

Le low-tech et les réseaux : une rencontre impossible ?

Eva MORGAND

Supervision: Emmanuelle Frenoux et Marceau Coupechoux

Juin 2021

Chapitre 1

Introduction

Le numérique occupe une place croissante dans notre société. L'arrivée d'Internet dans les foyers au début du XXIème siècle a révolutionné nos modes de vie. Les bienfaits du numérique sont très nombreux dans les domaines de la santé, de l'éducation, de la communication, de l'économie...

En parallèle, nous pouvons noter les nouvelles de plus en plus alarmantes concernant l'environnement. La situation environnementale est de plus en plus préoccupante. Ce n'est que depuis peu que l'idée de la dématérialisation du numérique a été démenti. Le numérique a des impacts divers sur l'environnement.

Néanmoins, il paraît difficile de se passer complètement du numérique. Premièrement, abandonner de suite le numérique reviendrait à transformer des milliards d'équipements et infrastructures en déchets. Ensuite, un arrêt brutal pourrait avoir des conséquences néfastes sur des domaines comme la santé ou l'éducation, dans lesquels le numérique répond à des besoins fondamentaux. Il apparaît donc essentiel de repenser le numérique, aussi bien dans sa conception que dans son utilisation.

Le low-tech, concept émergent depuis la publication du livre *L'Âge des low tech Vers une civilisation techniquement soutenable* de P. Bihouix, entend redéfinir la technique dans son ensemble. Le terme a été construit en opposition directe avec celui de high-tech.

À première vue, le numérique, domaine high-tech par excellence, semble incompatible avec la notion de low-tech. Ce rapport a pour objectif de définir le low-tech, recenser les techniques existantes pour pouvoir répondre à la question suivante : le numérique low-tech existe-t-il ?

Table des matières

1	Introduction	1
2	Déterminer les impacts environnementaux du numérique	4
3	Estimer la croissance du numérique	7
4	Définir le low-tech	9
5	Questionner l'utilité des gestes "éco-responsables"	14
6	 Limiter la fabrication de nouveaux équipements	17
6.1	Allongement de la durée de vie des équipements	17
6.1.1	Techniques lower-tech	18
6.1.2	Techniques candidates	18
6.1.3	Techniques incitatives	19
6.2	Recyclage des matériaux et équipements	19
6.2.1	Techniques lower-tech	20
6.2.2	Techniques incitatives	20
6.3	Réutilisation d'équipements numériques	20
6.3.1	Techniques candidates	20
6.3.2	Techniques incitatives	21
7	 Architecturer le réseau de façon pérenne	22
7.1	Réseaux sans fil low-tech	22
7.1.1	Techniques lower-tech	23
7.1.2	Techniques candidates	24
7.1.3	Techniques incitatives	25
7.2	Alimentation des infrastructures	26
7.2.1	Techniques lower-tech	26
7.2.2	Techniques candidates	26
8	 Développer un numérique éco-conçu et accessible	28
8.1	Design de sites low-tech	28
8.2	Sobriété de consommation	30

8.2.1	Techniques incitatives	30
9	Héberger ses données durablement	32
9.1	Tendance des hébergeurs "verts"	32
9.1.1	Techniques candidates	32
9.2	Décentralisation d'Internet	33
9.2.1	Techniques lower-tech	33
9.2.2	Techniques incitatives	33
10	Construire des équipements avec moins d'impacts environnementaux	34
10.1	Consommation électrique des data-centers	34
10.1.1	Techniques candidates	35
10.2	Terminaux moins énergivores	36
10.2.1	Techniques lower-tech	36
10.2.2	Techniques candidates	37
11	Conclusion	38
12	Annexe	39
12.1	Détails sur les DTNs	39
12.2	Les besoins humains selon Max-Neef	40

Chapitre 2

Déterminer les impacts environnementaux du numérique

Plusieurs études ont été réalisées afin de quantifier l'impact du numérique mondial sur l'environnement. De façon générale, les équipements numériques sont divisés en 3 types : équipements utilisateurs (smartphones, télévisions, ordinateurs, objets connectés entre autre), réseaux (antennes et box principalement) et data-centers.

Il faut tout d'abord évaluer la place du numérique dans nos vies. Au niveau mondial, en 2019, nous recensons 34 milliards d'équipements pour 4,1 milliards d'utilisateurs, soit environ 8 équipements par utilisateur [18]. Le nombre d'équipements par utilisateur dépend de la région : par exemple, en 2018, un américain possède 10 équipements, contre 1 seul pour un indien [46]. Quant au matériel réseau, le monde comptait en 2019 1,1 milliards de box, 10 millions d'antennes relais et 67 millions de serveurs (4 438 data-centers) [18].

En 2020, 92% des foyers français ont une télévision [52] et 78% ont au moins une télévision, un ordinateur et un téléphone mobile (ou tablette). Le nombre d'équipements par foyer est actuellement en hausse, notamment avec l'arrivée massive des objets connectés (montre, enceinte...).

L'analyse du cycle de vie, notée ACV, permet d'étudier les impacts environnementaux d'un équipement numérique. Le but est d'évaluer les impacts de cet équipement à chaque étape de son cycle de vie. On distingue la fabrication, le transport, l'utilisation et la fin de vie.

La fabrication englobe l'extraction des matières premières, leur traitement chimique, les phases de transport et d'assemblage et l'énergie utilisée. En 2020, elle représente environ 45% de l'empreinte énergétique et des émissions de GES du numérique mondial. C'est l'étape la plus impactante du cycle de vie [104], et ce pour plusieurs raisons.

Premièrement, la fabrication a lieu de l'autre côté du globe. Les matières premières sont extraites en Afrique centrale, en Asie du Sud-Est, en Australie et en Amérique du Sud. L'assemblage se déroule principalement en Asie du Sud-Est (30% en Chine). Cette délocalisation pose plusieurs problèmes éthiques [32]. Tout d'abord les pays développés "exportent" en grande partie leur pollution (puisque ce sont eux qui emploient le plus d'équipements numériques) dans les

autres pays, et donc implicitement leurs responsabilités. L'éloignement des conséquences tend à renforcer l'idée d'une dématérialisation du numérique. Les utilisateurs sont alors poussés à consommer plus. P. Bihouix défend un relocalisation afin de réduire cet "effet pervers" : "Quand vous êtes patron ou actionnaire d'une usine, il est beaucoup plus difficile d'assumer [...] des rejets scandaleusement polluants quand vos clients habitent à un jet de pierre de là." (p.107) [12]. Ensuite, dans les mines dont sont extraits les métaux nécessaires à la fabrication des composants électroniques, les droits humains ne sont pas respectés [58]. Même si nous pouvons dire que cela ne fait pas strictement partie des impacts environnementaux, il est important de souligner que le numérique a un impact indirect sur la santé des miniers, particulièrement celle des enfants. Par exemple, plus de la moitié du cobalt utilisé dans les batteries de smartphones vient de la République démocratique du Congo (RDC) et près de 40 000 enfants sont employés dans les mines. Les enfants sont plus vulnérables que les adultes vis-à-vis de la pollution due à une exposition disproportionnée, un métabolisme immature, une période de croissance sensible et une plus longue manifestation des maladies [29]. L'extraction de métaux appelés "minerais des conflits" finance aussi les conflits armés [16]. Nous pouvons citer le cobalt et l'étain en RDC, le tantale, le tungstène et l'or.

Les matériaux utilisés dans la fabrication sont nombreux [46]. La plupart sont des métaux, dont les métaux rares, et des métaux issus des terres rares. Pour un smartphone, 70 matériaux dont près de 40 métaux sont nécessaires, leur concentration varie entre le milligramme et la dizaine de gramme [46]. Les métaux rares sont mélangés aux métaux abondants de l'écorce terrestre en proportions infimes. Leurs propriétés (magnétiques, optiques, catalytiques et semi-conductrices) les rendent indispensables pour le numérique, mais aussi pour les énergies dites bas carbone. Il risque donc d'y avoir un conflit entre ces deux domaines.

L'extraction des métaux rares implique l'utilisation de procédés chimiques et un raffinage (broyage de la roche, réactifs chimiques, dissolution, séparation par solvants, chauffage). Pour rincer 1 tonne de métaux rares, il faut environ 200 m^3 d'eau. Cette eau est chargée en métaux lourds et en acides. L'extraction provoque alors des rejets de produits chimiques dans la nature, des déchets et gaz toxiques, des pluies acides et l'empoisonnement des nappes phréatiques et des terres [32]. L'industrie minière est considérée comme la 2ème industrie la plus polluante, après celle du recyclage des batteries au plomb [29].

Le traitement des matières premières, quelle que soit l'étape du cycle de vie, est néfaste pour l'environnement car il provoque entre autre une déplétion de la couche d'ozone, une pollution des eaux et de l'air, une diminution de la biodiversité et l'épuisement des ressources.

L'étape d'utilisation a aussi des impacts, lié à l'émission de gaz à effet de serre. En 2009, 247 milliards de mails ont été envoyés dans le monde. D'après l'ADEME [51], chaque salarié français reçoit 58 mails/jour et envoie 33 mails/jour. Par an, cela représente 13,6 tonnes équivalent CO_2 par entreprise de 100 personnes. Un Français fait aussi 134 recherches sur la toile par mois [4]. Deux recherches sur Google représentant l'équivalent de 15 grammes de CO_2 , l'ADEME estime que 9,9 kg équivalent CO_2 sont émis par an et par utilisateur.

Les données sont peu nombreuses, ou en tout cas peu précises, sur la fin de vie. Les équipements numériques sont considérés comme des déchets, appelés DEEEs (déchets d'équipement

électrique et électronique). Ils sont passés de 44,4 Mt à 53,6 Mt de 2014 à 2019 [47], soit une croissance de 20,6%. En Europe en 2019, chaque personne émet en moyenne 16,2 kg de DEEEs.

Il existe quatre scénarios de fin de vie pour les DEEEs : la filière de recyclage officielle agréée, la poubelle, la collecte avec une infrastructure de gestion des e-déchets ou la collecte hors filière officielle sans gestion particulière. De nos jours, seulement 17,4% des DEEEs suivent la filière officielle. L'Europe a le plus haut taux de recyclage (45% en 2019) mais notons toutefois qu'une partie est tout de même enfouie.

