ex. les tours de refroidissement qui transforment de l'eau bleue en eau verte).  
**Recyclage difficile** : soit par la nature des matériaux, soit par le fait qu'ils sont très finement intriqués, en faible quantité, dans un faible volume.  
**Obsolescence provoquée** : par laquelle le besoin (envie ?) de changer un appareil est dicté par d'autres considérations que celles du bon fonctionnement. Ex. changer une machine qui marche pour profiter d'une nouvelle version de son logiciel. L'obsolescence provoquée crée une catégorie d'objets qui marchent encore, qu'on a remplacé, mais dont on ne sait pas se séparer, au cas où.



### Activités Green IT

Normalisation : ex. la norme ISO 14040 encadre l'ACV.  
Certifications : ex. les certifications EnergyStar et 80+, et de nombreuses autres, garantissent des performances minimales, ici concernant l'efficacité énergétique.

France : ex. la loi Grenelle II impose aux entreprises cotées en Bourse de rendre compte de leur Responsabilités Sociales (RSE), dont la déclinaison est celle des piliers du DD.  
pour recyclage, ex. pour les DEEE, dans un magasin.

Elle est présente dans notre vie quotidienne par le logo de la poubelle barrée qui indique qu'un produit ne doit pas être jeté avec les ordures ménagères mais ramené à un point de collecte. Elle est présente dans notre vie quotidienne par le logo de la poubelle barrée qui indique qu'un produit ne doit pas être jeté avec les ordures ménagères mais ramené à un point de collecte.

International : ex. la Convention de Bâle, 1989, limite la circulation des déchets entre pays, dont les déchets électroniques, même si ils n'étaient pas prévus initialement. Elle se révèle mal adaptée à cet effet, et le cas des déchets électroniques est régulièrement réexaminé, ex. lors de la conférence de Genève de 2015.

### Réglementations Green IT

### Le cas des datacenters

Le cas des datacenters est intéressant, d'une part parce qu'il est devenu emblématique de la problématique Green IT, et d'autre part parce qu'il montre les progrès qu'il est possible de faire en passant de l'indifférence aux problématiques énergétiques à une prise en compte explicite (page 5). Il est aussi typique de la focalisation sur la consommation d'énergie alors que le développement durable, et donc le Green IT, représente bien plus. Enfin, il a vu une mesure d'efficacité énergétique s'imposer alors qu'elle n'est pas cohérente du point de vue de l'ACV (page 6).

Qu'est-ce qu'un datacenter ? C'est une usine (parfois simplement un atelier, voire une armoire) qui héberge un nombre parfois très grand d'équipements informatiques, ex. réseau interne et connexion à un réseau externe, calculateurs et disques durs, et d'équipements techniques permettant le fonctionnement des premiers en toute sécurité, ex. alimentation électrique et climatisation. Ces usines réalisent concrètement les services rendus par les réseaux sociaux, ex. Facebook et Twitter, les explorateurs web, ex. Bing et Google, les fournisseurs d'accès Internet et télécom, ex. Orange et Yahoo!, les sites marchands, ex. Amazon, les services du Cloud, et les services techniques d'Internet, ex. Akamai pour le service des contenus. Quel que soit le service on en attend une disponibilité élevée, si bien que ces usines sont particulièrement impressionnantes par leur dimensionnement.

Que consomme spécifiquement un datacenter ? Un datacenter consomme essentiellement de l'électricité pour le fonctionnement de ses équipements, souvent une source d'énergie de secours, ex. du fioul pour des groupes électrogènes, et une énorme quantité d'équipements informatiques qui sont renouvelés très fréquemment. La plupart des études se concentrent sur le seul volet électrique. Dans le cas classique, l'électricité arrive au datacenter sous haute tension, ex. 20000 V, et en courant alternatif, alors que les équipements informatiques doivent être alimentés en basse tension, ex. 5 V et 12 V, en courant continu. On utilise pour passer de l'un à l'autre des transformateurs de courant qui souffrent toujours de pertes. Une partie de l'électricité qui alimente le datacenter est aussi utilisée pour l'environnement technique des équipements informatiques, ex. la climatisation.