Les métaux n'ont pas le même taux de recyclage. Certains ont un taux de recyclage inférieur à 1% [46]. Le recyclage est difficile car la plupart du temps, les métaux sont utilisés dans des alliages. Les matériaux sont très dispersés. le recyclage demande donc un dés-alliage. Ce processus requiert des hautes températures et des sels de montagne. Les techniques employées sont longues et coûteuses, ce qui rend les métaux recyclés non rentables financièrement. Les traitements chimiques sont nombreux lors du recyclage, ce qui pousse certaines personnes à dire que le recyclage est quasi aussi polluant que l'extraction, hormis le fait que l'épuisement des ressources est diminué.

Chapitre 3

Estimer la croissance du numérique

Malgré l'émergence de technologies de plus en plus efficaces énergétiquement, ces multiples impacts tendent à augmenter. Par exemple, la part du numérique dans l'émission de GES pourrait doubler d'ici 2025 jusqu'à atteindre 8% [46]. Les raisons sont multiples.

Tout d'abord, le trafic de données est actuellement en pleine explosion, on estime qu'il augmente de 25% par an [6]. De plus en plus de données sont échangées, avec la montée de l'IoT et de l'IA. Parallèlement, les données ont un poids de plus en plus important. 64% des données échangées sur Internet sont des vidéos, dont la qualité de plus en plus grande augmente le poids moyen. Ceci s'explique par la popularisation des plateformes de streaming (Youtube et Netflix par exemple).

Ensuite, les smartphones, de plus en plus demandés, deviennent plus performants. Les fonctionnalités disponibles vont en s'accroissant, impliquant l'augmentation de la consommation énergétique du smartphone.

Finalement, l'IoT prend de l'ampleur. Il permettrait de gérer efficacement les ressources, de protéger l'environnement (dans le cas des *smart buildings*, l'IoT permettrait d'éviter la consommation d'énergie inutile, par exemple le chauffage). L'IoT est présenté comme peu consommateur d'énergie et il est vrai que les capteurs sont relativement peu énergivores. Cependant, le problème vient de la multiplication de ces capteurs et de l'augmentation des données qui devront être stockées dans des serveurs. La croissance du trafic de données provoquera à terme celle du nombre de serveurs et data-centers. De plus, les capteurs IoT comme les tags RFID (Radio Frequency IDentification) ne sont soumis à aucun dispositif de collecte [43] alors qu'ils sont polluants à l'état de déchet.

En parallèle se développe l'IA. Dans ce domaine, l'entraînement des algorithmes est indispensable et des chercheurs ont remarqué que cette phase demande beaucoup de données, traitées par des ordinateurs surpuissants [99]. La consommation d'énergie est donc extrêmement importante. De même que pour l'IoT, ceci provoquera une augmentation du nombre de serveurs à terme. L'Université de Massachusetts a étudié les impacts environnementaux de l'IA et a constaté que certains modèles d'entraînement d'algorithmes pendant 4 à 7 jours émettent autant que 5 voitures pendant leur durée de vie [99].

On peut constater deux effets dans le cadre du numérique, venant contre-balancer les effets

positifs vantés du numérique. Le premier est l'effet rebond. Identifié dès le milieu du XIX^{ème} siècle sous le nom de "paradoxe de Jevons" [110], l'effet rebond décrit comment l'augmentation de l'efficacité énergétique d'un objet en particulier (ici un équipement numérique) conduit à l'augmentation globale de la consommation d'énergie du domaine technique (ici le numérique). Dans le cas du smartphone, leur batterie a une puissance moyenne augmentée de 50% et pourtant, la fréquence de chargement reste constante [46]. L'IoT et la 5G vont générer de nouveaux usages (*smart cities*, télémédecine...) qui, malgré le développement de technologies plus performantes, vont certainement augmenter l'impact environnemental du numérique.

Le deuxième est l'effet d'accélération. Le numérique tend à accélérer les flux de toutes natures : humains, matériels et financiers. Pour ce dernier, l'on peut citer le trading haute fréquence. Grâce à des algorithmes informatiques, les transactions financières se font à une vitesse de l'ordre de la milliseconde, voire de 100 microsecondes [116]. Notre société connaît un phénomène d'accélération dû au numérique, dans lequel chaque personne est entraîné bon gré mal gré. Le numérique rend les agents économiques dépendants de sa rapidité. Face à ce phénomène, les techniques de production et d'exploitation des ressources s'amplifient [76] par peur de perdre en productivité.

Au vu de tous ces résultats, il apparaît primordial de diminuer l'impact environnemental du numérique. Nous avons vu précédemment que l'augmentation de l'efficacité énergétique des équipements ne suffit pas à cause de l'effet rebond. La démarche low-tech permettrait au numérique de dévier de sa trajectoire actuelle, de contrer l'effet d'accélération.

Chapitre 4

Définir le low-tech

- D'après le Low-tech Lab, un système est low-tech s'il est [73] : utile, accessible, durable. Le système est utile s'il répond à un besoin essentiel comme l'eau, l'énergie, l'alimentation, la gestion des déchets, les matériaux, l'habitat, les transports, l'hygiène ou encore la santé. Il est accessible s'il est utilisable par une large population. Cela signifie que le système est réparable localement, son fonctionnement est compréhensible par tous et ne demande pas des coûts importants. Enfin, il est durable si les étapes de son cycle de vie sont optimisées au niveau écologique, sociétal et environnemental.
- La Fabrique écologique donne sa propre définition [13] : "Les low-tech, par opposition aux high-tech, sont une démarche visant, dans une optique de durabilité, à questionner nos besoins réels et développer des solutions aussi faiblement technologisées que possible, minimisant l'énergie requise à la production et à l'usage, utilisant le moins possible de ressources ou matériaux rares, n'infligeant pas de coûts cachés à la collectivité. Elles sont basées sur des techniques les plus simples possibles, les moins dépendantes possible des ressources non renouvelables, sur des produits réparables et maintenables dans la durée, facilitant l'économie circulaire, la réutilisation et le recyclage, s'appuyant sur les savoirs et le travail humain digne. Cette démarche n'est pas seulement technologique, mais aussi systémique. Elle vise à remettre en cause les modèles économiques, organisationnels, sociaux, culturels. À ce titre, elle est plus large que l'écoconception."
- Dans son livre *L'Âge des low-tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, P. Bihouix parle plus de basses technologies que de low-tech [12]. Le but du low-tech est de réduire le prélèvement des ressources (p.95). Comme un objet qu'on ne fabrique pas est celui qui demande le moins de ressources, il faut remettre en question nos besoins. L'objet doit être conçu durablement, c'est-à-dire fait avec des matières renouvelables, recyclable facilement (donc accessible pour tout le monde), fait pour durer le plus longtemps. Selon lui, il faut que la population locale soit en mesure de le fabriquer, de le réparer et surtout de le maîtriser. Il ajoute dans le magazine *Socialter* [11] qu' un objet low-tech respecte ces trois aspects : sobriété ; conception basée sur des techniques durables et réparables ; conditions de production basées sur le savoir et un travail humain digne. Enfin, dans une vidéo du Shift Project [14], il présente

le low-tech comme une démarche visant à réduire l'extraction de ressources, à rendre les objets plus recyclables, modulaires et réparables. Il résume le low-tech par trois questions : Pourquoi, Quoi, Comment.

- Dans une illustration de M. Joumard dans le hors-série de Socialter [107], le low-tech est associé aux mots -clés suivants : réparable, libre, ouvert, minimaliste, biodégradable, modulaire, recyclable, sans effet rebond et sobre.
- Selon J. Carrey et S. Lachaize [20], un système low-tech est une brique élémentaire d'un système pérenne. Tout système technique est divisé en briques élémentaires et ce sont ces dernières dont on juge la stabilité des entrées-sorties. Les entrées sont le travail, les matériaux et l'énergie nécessaires à la fabrication du système, les sorties sont les déchets et les impacts (sociétaux et environnementaux). Selon les auteurs, les entrées et sorties sont stables si elles sont identiques pendant plusieurs millénaires et qu'elles permettent d'avoir un niveau de production constant. Les besoins essentiels considérés ici sont : boire, s'alimenter, s'abriter.
- D'après T. Bauwens [7], un système low-tech a besoin de moins d'activités R&D. Il est conçu le plus simplement possible, avec le moins de ressources possibles et est caractérisé par les faibles connaissances nécessaires pour le comprendre. Le low-tech peut induire des changements de comportement. Une définition est même donnée : "Technologies designed to be as simple as possible, characterized by low R&D investment and low knowledge transfer costs."
- Sur son site Internet [96], G. Roussilhe définit le low-tech comme une démarche politique qui permet de recomposer son rapport à un monde contraint par la technique. L'auteur préfère parler de "low-technology & high-technics". Ce terme désigne une société dans laquelle les objets de pointe sont utilisés sobrement et la production s'inscrit dans une logique de durabilité et de développement d'une culture sociale. Les besoins essentiels sont regroupés selon la matrice de Manfred Max-Neef [114] (voir Table 12.1 dans la section *Annexe*). Cette matrice a été construite en vue de ne pas classer entre eux les besoins humains.

Nous pouvons remarquer premièrement que le terme low-tech est utilisé aussi bien comme un adjectif que comme un nom commun. En tant qu'adjectif, il est employé pour qualifier une technique (objet, technologie, système, savoir-faire...) alors qu'en tant que nom commun, il désigne une démarche (dans ce cas, la définition sera systémique).

D'un point de vue technique, la grande majorité des sources (sauf [96] et [7]) considère une technique comme low-tech si elle s'inscrit dans une logique de **durabilité**, c'est à dire si elle est conçue de façon à limiter l'extraction de ressources (matériaux ou énergie), à faciliter le recyclage et surtout de façon à durer longtemps. Ensuite vient le concept d'**accessibilité**. Est accessible une technique à faibles coûts et dont le fonctionnement est compréhensible par tous (simplicité souhaitée). Il faut noter que la notion d'accessibilité ici englobe celle considérée dans le cadre du développement logiciel dont le but est de rendre accessible le numérique aux personnes handicapées. L'**utilité** de la technique low-tech ne revient pas dans toutes les sources. Cette notion rejoint en fait celle de durabilité puisque la technique la plus durable est celle que l'on n'utilise pas (on pourra alors parler de "zéro déchet" dans ce cas!). C'est

pourquoi développer une technique low-tech nécessite un questionnement sur nos besoins réels. Les sources divergent sur la liste des besoins humains. Par exemple, G. Roussilhe se base sur la matrice de Max-Neef [114] (économiste chilien du XXème siècle). P. Bihouix et la Fabrique Ecologique rajoute dans la définition la notion de travail humain digne.

D'un point de vue systémique, le low-tech est une démarche visant à la pérennité de la société. D'après [13], le low-tech met en cause nos modèles économiques, organisationnels, sociaux et culturels. Le but du low-tech est de diminuer l'extraction des ressources selon P. Bihouix, de recomposer son rapport au monde contraint par la technique selon G. Roussilhe. Pour cela, le low-tech met en valeur la réutilisation, le recyclage, le savoir-faire local et la sobriété. Les savoir-faire étant décentralisés et les moyens techniques étant mieux maîtrisés, l'esprit communautaire se renforce.

Le schéma ci-dessous met en évidence les points communs et les différences entre les sources citées :

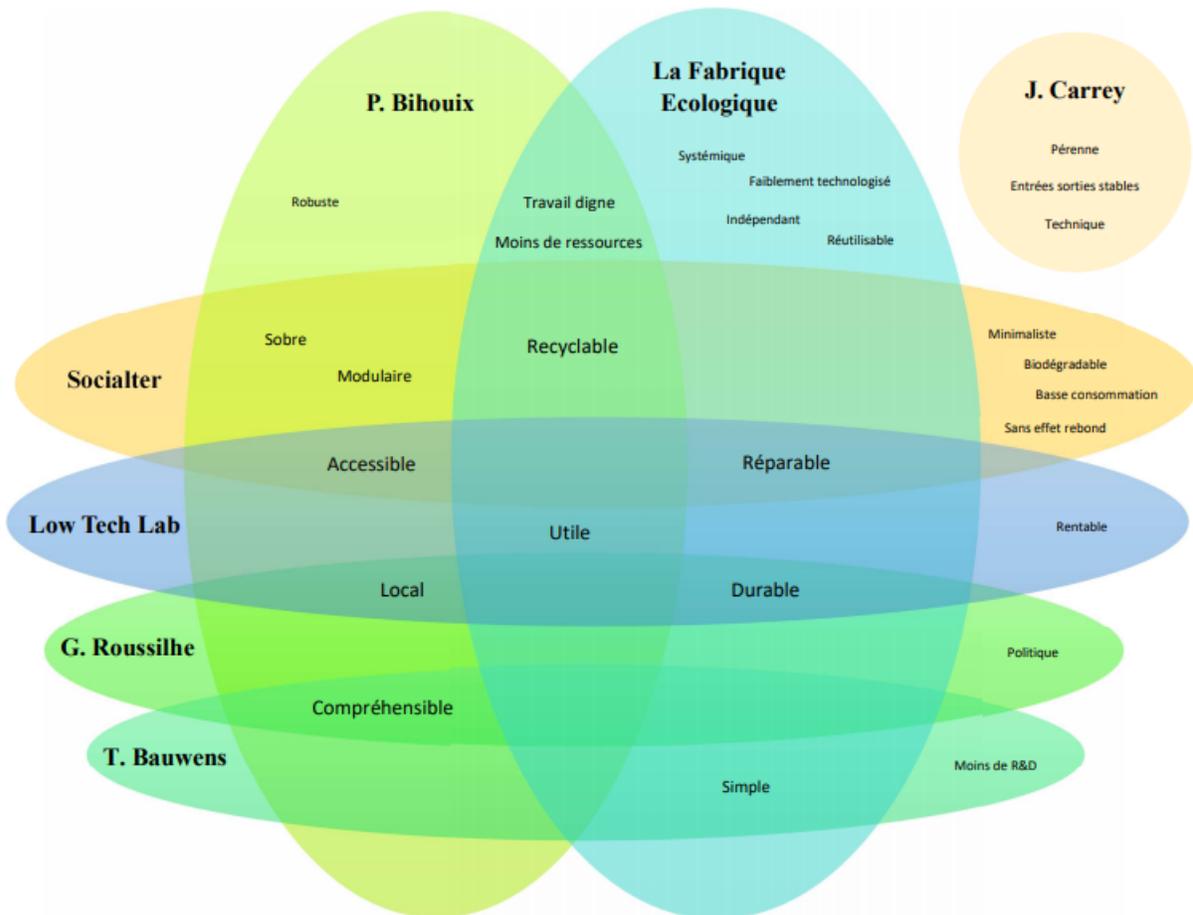


FIGURE 4.1 : Points communs et différences entre les sources

Au vu des définitions précédentes, il faudrait d'abord se questionner sur l'utilité du numé-

rique. Par rapport à la matrice de Max-Neef, le numérique répond à plusieurs besoins, ou du moins facilite la réponse à plusieurs besoins. Le numérique, Internet particulièrement, permet de mettre en relation différents acteurs et de partager du contenu sous différentes formes. Nous pourrions alors associer le numérique aux mots partager, jeux, travail, espaces d'expression et éducation.

Le numérique est par nature high-tech, tous les équipements nécessaires à son développement contiennent une partie électronique. Néanmoins, l'avènement de l'électronique a permis de nombreuses avancées aux niveau calcul et communication principalement. Ce n'est pas l'utilité du domaine entier qu'il faut remettre en question mais celle de chaque technologie employée dans celui-ci. Il ne s'agit pas de supprimer totalement le numérique de nos vies mais bien de redéfinir nos "besoins numériques".

La suite du document recense les différentes techniques (dont font partie les technologies) applicables au réseau. Nous avons choisi de distinguer trois catégories :

- Les **techniques lower-tech** sont celles qui répondent le mieux à la définition donnée. Elles doivent répondre aux trois critères de durabilité, d'accessibilité et d'utilité et permettre le développement d'une société pérenne. Ce point signifie que les techniques de cette catégorie engendrent une plus grande sobriété de consommation et, comme l'indique G.Roussilhe [96], une culture technique sociale. Notons toutefois qu'il n'existe à ce jour aucune technique strictement low-tech. Les techniques dans le domaine du numérique désignées comme telles à notre époque seront vues comme trop high-tech par les générations futures (si toutefois nous choisissons la voie du low-tech). La qualification low-tech d'une technique dépend donc de l'époque à laquelle elle est considérée. Ensuite, nous nous servons de la high-tech pour produire ces techniques, ou pour modéliser leurs impacts. Or dans une société pérenne, cette méthode est impossible puisque cela signifierait que l'une des entrées de fabrication (pour reprendre les termes de [20]) n'est pas stable ! Cela ne veut pas dire que le low-tech n'existe pas mais plutôt qu'il faut perpétuellement porter un regard critique sur les techniques que nous créons pour tendre vers la définition. Nous mettrons donc dans cette catégorie les techniques les plus low-tech qui existent de nos jours. C'est d'ailleurs pour cela que nous parlerons plutôt de techniques *lower-tech* que low-tech (la Fabrique écologique avait déjà proposé cette approche [13]).
- Les **techniques candidates** sont celles qui semblent "oublier" une partie de la définition. L'un des trois critères n'est pas suivi ou bien la technique ne tend pas à créer une société plus pérenne. Les techniques déployées dans le but d'accroître la demande mais qui néanmoins présentent des aspects low-tech "réinjectables" rentrent dans cette catégorie. Il peut aussi s'agir de techniques dites temporaires. Par exemple, nous pourrions imaginer un objet fabriqué à base de plastique recyclé pour un temps, ce dernier ensuite remplacé par des matériaux d'origine naturelle. Les techniques candidates sont donc une source d'inspiration pour les techniques lower-tech définies ci-dessus.
- Les **techniques incitatives** ne répondent à aucun critère du low-tech. Elles sont en revanche développées pour construire une société sobre et pérenne. La plupart du temps, il s'agit de sites web et applications poussant les utilisateurs à la réutilisation,

le recyclage ou autres mais non conçus durablement. Elles aussi peuvent être vues comme temporaires et ont été instaurées dans le but de promouvoir un système social, culturel, économique et politique qui soit durable dans le temps.

Chapitre 5

Questionner l'utilité des gestes "éco-responsables"

Nous aborderons dans ce chapitre des pratiques et gestes pour les utilisateurs souvent vantés comme "respectueux de l'environnement". Certains n'ont d'autre utilité que de soulager la conscience de l'utilisateur et ont donc peu de chances d'engendrer une diminution des impacts du numérique. L'impact global de ces gestes dépend essentiellement du nombre de personnes les adoptant. Néanmoins, d'après une étude de Carbone 4 [34], un tel comportement, même adopté par tous, ne permettrait d'atteindre l'objectif 2°C de l'Accord de Paris.

Les objectifs de ces gestes "verts" sont multiples. Le tout premier est de diminuer le nombre de données échangées et/ou stockées dans le réseau et la quantité d'énergie nécessaire pour faire fonctionner les équipements. Nous savons déjà que l'échange des données nécessite du matériel pour stocker, transporter et recevoir l'information. Tout ceci demande de la fabrication, de la maintenance et du suivi de fin de vie souvent négligé. Diminuer les éléments cités engendrera forcément une diminution de fabrication et autres étapes du cycle de vie d'un objet, aussi minime soit-elle.

Le deuxième est de renverser l'effet d'accélération pour arriver à une situation dans laquelle les besoins génèreront la production (et non la concurrence comme de nos jours). L'utilisateur, en effectuant ces gestes, se verra obligé de se questionner sur l'utilité de ses initiatives ce qui peut être l'incitera à diminuer sa consommation dans n'importe quel domaine.

Enfin, le dernier est de replacer l'utilisateur comme maître des technologies numériques qui l'entourent en lui montrant les "dessous" de leurs fonctionnements et en lui proposant des pratiques de sorte à ce qu'il reprenne en quelque sorte le contrôle. Cet objectif n'est toutefois pas visé par chaque geste.

Les actions les plus souvent citées concernent les courriels (mails en anglais). Ces derniers sont utilisés par la plupart des utilisateurs d'Internet pour communiquer, sous forme de texte ou de pièces jointes. D'après l'ADEME [6], multiplier par 10 le nombre de destinataires d'un courriel multiplie par 4 son impact. C'est pourquoi il est vivement conseillé de diminuer au maximum le nombre de destinataires, notamment lorsque l'on répond à un courriel avec une importante liste de diffusion. La boîte mail ne doit pas être considérée comme un espace de

stockage [97], il faut donc supprimer au fur et à mesure ses courriels (il est important de savoir que supprimer ses courriels génère une requête vers le serveur et qu'il est donc plus judicieux de les supprimer après lecture que tous les mois par exemple), se désabonner des newsletters et privilégier les dépôts temporaires car les fichiers sont régulièrement effacés [6]. La forme du courriel est aussi à prendre en considération. Les organisations recommandent de ne pas les écrire au format HTML [74] (le courriel aura sinon un poids 6 fois plus important) mais en texte brut et de compresser les pièces jointes envoyées.