Pendant longtemps, ces pertes et les consommations auxiliaires ont été considérées comme des fatalités, étaient à peine mesurées, et ne faisaient pas l'objet d'efforts d'amélioration. On a appelé Power Usage Effectiveness (PUE) le ratio entre la puissance électrique qui alimente le datacenter et la puissance électrique qui alimente les équipements informatiques. Jusque récemment, un PUE de plus de 2,5 (soit plus de 150 % de pertes et coûts auxiliaires) était considéré comme inévitable.

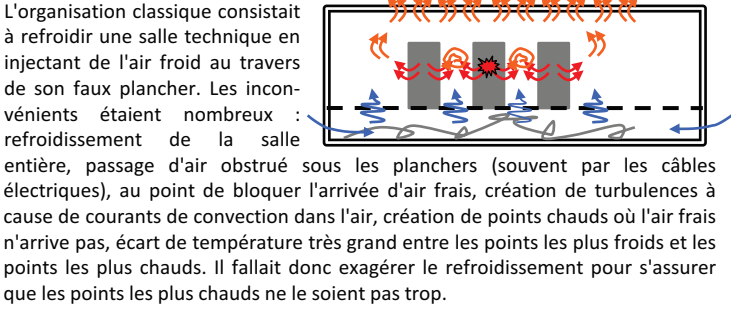
Vers la proportionnalité : il manque au PUE comme à ses variantes une unité fonctionnelle de référence, et de mesurer à quel point la consommation énergétique est proportionnelle aux UF réalisées. En termes de la cantine, ce qu'il convient de mesurer est la masse d'ingrédients consommés par la cuisine, et vérifier qu'elle est proportionnelle à la masse de plats réellement consommés par les clients. À propos de datacenter, il conviendrait de mesurer combien d'énergie est consommée en moyenne par chaque UF, sous différentes hypothèses de charge. Le plus difficile dans cela est de définir les UF de référence. C'est déjà difficile à faire pour un réfrigérateur ou une automobile, pour lesquels on a recours à des UF artificielles mais normalisées (ex. le cycle urbain d'une automobile), mais actuellement on ne sait pas le faire pour des UF informatiques.

Par quoi remplacer le PUE ? Le PUE mesurant mal l'efficacité des datacenters des alternatives ont été proposées. Malheureusement, ces alternatives tendent à broutiller encore un peu plus les pistes. Ex. la variante GPUE (Green PUE) propose de prendre en compte dans le calcul du PUE la nature plus ou moins verte de l'électricité consommée. Poursuivant la métaphore de la cantine, cette variante du PUE permettrait à une cantine qui produirait trop de plats, trop copieux, mais qui utiliserait des ingrédients bio, d'avoir une bonne évaluation !

Pourquoi le PUE est-il une mauvaise mesure ? Le PUE mesure une chose et est utilisé comme si il en mesurait une autre. Rappelons que l'ACV se fait par rapport à une unité fonctionnelle (UF) placée au dénominateur. Pour le PUE, l'UF est la puissance apportée aux équipements informatiques, mais il est utilisé comme s'il mesurait l'efficacité de la totalité du datacenter, ce qui n'est pas correct puisque l'efficacité de l'équipement informatique, même si il n'était pas prévu initialement, l'UF devrait être un service au dénominateur. En fait, le PUE mesure l'efficacité de l'environnement des équipements informatiques, mais pas celle du datacenter. Tout se passe comme si on estimait l'efficacité d'une cantine en mesurant celle de sa cuisine. Le PUE de la cuisine mesurerait la masse d'ingrédients y entrant, par rapport à la masse des plats en sortant. Il mesurerait alors l'efficacité de la fabrication de chaque plat, mais pas l'efficacité de la mission première de la cantine : nourrir des clients. Une cantine qui ferait peu de déchets en cuisine, mais qui produirait trop de plats, trop copieux, donc beaucoup de déchets en cuisine, aurait quand même un bon PUE. C'est la situation actuelle de la mesure de l'efficacité des datacenters. On voit même des opérateurs annoncer des PUE inférieurs à 1 parce que leurs datacenters récupèrent la chaleur dissipée pour produire une partie de l'électricité consommée. C'est comme si la cantine faisait peu de déchets en cuisine, mais beaucoup en salle, se rachetait en brûlant les déchets de la salle pour chauffer les fourneaux de la cuisine.

### Vers l'amélioration du PUE. Avec l'accroissement du coût de l'énergie

avec aussi celui de la taille et du nombre des datacenters, et peut-être aussi la prise en compte des enjeux climatiques, on a vu se développer des installations plus rationnelles possédant un meilleur PUE. Ces nouvelles façons de faire relevaient du bon sens en ingénierie et n'ont pas nécessité de transformer les équipements informatiques eux-mêmes. Ex. concernant la climatisation, l'essentiel est d'assurer un échange thermique entre les équipements informatiques, le chaud, et soit le milieu ambiant, soit un circuit ad hoc, le froid. Pour illustrer les enjeux prenons le cas des échanges avec l'air ambiant.



L'organisation classique consistait à refroidir une salle technique en injectant de l'air froid au travers de son faux plancher. Les inconvénients étaient nombreux : refroidissement de la salle entière, passage d'air obstrué sous les planchers (souvent par les câbles électriques), au point de bloquer l'arrivée d'air frais, création de turbulences à cause de courants de convection dans l'air, création de points chauds où l'air frais n'arrive pas, écart de température très grand entre les points les plus froids et les points les plus chauds. Il fallait donc exagérer le refroidissement pour s'assurer que les points les plus chauds ne le soient pas trop.

La première amélioration est de contrôler les flux d'air en enlevant les obstacles à la circulation, et en empêchant les flux d'air chauds et froids de se croiser. De cette façon, l'apport d'air frais est mieux utilisé, et il y a moins d'écart entre les points les plus chauds et les points les plus froids. Par ailleurs, on a appris à mieux utiliser les consignes de bon fonctionnement des équipements en se rapprochant des températures les plus hautes indiquées par les constructeurs (recommandations ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). On obtient ainsi des gains énergétiques importants. Autrefois, il faisait très froid dans les salles de calcul, mais aujourd'hui il peut y faire très chaud, jusqu'à 40 °C.

Une dernière amélioration est le free cooling qui permet d'injecter dans la salle technique de l'air extérieur pas refroidi. On peut arriver ainsi à des PUE de moins de 1,2, même si des PUE proches de 2 (100 % de surcoût) restent très fréquents.



**Prérequis :** réchauffement climatique, développement durable, analyse de cycle de vie.

Lire, comprendre, apprendre.

Préparer le pliage (voir au recto traits gris rentrants, traits rouges saillants).

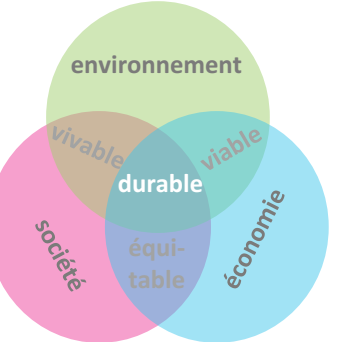
Découper selon le trait rouge entre les deux ●, puis achever le pliage.

**Réchauffement climatique et gaz à effet de serre**

Le réchauffement climatique est une menace de bouleversements environnementaux majeurs, donc de non-durabilité pour le pilier environnemental, mais aussi de bouleversements sociaux avec des flux de réfugiés climatiques, et finalement de bouleversements économiques par la disparition de ressources économiques naturelles dans des zones désertifiées ou inondées par la montée des océans. Avec l'épuisement de certaines ressources, le réchauffement climatique est donc une menace majeure pour la durabilité.

En dépit du retard de prise de conscience causé par les climatosceptiques et les court-termistes, on admet maintenant le rôle des activités humaines dans le réchauffement climatique via la production de gaz à effet de serre (GES ou *Greenhouse Gaz*, GHG). Ces gaz sont naturellement présents dans l'atmosphère, et notre planète leur doit d'être respirable. Cependant, la production actuelle de GES dépasse largement ce qui est nécessaire au maintien d'une atmosphère respirable et est la principale explication du réchauffement observé.

Plusieurs gaz ont un effet de serre notable : l'emblématique **gaz carbonique** (dioxyde de carbone ou CO<sub>2</sub>), le **méthane** (CH<sub>4</sub>), les **hydrofluorocarbures** (HFC, gaz calorifères remplaçant les CFC anciennement utilisés dans les réfrigérateurs et fauteurs de trous dans la couche d'ozone), et même la **vapeur d'eau** (H<sub>2</sub>O). Cependant, ils n'ont pas tous le même potentiel d'effet de serre (10000 fois plus que CO<sub>2</sub> pour les HFC), ni la même durée de vie dans l'atmosphère (quelques jours pour H<sub>2</sub>O, une centaine d'année pour CO<sub>2</sub>, des dizaines de milliers d'années pour certains composés fluorés).