Les recherches web peuvent être optimisées. Il est ainsi conseillé de taper directement l'adresse URL ou bien de créer des favoris, ce qui divise par quatre les émissions de gaz à effet de serre selon l'ADEME [6]. Il faudrait aussi limiter le nombre de fenêtres et/ou onglets ouverts inutiles. Comme les cookies et l'historique de navigation sont sources de consommation d'énergie, il peut se révéler utile de les supprimer au fur et à mesure. Notons toutefois que les recherches web et les courriels concernent seulement 20% du trafic de données [40].

Les publicités sur Internet représentent 39% du poids d'un site web et surtout participent à l'effet d'accélération. Il existe plusieurs méthodes pour les bloquer. L'extension AdBlock Plus est souvent utilisée mais double la mémoire consommée par le navigateur [17] car parcourt le site en entier pour bloquer les publicités... Une méthode alternative est proposée sur le site Green IT. Cette dernière se base sur le fichier hosts. Le fichier hosts fait correspondre un nom de domaine à une adresse IP. Les cookies, publicités et autres indésirables sont fournis depuis un nom de domaine différent du site. Le but est de faire correspondre ce nom de domaine à l'adresse IP qui renvoie à l'équipement de l'utilisateur (127.0.0.1). Il faut ajouter les adresses au fichier hosts. Le site Green IT renvoie à des listes tenues à jour.

Laisser allumés des équipements lorsqu'ils ne sont pas utilisés consomment de l'énergie électrique inutilement et peut parfois amener à une réduction de la fin de vie de l'équipement. Par exemple, la consommation électrique par an d'une box est équivalente à celle d'un réfrigérateur alors que la box n'est pas utilisée toute l'année [6]. Lorsqu'ils ne sont pas utilisés, il faut les éteindre ou au moins les mettre en mode veille, particulièrement les box et récepteurs TV ou encore les ordinateurs de bureau.

Un ordinateur dont la couche logicielle est mal entretenue peut demander 25% de puissance supplémentaire pour avoir une bonne performance d'après l'INR [97]. Pour éviter le renouvellement, il est donc important de nettoyer régulièrement son ordinateur en supprimant les logiciels inutiles (une application sur 4 n'est pas utilisée!). Les mises à jour des logiciels permettent de réduire les failles (de sécurité par exemple) mais certaines rendent l'ordinateur moins performants énergétiquement et/ou sont plus gourmandes. Il apparaît essentiel de sélectionner les mises à jour utiles.

La bonne gestion de l'espace mémoire permet de ne pas avoir trop tôt un dépassement de cet espace. Par exemple, certains smartphones stockent les photos/vidéos au même endroit que les applications. Au bout d'un moment cet espace est rempli, empêchant l'utilisateur de faire des mises à jour ou d'installer d'autres applications. L'utilisateur peut alors être amené à acheter un nouveau smartphone alors que son ancien est encore en état de marche. Il convient donc de séparer le contenu utilisé par l'équipement (logiciel, application...) du contenu plus personnel (document, photo, vidéo...). Ce dernier peut être stocké en dehors de l'équipement et se trie plus facilement.

Les pratiques citées ne peuvent être considérées comme entièrement low-tech. Elles s'inscrivent dans la catégorie des techniques incitatives car permettent de s'approcher d'une société pérenne.

Chapitre 6

Limiter la fabrication de nouveaux équipements

Comme nous l'avons dit précédemment, la fabrication est l'étape du cycle de vie d'un équipement ayant les impacts environnementaux les plus grands. Pour réduire l'extraction de matières premières, il faut donc réduire le nombre de nouveaux équipements construits mais aussi construire les nouveaux équipements de façon durable. La notion d'accessibilité se traduit ici par la possibilité des utilisateurs à réparer leurs équipements (plus l'équipement sera simple plus il sera facile pour l'utilisateur de le réparer) grâce à des pièces détachées et des guides disponibles.

6.1 Allongement de la durée de vie des équipements

La plupart des équipements subissent un phénomène d'**obsolescence**. Du latin *obsolescere* qui signifie perdre de sa valeur, l'obsolescence désigne tout ce qui est tombé en désuétude. C'est une évolution qui tend à rendre quelque chose périmée [24]. En économie, la définition est plus précise et désigne la dépréciation d'un équipement à cause de l'évolution technique et non de l'usure [8]. Elle peut être qualifiée de programmée si le but est de réduire la durée de vie de l'équipement de façon à inciter le consommateur à un renouvellement prématuré [113]. La loi française la définit comme "l'ensemble des techniques par lesquelles un metteur sur le marché vise à réduire délibérément la durée de vie d'un produit pour en augmenter le taux de remplacement" [70]. Pour augmenter la durée de vie d'un équipement, il faut donc contrer l'obsolescence. Il en existe plusieurs types.

- Technique : elle apparaît lorsque la réparation de l'objet induit des coûts proches du rachat d'un objet neuf, lorsque les pièces détachées pour la réparation sont indisponibles ou bien encore quand l'objet n'est pas réparable.
- Notifiée : l'équipement prévient l'utilisateur d'une panne prochaine ou de la nécessité d'une maintenance.
- Par incompatibilité : des fichiers d'anciennes versions ne peuvent être lus par un équipement ou bien un vieil équipement ne peut utiliser les nouvelles versions.

- Esthétique (ou psychologique) : l'objet perd de la valeur car il est vu comme "démodé". Les nouvelles fonctionnalités de l'objet le plus récent sont présentés comme indispensables.
- "Ecologique" : l'objet perd de la valeur car est moins efficace énergétiquement qu'un autre.

6.1.1 Techniques lower-tech

- Le Fairphone [45] est un smartphone modulaire en sept pièces (batterie, écran, coque arrière, caméra, haut-parleur, module inférieur pour le son et module supérieur pour la caméra frontale). Ces dernières sont disponibles sur le site Internet. Toutefois, les matériaux utilisés font des trajets importants (l'or par exemple vient du Pérou et passe par la Suisse et la Chine avant d'arriver aux Pays-Bas). Parmi les 30 métaux utilisés, l'entreprise met l'accent sur 4 d'entre eux issus de zones non conflictuelles. L'usine de fabrication se trouve en Chine. Fairphone propose aussi un système de recyclage des smartphones : 55% sont reconditionnés et le reste est envoyé dans une installation de recyclage européenne. On peut parler de smartphone low-tech car sa conception est durable (facilement réparable et possibilité de recyclage) et comme dit précédemment, l'accessibilité vient de la possibilité de réparation. Néanmoins, sa fabrication semble demander autant de matériaux que les autres smartphones, notamment parce qu'il possède lui aussi un grand écran (pour pouvoir rivaliser avec les grandes marques). Sa fabrication entraîne d'importants trajets (Fairphone tend à diminuer ces défauts). Son coût relativement élevé (près de 400€) le rend peu accessible.
- Why! [113] est un fabricant d'ordinateurs durables, faciles à réparer (tutoriels sur ifixit et pièces détachées à un prix abordable) et accompagné de logiciels open-source pour pallier l'obsolescence par incompatibilité. Le site ne fournit pas d'informations sur les matériaux utilisés. L'entreprise ne fournit aucune donnée sur la fabrication des ordinateurs, il est donc impossible de savoir quel est réellement l'impact des produits vendus. Les ordinateurs vendus peuvent être considérés comme low-tech pour les mêmes raisons que le Fairphone. L'accessibilité est par contre plus grande car les logiciels pré-installés sont open-source. Comme pour le Fairphone, le prix est relativement élevé.

6.1.2 Techniques candidates

- Le Lightphone II [88] est un téléphone minimaliste sans caméra avec lequel on peut appeler, envoyer des SMS, écouter de la musique... L'écran est en papier électronique et n'affiche que du blanc et du noir, ce qui baisse la consommation électrique. Les matériaux utilisés ne sont pas suivis par l'entreprise. Le téléphone n'est pas plus réparable qu'un autre et l'entreprise ne sait pas s'il est correctement recyclé. L'aspect low-tech de ce smartphone vient de l'élimination des fonctionnalités superflues du produit. Il n'a pas été mis dans la catégorie précédente car il n'est ni plus durable, ni plus accessible qu'un autre smartphone (le prix est de 350€, ce qui est relativement élevé)

pour un smartphone avec des fonctionnalités en moins). De plus, il est souvent acheté comme deuxième téléphone et non comme remplaçant.

- Framework [49] vend des ordinateurs personnalisables (ajout de port par exemple) et facilement réparables (un tournevis est vendu avec la version DIY). Les ordinateurs sont faits avec 50% d'aluminium recyclé et 30% de plastique recyclé. De même que pour Why!, les données sur la fabrication ne sont pas fournies. Ces ordinateurs peuvent être vus comme low-tech car facilement réparables. L'aspect durable n'est cependant pas assez développé.

6.1.3 Techniques incitatives

- Commown [27] est un site qui permet d'acheter des Fairphone, des ordinateurs Why! et un casque plus durable car réparable facilement. Commown se charge d'envoyer les pièces détachées en cas de casse, voire de le réparer. L'initiative est low-tech car elle permet de rendre les objets plus durables. La modularité de l'objet vendu le rend aussi accessible.
- ifixit [56] est un site de tutoriels pour réparer des équipements numériques, de l'électroménager, des véhicules et même des vêtements. Le site en lui-même n'est pas explicitement low-tech mais contribue à une plus grande accessibilité technique et durabilité des objets en général.
- L'ADEME propose une plateforme sur Internet [2] pour pouvoir réparer, louer, emprunter ou donner ses objets de toutes sortes. C'est un site non éco-conçu mais l'initiative renforce l'accessibilité technique et la durabilité des objets.
- Les Ateliers du Bocage [71] est un autre lieu de réparation et de collecte d'équipements numériques français. Ils sont membre d'Emmaüs Connect (voir section *Réutilisation d'équipements numériques*).
- M^2 [78] répare des ordinateurs Windows ou Mac pour les particuliers et les professionnels.
- iode vend des smartphones avec le système d'exploitation iodeOS respectueux de la vie privée [59]. Les smartphones sont neufs ou reconditionnés en France. iodeOS analyse les données manipulées et permet de bloquer des destinataires (publicités, spams...). Le blocage des requêtes indésirables permet de réduire la consommation de batterie et l'entreprise favorise le reconditionnement. L'initiative peut être considérée comme low-tech car permet une diminution de consommation énergétique et surtout rend l'équipement maîtrisable.

6.2 Recyclage des matériaux et équipements

Beaucoup d'équipements numériques sont constitués d'une multitude d'éléments chimiques différents et dans des concentrations très faibles. Ceci rend le recyclage des matériaux très difficile. Pour l'instant, seulement 12 métaux sur 60 ont un taux de recyclage supérieur à 50%. Près de deux tiers des métaux utilisés dans un équipement numérique ont un taux de

recyclage inférieur à 1%. Le recyclage des matériaux est pourtant une alternative à l'extraction des matières premières.

6.2.1 Techniques lower-tech

- Le JerryCan [61] est un serveur construit à base d'un bidon en plastique et de composants électroniques petits, donc peu consommateurs d'électricité, et recyclés. Les logiciels installés sont fondés sur GNU/Linux. Des tutoriels sur Internet pour construire son propre JerryCan sont disponibles, ce qui rend ce serveur accessible. De plus, son coût est réduit car il utilise des matériaux recyclés. Il s'agit d'un serveur durable puisqu'il demande peu de nouvelles matières premières. Le site ne donne aucune information sur la durée de vie d'un Jerry Can.
- Jiva a développé un circuit imprimé nommé Soluboard [63]. En émergeant le circuit dans de l'eau chaude, les fibres naturelles du circuit imprimé partent. On peut alors récupérer les DEEEs, ce qui permettra d'augmenter considérablement le rendement du recyclage des DEEEs. La démarche contribue à la durabilité des équipements numériques. Le recyclage des DEEEs sera aussi plus accessible (mettre de l'eau chaude suffit à séparer les composants électroniques).

6.2.2 Techniques incitatives

- Ecologic [38] est un organisme français dont le but est de gérer la fin de vie des DEEEs ménagers et professionnels depuis 2006. L'organisme récupère polluants et matières premières des DEEEs afin de réutiliser les derniers. En 2015, 80% des DEEEs ont été recyclés, 11% ont été éliminés, 8% ont été valorisés et 1% a été préparé en vue d'un réemploi. Les éco-organismes sont cependant agréés selon le poids de DEEEs collectés, ce qui signifie qu'ils privilégient le recyclage au réemploi. L'initiative s'inscrit tout de même dans une volonté de durabilité. Ecologic cherche à rendre le recyclage plus accessible en créant plus de lieux de collecte.

6.3 Réutilisation d'équipements numériques

Le recyclage est souvent présenté comme la panacée de la sur-consommation. Pourtant, comme nous l'avons dit auparavant, le recyclage des métaux des équipements numériques est pour l'instant presque aussi polluant que leur extraction (et plus cher pour les fabricants) et il y a forcément perte de matière selon les lois de la physique et donc création de déchets. Le recyclage ne sera jamais en mesure de répondre à nos besoins, même limités. Ainsi, il est plus judicieux de se tourner vers la réutilisation et/ou le reconditionnement.

6.3.1 Techniques candidates

- Une étude [67] montre qu'un tiers des serveurs d'une entreprise sont dits comateux ou zombies : ils consomment de l'électricité alors que depuis six mois environ, aucune

requête n'a été faite. L'objectif est donc de trouver ces machines zombies et de les éliminer pour faire des économies et réduire l'impact sur l'environnement d'un data-center. Ces serveurs zombies pourraient être relocalisés, limitant la construction de nouveau matériel. Cette méthode pourrait s'inscrire dans une démarche low-tech.

6.3.2 Techniques incitatives

- eReuse [44] est une plateforme open-source qui permet de réutiliser les équipements électroniques en trouvant les différents composants d'un objet électronique, effaçant les données sur la mémoire, mettant en relation les échangeurs... A travers plusieurs applications, eReuse permet à une personne de donner son équipement numérique ou d'en prendre un. La démarche est low-tech car elle soutient le réemploi. L'application en elle-même n'est pas éco-conçue.
- Depuis 2007, Ordi 3.0 [84] est un organisme français de reconditionnement d'ordinateurs. Grâce à leur annuaire, une personne peut trouver un endroit pour donner, reconditionner ou acheter un ordinateur. C'est un organisme dont le projet est low-tech car il favorise le réemploi. Nous pouvons citer également BackMarket [5].
- Emmaüs Connect [42] est une association française qui redonne et/ ou revend des équipements à des personnes ne pouvant se les acheter au prix du marché. Les entreprises font don de leurs équipements non utilisés (près de 1 million d'ordinateur par exemple) pour qu'ils puissent être redistribués aux 8 millions de Français ne pouvant s'équiper. L'association propose aussi des cours pour pallier la fracture numérique.

Chapitre 7

Architecturer le réseau de façon pérenne

Même si les équipements utilisateurs ont une part importante dans les impacts environnementaux du numérique, il peut être intéressant de réduire ceux de la partie réseau. D'après une étude du CESC [55], 90% de la consommation électrique du réseau provient de la "boucle locale" (partie reliant le client à son opérateur). En effet, le coeur du réseau, constitué de fibres (optique ou en cuivre), consomme bien moins que les technologies sans fil. De plus, c'est la boucle locale qui concentre les infrastructures réseau.

7.1 Réseaux sans fil low-tech

En revenant à la définition du low-tech, un réseau low-tech devrait être : conçu durablement, accessible (ce qui n'est pas le cas actuellement étant donné que seuls 59% de la population mondiale en 2020 peut utiliser Internet), et utile.

Certaines technologies permettent d'augmenter l'efficacité énergétique du réseau mais il s'agit avant tout d'optimisations plus que de low-tech. La plupart s'effectue au niveau du protocole de routage (prochain noeud choisi en fonction de l'énergie restante [9], mode veille des capteurs [3],...). Nous pouvons citer par exemple le consortium de 2015 lancé par Nokia Bell Labs sous le nom de GreenTouch [112] qui recense plusieurs technologies. Certaines d'entre elles auront plus tendance à complexifier le système et/ou à accroître la fabrication d'infrastructures (l'un des projets était de concevoir des antennes basse consommation mais à performance réduite, ce qui pourrait pousser les opérateurs à en implanter plus sur le territoire).

D'un autre côté nous trouvons les Low Power Wide Area Network (LPWAN). Ils permettent de relier entre eux beaucoup d'objets à faible consommation (utilisées surtout dans le cadre de l'IoT) en transmettant de petites quantités données à faible débit et à longue portée. On peut citer par exemple Sigfox [98] et LoRaWAN. Même si ces protocoles sont plus efficaces énergétiquement que d'autres, ils génèrent de nouveaux usages. Ils pourraient induire un effet rebond important car ils se fondent sur la multiplication de capteurs IoT. De plus, ils ne donnent pas l'accès à Internet à la population non connectée de nos jours. Le Lifi [28] fut à un moment présenté comme une alternative au Wifi car moins consommateur d'énergie (grâce aux LEDs) et plus sécurisé (la lumière ne traverse pas les murs). Si le Lifi venait en remplacement, cela nécessiterait de changer le matériel et s'il venait en complément, il favoriserait une

croissance du trafic. Le Lifi semble donc contraire au low-tech.

En parallèle se développent des solutions rendant l'Internet plus accessible. Il s'agit des réseaux communautaires. Ce terme regroupe toutes les infrastructures de communication gérées par un groupe de personnes appelé communauté [82] et proposant une alternative aux réseaux commerciaux. L'on peut aussi parler de réseaux DIY (pour Do It Yourself), dont les routeurs sont déployés par les utilisateurs eux-même [115].

7.1.1 Techniques lower-tech

- Dans le Solar Low-tech Magazine, K. De Decker évoque le sujet des réseaux low-tech [30]. Comme le débit peut être parfois très faible, certains sites et applications sont inaccessibles. Les réseaux tolérants au délai (Delay Tolerant network, DTN) [94] permettent de traiter efficacement des informations elles-mêmes tolérantes au délai. Le paquet est enregistré dans chaque noeud, jusqu'à ce qu'il arrive à destination (voir la section *Annexe* pour plus de détails). Cette technique permet de ne pas stocker d'énergie dans les noeuds (dès qu'il n'y a plus d'énergie, la transmission est arrêtée). Il faut que les applications et sites soient adaptés à cette technique. C'est le cas du moteur de recherche RuralCafé ou de certains sites qui chargent la page affichée et toutes les autres listées dans cette dernière (prefetching ou prélecture en français). Une autre solution évoquée est les data mules. Le principe est de transférer les données en partie par des moyens de transport comme le bus, le train,... Ce dernier, muni d'une antenne Wifi, envoie les données à chaque point d'accès mobile qu'il rencontre. C'est le cas notamment du réseau indien Daknet [10]. Cette méthode permet à plus de personnes d'utiliser Internet et est peu coûteux à mettre en place. Les bus utilisés passaient déjà de villages en villages : le déplacement de personnes est alors couplé à celui des données, il n'y a donc pas d'impacts supplémentaires. Toutefois, si un réseau de bus est déployé pour envoyer des données en supplément de celui déjà en place pour le transport de personnes, cette méthode peut générer des gaz à effet de serre dus à l'utilisation de véhicules. D'un autre côté, le sneakernet est une méthode de transfert de fichier qui se base sur le stockage de lourds fichiers dans un espace de stockage comme clé USB, DVD, disque dur. Cette méthode peut être couplée avec celle des data mules.
Ces méthodes peuvent être considérées comme low-tech pour plusieurs raisons. Elles donnent accès à Internet à une plus large population car les coûts d'aménagement sont très faibles. Les utilisateurs sont poussés à la sobriété car les données ont une taille limitée et le délai d'attente est long. Les DTNs consomment aussi moins d'énergie car elles sont compatibles avec l'utilisation d'énergie renouvelable (stockage de l'énergie non nécessaire).
- Osmocom [85] propose de nombreux logiciels open-source pour les communications mobiles (2G et 3G par exemple). Ce projet accroît l'accessibilité des réseaux mobiles.
- Mazi (ensemble en grec) propose de construire un réseau DIY et communautaire [77]. Un guide est disponible sur Internet et explique comment se connecter à un réseau

existant ou en créer un nouveau. Chaque nouvelle personne représente un noeud et choisit d'être soit un utilisateur soit un administrateur. Elle peut partager sa connexion à Internet. Au niveau du matériel, il s'agit d'un Raspberry Pi (voir section *Terminaux moins énergivores*), une carte SD et une antenne externe. Les applications fournies par défaut permettent d'écrire des fichiers à plusieurs, de partager des photos ou de planifier des rendez-vous. Il existe quatre lieux d'essai de Mazi-zones : en Allemagne, en Suisse, en Grèce et en Angleterre. Le Raspberry Pi permet de réduire la consommation électrique du réseau mais aussi de choisir le type d'alimentation en énergie. Le réseau Mazi répond au problème d'accessibilité et d'utilité car peut fournir une connexion à Internet à faible coût et permet de communiquer au sein de la communauté. C'est pourquoi l'on peut qualifier ce réseau de low-tech.