**Les 3 piliers du développement durable**

On a l'habitude de dire que le développement durable s'appuie sur 3 piliers qui correspondent à trois conditions que doit remplir une activité durable : le pilier économique, le pilier social et le pilier environnemental.

On représente chacun des piliers par un disque qui symbolise toutes les activités qui respectent les conditions du pilier (voir à gauche). Là où deux disques se chevauchent, se trouvent les activités qui respectent les conditions de deux piliers. Par exemple, on connaît bien les produits **équitable** qui sont produits et commercialisés d'une façon qui permet à la fois le développement économique et le développement social des producteurs, transformateurs, etc., mais leur vertu environnementale n'est pas garantie. Là où les trois disques se recoupent, se trouve le **développement durable**.

**Écrans plats et GES**

Beaucoup considèrent que le remplacement des **écrans cathodiques** par des **écrans plats** a été une bonne chose car l'utilisation de ses derniers dégageait moins de GES.

C'est oublier la base de l'ACV qui veut que l'inventaire soit fait du **berceau au tombeau**. En phase d'utilisation et par unité de surface, l'écran plat consomme moins que l'écran cathodique. Mais si on intègre le bilan carbone sur tout le cycle de vie, le résultat est contraire à cette intuition. Un écran plat produit plus de 600 kg de CO<sub>2</sub>, et un écran cathodique moins de 30. Et on en produit plus et de plus grands...

**Green IT = TIC et DD**

Le pilier écologique et son fragment le bilan carbone sont sur-représentés dans les discours Green IT, mais un rapide tour d'horizon montre que les 3 piliers sont bien nécessaires.

En 2014, une **grève** (pour 150 % d'augmentation de salaire !) dans les mines de platine d'Afrique du Sud a duré 6 mois. Elle faisait suite à plusieurs années de troubles sociaux dans les mines de platine (ex. 34 morts en 2012 à Marikana). L'industrie TIC était bien sûr vivement concernée par les conséquences de ce conflit sur le cours du platine (pilier économique), mais la grève a rappelé le volet social des TIC, comme partout où les matières premières et les appareils TIC sont produits dans des conditions indignes.

En Arizona, États-Unis, se trouvent d'importantes mines de cuivre. Elles sont au centre d'un conflit entre indiens riverains et sociétés minières concernant l'accès à l'eau. Ce n'est pas un conflit lointain, car le cuivre est reconnu par l'UE comme un **matériau critique** pour les TIC.

**1 Le développement durable**

Le développement économique et social est-il compatible avec la préservation de l'environnement ? C'est une préoccupation au moins aussi ancienne que la révolution industrielle. Au début, la réponse a été non, et a conduit à identifier des zones sans activité humaine. De là sont nés les premiers parcs nationaux, ex. le parc de **Yellowstone** en 1871.

Depuis, la réflexion a poursuivi son chemin en intégrant le développement humain (santé, éducation, etc.) pour aboutir à la définition moderne du **développement durable** (DD ou *sustainable development*) donnée en 1987 dans le rapport *Our Common Future* de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies (plus connu sous le nom de **rapport Brundtland**, du nom de la présidente de cette commission, Mme Gro Harlem Brundtland) :

*Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de 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, et 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.*

Contrairement à la vision purement environnementale des débuts, cette définition intègre l'idée que **l'humanité a des besoins**, et qu'en plus ils ne sont **pas satisfaits partout**. Un développement est donc nécessaire pour les satisfaire, mais il doit être fait dans le respect de l'environnement sur le long terme. Le DD ne demande donc pas de figer la situation présente, et encore moins d'exclure l'espèce humaine pour sauver l'environnement.

Une fois cela dit au plan philosophique et politique, rien n'est dit au plan opérationnel, et le modèle des **3 piliers du développement durable** va préciser un peu cela.