- Freifunk [50] est le nom d'un firmware (programme intégré à un équipement) allemand pour les routeurs de réseaux sans fil. Les réseaux qui l'utilisent sont des réseaux communautaires maillés (mesh) dans lesquels chaque utilisateur est un routeur. Certains utilisateurs partagent leur accès Internet. Pour l'instant, les réseaux ne sont déployés qu'en Allemagne. Le matériel dépend du réseau communautaire. On peut parler de low-tech car il s'agit d'un réseau accessible et local. La durabilité dépend du matériel (donc de la communauté).
- Cette étude [109] montre le fonctionnement du réseau communautaire Guifi. L'utilisateur possède un noeud, un routeur Wifi. Les noeuds sont du matériel Ubiquiti ou Mikrotik (produits dont le but n'est pas de réduire l'impact de la fabrication). Les liaisons point à point sont bidirectionnelles. Guifi.net est aussi low-tech que Freifunk.
- Les auteurs de [35] décrivent le réseau IoT qu'ils ont créé en Afrique. Leurs expériences ont montré qu'une carte Arduino mini équipée d'un émetteur-récepteur LoRa et de capteurs de chaleur et d'humidité tient au moins deux ans avec deux batteries AA. La technologie LoRa s'appuie sur quatre modes (émission, réception, attente et veille). La carte Arduino a besoin de peu d'énergie. Une solution soulevée est la baisse de la période de communication et d'échantillonnage. Dans les régions rurales, la connexion est limitée, c'est pourquoi les SMS et appels vocaux sont privilégiés. Les auteurs ont aussi choisi de pallier ce problème en proposant une version du cloud plus légère, téléchargeable en cas de connectivité réduite. Le dernier problème rencontré est le choix d'un hôte, souvent trop cher pour la population. Les auteurs ont proposé une application d'hébergement basée sur la technologie container Docker. Le réseau déployé est low-tech pour les mêmes raisons que Freifunk.

7.1.2 Techniques candidates

- L'application Be-Bound [64] (l'entreprise est aujourd'hui en liquidation) permet de se connecter à Internet grâce à un SMS. Leur technologie leur permet de compresser les données pour être envoyée dans un SMS. Cette technique est low-tech car elle permet de donner accès à Internet aux régions reculées et pourrait inciter à la sobriété. Aucune infrastructure ne doit être construite, ce qui permet de rendre cette technologie durable (pas d'extraction de matières premières). L'application n'est cependant pas éco-conçue.

- D'après une étude [91], un réseau approximatif permettrait de réduire la consommation énergétique. Un réseau approximatif est un réseau qui ne répond pas à l'une de ces conditions : connectivité h24, délai inférieur à une demi-seconde, pas d'encombrement et pas d'erreurs. Le but est de faire un compromis entre la qualité et l'efficacité (coûts, énergie...). L'intermittence des noeuds permet de les mettre en mode veille, réduisant l'énergie nécessaire pour les faire tourner. L'enjeu est d'allumer les noeuds quand la connexion est demandée pour ne pas perdre de données en cours. Une technique versatile nommée SDR (Software Defined Radio) peut utiliser plusieurs protocoles en même temps. Une autre idée est de déployer un accès dynamique au spectre : lorsque les utilisateurs principaux n'utilisent pas cette partie du spectre, d'autres peuvent l'utiliser. Les applications doivent être conçues de façon à supporter des erreurs. Les auteurs pensent qu'un réseau approximatif pourrait s'appuyer sur la technologie des réseaux tolérants au délai. L'étude entière est faite en considérant que les ressources seront limitées. La sobriété induite par ce type de réseau et la meilleure durabilité d'un tel réseau le rend low-tech. Le but premier des réseaux approximatifs n'est pas de réduire les impacts du numérique mais de continuer à répondre aux volontés de l'utilisateur peu importe les conditions, ce qui revient à créer un réseau plus résilient.
- Le Wifi passif est une autre alternative au Wifi [66], consommant 10 000 fois moins que le Wifi. Il utilise la rétrodiffusion (backscattering). Les composants analogiques RF sont très consommateurs, l'idée est donc de les supprimer directement des nouveaux équipements. Idéalement, il suffirait d'un seul composant RF dans tout le réseau. Ensuite, les signaux émis sont reflétés vers les équipements utilisateurs. La portée est cependant réduite (30 mètres environ). Jeeva matériels vend des articles avec ce type de Wifi. La technologie est low-tech car utilise les infrastructures déjà existantes et permet de fabriquer de nouveaux équipements beaucoup moins consommateurs. Toutefois, Internet n'est pas plus accessible avec cette technologie (à moins que le matériel coûte moins cher étant donné qu'un élément est supprimé).
- Facebook [65] a créé une plateforme open-source nommée OpenCellular pour relier les zones blanches à Internet selon différents types de communication (téléphonie mobile et Wifi). L'appareil peut résister à des vents forts et des températures extrêmes. L'utilisateur choisit la source d'énergie parmi solaire et power over Ethernet (le fil Ethernet envoie de l'électricité et des données). L'OpenCellular possède cependant une batterie. L'aspect open-source de cette technologie la rend partiellement low-tech. Cependant, la fabrication n'est pas précisée et l'objectif de Facebook est de pousser les nouveaux utilisateurs à utiliser les réseaux sociaux, ce qui génère plus de données. La sobriété et la durabilité ne sont pas présents.

7.1.3 Techniques incitatives

- Cloudy [23] est un cloud open-source pour les réseaux communautaires, surtout Guifi.net. Les services proposés permettent de trouver les personnes connectées au réseau, de sécuriser le réseau, de détecter les erreurs... Cloudy peut être utilisé sur Raspberry Pi, Alix, mini PCs ou ordinateurs classiques (le site cite Dell). Il semble que Cloudy n'est

pas conçu de façon à réduire son poids au maximum mais rentre dans une initiative low-tech (rendre l'accès Internet disponible pour tous).

- netCommons [82] est un groupe de recherche qui soutient et étudie les réseaux communautaires comme Freifunk et Guifi.

7.2 Alimentation des infrastructures

Les communautés qualifiant leurs réseaux de low-tech utilisent la plupart du temps des énergies renouvelables. Les plus courantes sont les énergies solaire et éolienne mais il existe d'autres sources comme l'hydraulique, la biomasse... Des équipes de recherche innovent dans ce secteur, même si souvent les nouvelles techniques déployées tendent à complexifier les systèmes. Notons toutefois que ces formes d'énergie demandent des infrastructures spécifiques dont la fabrication peut nécessiter autant de métaux différents qu'un équipement numérique [46].

7.2.1 Techniques lower-tech

- En Ecosse, un réseau maillé a été établi en alimentant les infrastructures uniquement avec les énergies solaire et éolienne [79]. Il s'agit du projet HopScotch. Grâce à une batterie, il n'y a pas besoin des réseaux électriques actuels. Les éoliennes utilisées ont une puissance de 200W. Pour les panneaux solaires, une interface web permet de les orienter en direction du Soleil. L'utilisation d'énergies renouvelables rend ce réseau low-tech. Ce dernier permet aussi de ne pas dépendre des infrastructures actuelles, et donc d'avoir une connexion à Internet disponible.

7.2.2 Techniques candidates

- Des chercheurs de l'Université de Massachussetts ont développé un équipement qui utilise l'électricité produite par une bactérie à l'air libre [72]. Des nanoparticules de protéines d'une bactérie, qui conduisent l'électricité, sont introduits dans le dispositif. Le courant électrique est généré grâce à la vapeur d'eau de l'atmosphère. Cette source d'énergie est non polluante et renouvelable. Néanmoins, la fabrication des nanoparticules doit avoir un fort impact sur l'environnement et peut complexifier un équipement. De plus, leur recyclage est impossible. L'aspect low-tech de cette technologie en cours de développement est donc faible.
- Il est possible de construire des équipements IoT sans batterie [111]. En effet, des chercheurs ont montré que la 5G pouvait être une source d'énergie. Une antenne équipée d'une lentille Rotman permettrait de récolter des ondes millimétriques. Les capteurs n'auront alors plus besoin de batteries car l'énergie sera transmise par les antennes 5G. Cette technologie intéressante se base sur le développement de la 5G qui augmentera notre usage des réseaux mobiles, et donc ne rentre pas dans une approche de sobriété.
- Revayu est une entreprise [93] qui installe des éoliennes sur les antennes déjà existantes dans des zones venteuses uniquement. Le but est de supprimer les générateurs

diesel qui fournissent de l'électricité en cas de problème, même si des batteries sont implémentés pour fournir de l'électricité jour et nuit. Cette méthode rendrait le réseau plus autonome énergétiquement. Comme Revayu ne donne aucune précision sur la fabrication de ses éoliennes, il est difficile d'affirmer si c'est low-tech ou non.

Chapitre 8

Développer un numérique éco-conçu et accessible

Implicitement, les impacts environnementaux sont aussi dus aux données échangées sur Internet. En effet, plus il y aura de données, plus il y aura d'infrastructures réseau et data-centers pour permettre leur stockage et leur échange. Ainsi, pour diminuer la construction de nouveaux équipements numériques, il faut aussi agir sur le contenu d'Internet.

Des concepts se développent comme le Green IT ou l'éco-conception. Le premier est "l'ensemble des technologies de l'information et de la communication (TIC) dont l'empreinte économique, écologique, sociale et sociétale a été volontairement réduite et/ou qui aident l'humanité à atteindre les objectifs du développement durable." [60] et l'autre est la prise en compte de la protection de l'environnement lors de la conception d'un produit ou d'un service. Le low-tech est bien plus large que l'éco-conception qui ne se concentre que sur l'aspect durable environnementalement d'une technique. Le Green IT, de son côté, n'englobe que la définition technique du low-tech. Le Green IT n'a pas pour objectif de modifier la société en vue d'en construire une plus pérenne. Le Green IT ne doit pas être confondu avec l'IT for Green qui désigne une démarche d'amélioration pour réduire les impacts (environnementaux, économique et sociaux) grâce au numérique [60].

8.1 Design de sites low-tech

Il est possible de réduire la consommation énergétique d'un site web, mais aussi de le rendre plus accessible. La réduction du poids global du site a deux conséquences majeures : il a besoin de moins d'énergie pour être lu et demande moins de bande passante. Il ne faut pas oublier non plus l'une des caractéristiques du low-tech : l'utilité. La création de sites low-tech pousse les développeurs et designers à éliminer les informations inutiles.

Tout d'abord, il est important de se questionner sur l'utilité des images et vidéos mises sur un site. Ce sont des supports aux poids importants. La réduction du poids d'un site va avec celle du nombre d'images/vidéos mais aussi de celle de leur poids. Au niveau des images, on peut utiliser la méthode de diffusion d'erreur comme [95] et [31]. L'ordinateur détermine

l'erreur entre la couleur réelle d'un pixel et la couleur disponible, puis diffuse cette erreur sur certains pixels (il existe plusieurs algorithmes de diffusion d'erreur : tramage, dithering...). Les images n'ont plus que 4 couleurs. Les formats Gif, JPG, PNG, SVG (images vectorielles) et images sprites sont à privilégier [103]. Les images sprites permettent d'associer plusieurs petites images en une seule, du code CSS indique quelle partie afficher [86]. Cette technique permet de ne pas multiplier les requêtes. Au niveau des vidéos, on peut utiliser l'encodage avec par exemple le logiciel Handbrake. L'encodage de vidéos consiste à supprimer les redondances de données. La qualité de la vidéo est réduite mais cela n'est pas visible. Le lazy loading permet de télécharger l'image uniquement quand elle peut être visible par l'utilisateur (donc dans la fenêtre visible du navigateur).

Les cartes interactives sont à éviter car elles sont très lourdes. L'on peut opter pour une carte Google Maps statics (image d'une carte Google, fixe donc) ou SVG [103]. Le site du Low-tech Lab a préféré un annuaire [95].

Des choix esthétiques peuvent diminuer le poids d'un site. Ainsi, il est recommandé de supprimer les ressources implémentées comme les polices et les logos [31]. C'est pourquoi il vaut mieux prendre la police par défaut du moteur de recherche et créer son logo à partir de caractères. Il vaut mieux mettre les liens direct HTML pour les réseaux sociaux, et non les plugins [83]. Beaucoup de sites proposent d'avoir un fond noir mais ceci n'a réellement un impact que si l'écran est à LEDs organiques. En effet, pour un écran à LEDs, les modes noir ou blanc nécessitent l'activation de LEDs [62].

Les services tiers regroupent les publicités, cookies et Google Analytics. Ces derniers consomment beaucoup, en plus de profiler les visiteurs [31]. Les publicités représentent par exemple 39% du poids d'un site web [15]. C'est pourquoi ils ne sont pas inclus dans les sites. Néanmoins, si le site n'est pas auto-hébergé, il est difficile de gérer son site sans un logiciel d'analyse de sites extérieur. Il existe tout de même des alternatives à Google Analytics, comme Plausible [89]. Ce dernier est open-source et met l'accent sur son poids léger, le respect de la vie privée et son serveur alimenté 100% en énergies renouvelables (les informations fournies sont peu précises...).

L'optimisation de l'expérience utilisateur est bénéfique [53]. En effet, si l'utilisateur arrive à trouver le contenu qu'il cherche sur un site, il passera moins de temps sur Internet. L'accessibilité du site en sera augmentée. Pour cela, il est conseillé de : supprimer les éléments inutiles qui perdront l'utilisateur, séparer le texte en plusieurs pages afin que l'utilisateur n'ait pas besoin de parcourir toutes les pages du site, et ne pas rendre les pages indisponibles après lecture pour que l'utilisateur puisse utiliser les boutons retour et suivant (qui demandent moins de requêtes [39]). Cette optimisation doit se faire en complément des autres conseils et ne peut justifier à elle seule l'aspect low-tech d'un site.

Les améliorations se font aussi au niveau des codes CSS (Cascading Style Sheets) et JS (JavaScript). Les fichiers JS impliquent des requêtes faites au serveur, il faut donc minimiser ces fichiers au maximum [103]. L'on peut faire de même avec les fichiers CSS. Ensuite, il est conseillé de privilégier la boucle for plutôt que for...in en JS lorsque c'est possible et les opérations primitives plutôt que les méthodes. La boucle for...in implique une élimination des éléments récurrents, et donc une sorte de pré-lecture avant de rentrer dans la boucle [39].

Enfin, le code doit être validé par W3C. Dans le cas contraire, le moteur de recherche fait les modifications nécessaires, ce qui augmente le nombre de requêtes [83].

Le choix du type de site est important. Un site statique est préférable car ne fait qu'une requête au serveur [31]. Il existe des générateurs de sites statiques comme Pelican et Jekyll. Mais il se peut dans certains cas, comme celui du Low-tech Lab, que les actualisations soient fréquentes. Ceci pousse à choisir un site dynamique [95]. Dans ce cas, il faut opter pour les caches. La mise en cache permet de pré-générer une version statique de chaque page [53], le site est stocké sur le disque dur du serveur et ne demande pas l'utilisation d'une base de données. Les systèmes de gestionnaire de contenu (CMS) sont souvent peu flexibles et contiennent des options non utilisés. Ils ont un poids très lourd. Il faut donc les éviter, ou alors choisir un CMS léger comme Kirby [95]. Ce dernier est un CMS flat-file (il en existe d'autres), qui n'a pas besoin de base de données. Finalement, un conseil est d'instaurer une date de péremption au site pour éviter d'avoir des serveurs zombies [83].

txti [105] est un outil qui permet de créer des pages Internet en se basant sur du code Markdown. L'utilisateur écrit son texte et txti se charge de créer en quelque sorte le site. Cet outil rend l'Internet plus accessible car le style des sites générés est minimaliste et tout le monde peut créer son propre site.

8.2 Sobriété de consommation

D'un point de vue systémique, nous avons vu que le low-tech vise la pérennité de notre société. Cet objectif ne peut cependant être atteint si les utilisateurs continuent à consommer autant. Il est donc important de tourner le numérique vers une modération de la "consommation de données". D'après un rapport du Shift Project [40], les vidéos représentent 80% des données sur Internet, dont 45% viennent du streaming (public ou vidéos à la demande). C'est de ce côté principalement donc qu'il faudrait intervenir, même si les 20% restants (sites web, mails, stockage...) ne sont pas à négliger.

Au niveau des vidéos, il faudrait diminuer leur résolution et limiter leur visionnage. Pour diminuer le nombre de requêtes faites au serveur, il conviendrait de télécharger les vidéos pour les regarder hors-ligne.

8.2.1 Techniques incitatives

- Cold Turkey [25] propose à l'utilisateur de bloquer certains sites web (noms de domaines ou adresse URL précise) et applications. L'application permet aussi de visualiser son temps sur Internet et sur quel site/application. L'application en elle-même n'est pas low-tech mais pousse l'utilisateur à redéfinir ses besoins et à limiter son temps sur Internet.
- Certaines applications peuvent pousser à l'utilisation de données plus légères [90]. C'est le cas notamment de BBC iPlayer qui propose ses vidéos par défaut en définition standard (et non en HD) et de HipChat qui privilégie le chat en ligne plutôt que la vidéo.

- Minimal est une extension de navigateur open-source [80]. Cette extension désactive les autos-plays, cache les commentaires (notamment sur Youtube). De façon générale, l'extension vise à supprimer toutes les techniques de captation d'un site. Cela permet à un utilisateur de ne pas chercher les informations voulues parmi un flot d'informations superflues et de ne pas être poussé à continuer de "surfer" sur Internet. Ainsi, Minimal limite le temps passé sur Internet et pousse à une certaine sobriété.
- Telecoop [102] propose un forfait par Go consommés, ce qui pousse les utilisateurs à réduire leur temps passé sur Internet.

Chapitre 9

Héberger ses données durablement

9.1 Tendances des hébergeurs "verts"

Certains organismes se font appeler "hébergeurs verts". Il convient de différencier les hébergeurs qui utilisent des serveurs alimentés en énergie(s) renouvelable(s) des hébergeurs basés sur la compensation. Nous pouvons citer EcoHost [36], qui se présente hébergeur "eco-friendly" car il alimente ses serveurs avec des éoliennes et plante un arbre tous les mois. La compensation écologique est loin d'être une solution durable. Le but est de contrebalancer les effets sur l'environnement d'un système technique de plusieurs manières comme la restauration d'un milieu, la protection d'une réserve naturelle... Le problème de cette technique est qu'elle pourrait conduire à une certaine légitimité de la destruction des espaces naturels et peut donc être vu comme relevant de l'effet bonne conscience. En effet, les effets réels ne peuvent pas être évalués. Il arrive même parfois que la compensation soit un argument pour un aménagement de tous types (c'est d'ailleurs dans ce cas qu'on se retrouve face à des aménagements qui compensent à 200 voire 300%!). Le site de la fondation Green Web propose une carte de ces hébergeurs [48].

9.1.1 Techniques candidates

- Infomaniak [57] est un hébergeur vert suisse qui propose des serveurs alimentés par des énergies renouvelables (60% hydraulique). Les serveurs possèdent des technologies "low voltage" et sont refroidis par free cooling (voir section *Consommation électrique des data-centers*). Ils ont une durée de vie de cinq ans (ce qui est plutôt court) et sont réutilisés en interne. Les données sur les conditions de fabrication n'étant pas fournies, il n'est pas possible d'affirmer qu'il s'agit d'un hébergeur low-tech stricto sensu.
- Stratosfair [101] propose des serveurs en France, plus petits (150 m² alors qu'en France, la taille moyenne est de 10 000 m²) et alimentés avec des énergies renouvelables (solaire, éolien et méthanisation). La chaleur émise est utilisée dans des bureaux et des serres agricoles. Le premier data-center est à Locminé (Bretagne) depuis 2021. L'entreprise préfère héberger des entreprises locales. La volonté de relocaliser les data-centers, leur alimentation et leur petite taille rend cet hébergeur plus low-tech que d'autres.