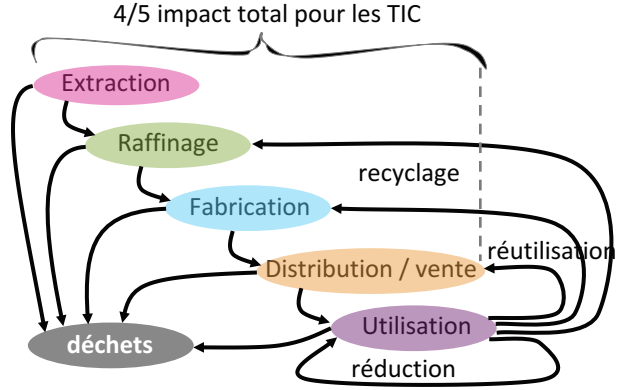
**1 Analyse de cycle de vie – ACV**

L'analyse de cycle de vie (ou *life-cycle assessment – LCA*) est une ingénierie d'analyse des coûts et des impacts de la réalisation d'un service ou d'un produit, ex. produire un kWh d'électricité nucléaire ou un km d'autoroute, rouler 100 km en voiture, ou poster un colis pour Singapour.

Cette analyse doit se faire du **berceau au tombeau** (*from Cradle to Grave*). C'est-à-dire qu'elle doit prendre en compte tout les coûts, ceux du service lui-même, comme ceux de la production des appareils nécessaires au service, ou ceux du démantèlement de ces appareils (voir ci-contre).

Par exemple, il est coutumier de considérer l'énergie éolienne, celle du vent, comme une énergie propre et renouvelable. Mais c'est oublier que ces éoliennes constituent une structure d'acier, plantée dans un scellement en béton, dont la production n'est ni propre ni renouvelable, et l'installation sur le lieu d'exploitation ni propre ni renouvelable non plus. Si on considère en plus qu'un jour toute éolienne deviendra une épave d'éolienne et devra être démantelée (au bout de 30 ans environ), on est en droit de se demander quel est le bilan total ; comment les impacts de fabrication, d'installation, d'entretien et de démantèlement sont amortis dans la phase de production effective d'électricité propre et renouvelable. C'est à ce genre de question que l'ACV apporte des réponses au delà des idées préconçues.

L'ACV est une activité qui s'organise en 4 étapes : la **définition du périmètre**, **l'inventaire**, **l'étude d'impact**, et **l'interprétation**.



**ACV logicielle**

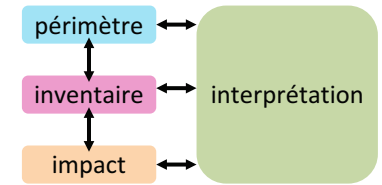
On ne sait toujours pas bien faire l'ACV d'un logiciel, tellement les contours de ce qui est **dans** un logiciel sont flous. Cependant, une chose est certaine, le logiciel a une place prépondérante dans l'impact d'un système TIC. Par exemple, son **empreinte mémoire** est déterminante. On entend par là la quantité de mémoire que le logiciel doit gérer. La localité des données a aussi une énorme importance même au sein d'une machine. On sait par exemple que les lectures-écritures en mémoire coûtent beaucoup plus cher que les opérations de calcul proprement dites. On a pu observer des changements radicaux du comportement de serveurs simplement par changement de leur logiciel.

Ces observations conduisent à l'idée que même si on ne sait pas encore faire l'ACV d'un logiciel, il faudrait inclure dans les spécifications non-fonctionnelles d'un logiciel ses caractéristiques environnementales. Ce serait les débuts de **l'éco-conception logicielle**.

**2 Définition du périmètre** : il s'agit de déterminer l'unité de service qui va être analysée (on parle **d'unité fonctionnelle**, ou **UF**), ce qui va être mesuré (ex. consommation d'eau, production de gaz à effet de serre), les conditions de réalisation du service (ex. en Chine où l'électricité est très carbonée, ou en France où elle l'est très peu) ou les conditions d'utilisation du service (ex. cycles routier ou urbain pour parcourir 100 km). Tous ces paramètres doivent être soigneusement définis pour garantir la qualité de l'ACV.

On définit aussi où doit s'arrêter l'analyse (ex. prise en compte de la production du béton pour l'ACV d'un barrage hydro-électrique, mais traitement forfaitaire des camions qui transportent le béton).

Parmi ces paramètres, le choix de l'unité fonctionnelle est crucial pour rendre comparables les ACV à différentes dates ou pour différentes façons de réaliser le service. C'est pourquoi on définit des UF artificielles (ex. le cycle routier urbain, ou le cycle d'utilisation des appareils ménagers), mais normalisées pour être comparables.



**Les 3 R** : La recommandation générale est de **réduire, réutiliser et recycler**.  
**Réduire** (la production de déchets) : en augmentant la durée d'utilisation. Spécialement important pour les objets au cycle de vie déséquilibré tels que les systèmes TIC.  
**Réutiliser** : peut inclure reconditionnement et mise-à-niveau technique.  
**Recycler** : afin de récupérer composants ou matériaux.

**3 Inventaire** : il s'agit de mesurer tout ce qui a été prévu de l'être dans la définition du périmètre. L'inventaire doit être le plus complet possible, dans le cadre du périmètre déterminé au préalable. Certaines quantités seront réellement mesurées et d'autres traitées de façon forfaitaire en utilisant une base de données de résultats d'ACV déjà faites.

**4 Étude d'impact** : il s'agit d'examiner l'impact social, environnemental ou économique de l'activité analysée. Par exemple, la production d'un même polluant n'a pas le même impact selon qu'elle a lieu près d'une population ou non. Un impact souvent examiné est le **réchauffement climatique** via la production de **gaz à effet de serre**. Pour évaluer cet impact, on va convertir les quantités de gaz à effet de serre recensées par l'inventaire en une quantité d'un gaz de référence qui aurait le même potentiel d'effet de serre. On choisit comme gaz de référence le **dioxyde de carbone**, et on appelle cette étude d'impact le **bilan carbone**. C'est ainsi qu'un bilan carbone peut conduire à afficher une production de dioxyde de carbone non nulle même pour un service qui n'en produit pas du tout. Il s'agit donc **d'équivalent CO<sub>2</sub>**, ou **CO<sub>2</sub>e**.

**3 Transparence/éducation/information**

On considère également que pour être durable le développement doit s'accompagner de **transparence, d'éducation et d'information**. Il ne peut donc pas y avoir une dictature du développement durable, même si il impose ses contraintes, car celles-ci devront être expliquées, justifiées et évaluées publiquement.

Nous disposons maintenant d'une grille d'analyse des activités pour les qualifier de durables ou non. Il nous faut maintenant une méthode d'analyse la plus objective possible. Cette méthode est **l'analyse de cycle de vie (ACV)**, voir les **encarts verts**.

**5 Les 3 ordres de l'analyse de cycle de vie**

L'analyse de cycle de vie peut étudier les impacts d'une activité selon 3 ordres différents.

- 1<sup>er</sup> ordre** : les impacts directs d'une activité. Ex. quels sont les impacts de la construction de 1 km de ligne TGV ? De son exploitation ? De la construction d'un ordinateur ? De la fabrication et de l'utilisation d'un écran cathodique ?
- 2<sup>ème</sup> ordre** : l'impact sur le cycle de vie d'une autre activité ou d'un autre produit. Ex. quel est l'impact d'une nouvelle ligne TGV sur les autres moyens de transport ? Moins de transport aérien, moins de transport routier, etc. ? On énonce souvent ce genre de « vérités », mais dans le cas de l'ACV on veut les mesurer sans idée préconçue. Ex. quel est l'impact de la numérisation des documents sur la consommation de papier ? Fait-on plus de déclarations d'impôts parce qu'elles sont « dématérialisées » ? Probablement non. Les imprime-t-on moins ? Difficile à dire sans une analyse précise. Imprime-t-on plus de documents composés à la maison ? Certainement oui !
- 3<sup>ème</sup> ordre** : l'impact sur les usages. Ex. dans quelle mesure la nouvelle ligne TGV fait-elle que des gens qui ne faisaient pas ce trajet jusque là le font désormais, parce que le temps de trajet est passé sous une barre psychologique, disons 1 h 30 ? Cas des habitants d'une ville qui prendraient l'habitude de travailler dans une ville distante, parce que la nouvelle ligne TGV la rapprocherait, mais passant de ce fait d'un temps de trajet quotidien de 2 x 30 min à 2 x 1 h 30 ?