Cependant, la fin de vie des serveurs n'est pas précisée, de même que leur fabrication.

9.2 Décentralisation d'Internet

Si de base Internet devait être décentralisé, l'on remarque que ce n'est pas le cas actuellement. Les services en ligne sont principalement gérés par les GAFAM. Des organismes critiquent ce monopole qui atteint à notre vie privée. Ils ont donc développé des services d'hébergement locaux. L'auto-hébergement est aussi une solution, mais demande une maintenance régulière de la part de l'utilisateur. Tous les hébergeurs alternatifs ne font pas partie de CHATONS, notre liste est non exhaustive.

9.2.1 Techniques lower-tech

- Le Collectif des Hébergements Alternatifs, Transparents, Ouverts Neutres et Solidaires (CHATONS) propose des services en ligne libres [21] tout en respectant la vie privée des utilisateurs. Il se présente souvent comme un "réseau d'AMAP du service en ligne". Leur but n'est pas de rendre le numérique plus durable en réduisant les impacts environnementaux des data-centers mais de décentraliser Internet. L'aspect local est mis en avant, plusieurs hébergeurs sont implantés en France et le collectif pousse les utilisateurs à choisir le plus proche.
- mytinyDC [81] propose de concevoir soi-même un serveur qualifié de low-tech sur le site. Il s'agit d'auto-hébergement. Le serveur est basé sur un Raspberry Pi. Il n'est pas doublé (problématique en cas de panne) mais conçu de façon à être le plus fiable possible. Toutes les explications pour construire son propre serveur sont fournies, facilitant son accessibilité. Le Raspberry Pi est souvent désigné comme la base de l'ordinateur low-tech. On peut alors confirmer qu'il s'agit d'un serveur low-tech (en tout cas, bien plus low-tech que d'autres).
- Le site du Solar Low-tech Magazine est auto-hébergé sur un matériel alimenté par des panneaux solaires à Barcelone [31]. Le site est disponible sur Internet en fonction de l'ensoleillement à Barcelone car le serveur n'est pas relié au réseau électrique qui utilise des énergies fossiles. Le site a une durée d'autonomie de deux jours seulement, ce qui veut dire que si un mauvais temps se prolonge pendant plus de deux jours le site sera indisponible. Cette méthode réduit certes l'accessibilité du site mais permet de rendre le système plus autonome et durable.

9.2.2 Techniques incitatives

- YunoHost est un logiciel open-source qui facilite l'auto-hébergement [117]. Le serveur peut être un ordinateur ou une carte ARM (Raspberry Pi, OlinuXino...). Il est possible d'installer des applications pour faire un blog, un cloud, un site web, envoyer des mails... En lui-même, le logiciel n'est pas éco-conçu mais vise à rendre Internet plus maîtrisable.

Chapitre 10

Construire des équipements avec moins d'impacts environnementaux

Les équipements fabriqués de nos jours visent pour la plupart la performance, et non la réduction de la consommation énergétique. Dans une société durable, il se peut que les équipements actuels ne puissent être suffisamment alimentés (si l'on arrive à une utilisation à 100% d'énergie renouvelable, voulue ou non). C'est pourquoi il est nécessaire de réfléchir à la conception d'équipements utilisant moins d'énergie. Ces derniers devront aussi être fabriqués à partir de moins de ressources.

10.1 Consommation électrique des data-centers

Les data-centers sont souvent désignés comme les maux du numérique, alors que globalement les équipements utilisateurs ont bien plus d'impacts environnementaux. Néanmoins, il est possible d'améliorer leur efficacité énergétique, notamment lors de l'étape de refroidissement (40% de la consommation électrique d'un serveur [68]).

Souvent, l'efficacité d'un data-center est évalué grâce au PUE (Power Usage Effectiveness). Le PUE est le rapport entre la consommation énergétique totale (refroidissement, éclairage, serveurs...) et celle des équipements informatiques (serveurs). Idéalement, le PUE devrait être égal à 1, ce qui signifie que 100% de l'énergie apportée au data-center est utilisée par les serveurs. En parallèle se développe l'évaluation grâce au ERE (Energy Reuse Effectiveness). Il s'agit du rapport entre la consommation énergétique moins l'énergie réutilisée et la consommation énergétique des serveurs. L'ERE peut atteindre 0, ce qui signifie que 100% de l'énergie apportée au data-center est réutilisée [87]. L'ERE se rapproche de la notion de compensation et n'indique pas précisément si le data-center est efficace énergétiquement.

De nombreuses solutions ont été développées pour rendre le refroidissement "moins polluant". Par exemple, Google a installé des data-centers en Finlande [68], où le climat est naturellement froid. Les data-centers sont refroidis grâce à l'eau de mer glaciale. Cette solution est néanmoins problématique car elle utilise de l'eau pour des data-centers, le réel impact que peut avoir l'eau chauffée réinjectée dans son milieu est inconnu. De plus, elle ne peut être

globalisée. Facebook et Amazon ont opté pour des système IA. Cependant il est possible, dans le cas d'Amazon, d'avoir des serveurs "à la demande", ce qui induit probablement un stock supplémentaire de serveurs non utilisés. L'efficacité énergétique n'induit donc pas ici une diminution des impacts environnementaux. C'est pourquoi il est plus judicieux de diminuer le nombre de data-centers que de les rendre efficaces, ce qui pourra être possible si l'on diminue le nombre de données (voir la section *Design de sites low-tech*).

10.1.1 Techniques candidates

- Une étude [106] propose plusieurs solutions dans le domaine des data-centers. La virtualisation consiste à faire fonctionner plusieurs serveurs virtuels sur un même serveur physique [41]. Dans certaines entreprises, les serveurs sont utilisés à moins de 15% de leur capacité et un tel serveur ne consomme pas moins qu'un serveur utilisant tout son potentiel. Cette méthode permet de réduire le nombre de serveurs physiques, et donc de réduire le taux de fabrication de serveurs. Elle rejoint la méthode plus catégorique qui consiste à directement réduire le nombre de serveurs. Le passage d'un courant alternatif à un courant continu permettrait d'améliorer l'efficacité d'approvisionnement de près de 10%. Pour cela, l'on supprime certains convertisseurs AC/DC. Il y aura donc moins de matériel électronique dans le data-center.
- EcoInfo [37] explique le fonctionnement du free cooling. Le principe est d'utiliser la différence de température entre l'air (ou eau) extérieur et l'air (ou eau) du data-center. Contrairement aux systèmes de refroidissement classiques, le free cooling n'utilise pas de pompe à chaleur (réfrigérateurs, congélateurs ou climatiseurs), ce qui consomme moins d'énergie et limite leurs fabrications. Il en existe quatre types. Dans le free cooling à air direct, l'air frais de l'extérieur entre dans le circuit d'air. L'air chaud généré par les data-centers est mixé avec l'air extérieur. Si l'air frais de l'extérieur est de "mauvaise qualité", on peut utiliser la technique du free cooling à air indirect qui consiste à filtrer l'air extérieur avant son arrivée dans le data-center. Dans le free cooling à eau direct, l'eau de l'extérieur circule dans le circuit d'eau glacée du data-center. La chaleur émise par ces derniers chauffent l'eau qui est ensuite expulsée à l'extérieur. Dans le free cooling à eau indirect, l'eau de l'extérieur passe par un échangeur eau-eau qui permet de transférer l'énergie thermique de l'eau extérieur à celle contenue dans le réseau du data-center.
- L'Europe a identifié les meilleures pratiques pour réduire la consommation d'un data-center [75]. Il est conseillé de ne pas avoir d'autres équipements que les serveurs nécessitant un refroidissement. L'augmentation de la température de fonctionnement des serveurs réduit l'utilisation d'un système de refroidissement. Il est aussi recommandé de séparer les équipements en fonction de leurs conditions de fonctionnement. Le free cooling est recommandé car permet de s'affranchir des systèmes de refroidissement mécaniques, ou d'une partie du moins. L'installation en ailes chaudes/froides permet de ne pas brasser entre eux l'air chaud et l'air froid. Cette méthode demande une bonne connaissance des flux d'air dans le data-center. Le document conseille également d'adopter une politique de gestion des données, c'est

à dire définir quelles données doivent être conservées pendant combien de temps. Cela évite d'avoir des serveurs "zombies" (voir section *Réutilisation d'équipements numériques*).

- Le "Thin Provisionning" permet d'allouer de la place dynamiquement (au fur et à mesure des besoins), et non dès le départ [26]. Cette technique permet d'avoir sur un même équipement plus de place mémoire. La fabrication de data-centers peut être alors réduite.
- Stimergy [100] vend des chaudières numériques à base de serveurs. La chaudière contient des serveurs plongés dans un liquide permettant de récupérer les calories. Ces dernières sont stockées dans un ballon d'eau chaude. Qarnot [92] vend quant à lui des radiateurs et des chaudières numériques. La source de chaleur est un ensemble de microprocesseurs. Ce système permet de supprimer les installations dont le but est de réduire la chaleur émise par les serveurs. Les systèmes de chauffage numérique sont intéressants car ils peuvent remplacer ceux plus traditionnels (pour l'instant, le remplacement n'est pas total). Mais il ne faudrait pas qu'ils viennent en complément des serveurs existants, et donc impliquent une croissance du trafic de données (effet d'accélération) et une augmentation de la fabrication de serveurs. Pour rendre ces techniques durables, il faudrait être capable de "convertir" les serveurs existants en radiateurs/chaudières numériques.

10.2 Terminaux moins énergivores

Le compromis entre performance et efficacité est applicable aux équipements utilisateurs et une démarche low-tech pencherait vers l'efficacité. Il est intéressant de noter également que l'augmentation de la performance des terminaux (ou équipements utilisateurs), avec les mises à jours notamment, peut engendrer une incompréhension de l'utilisateur. Pour augmenter la durabilité et l'accessibilité des équipements, il est préférable donc de miser sur l'efficacité.

10.2.1 Techniques lower-tech

- Le Raspberry Pi est souvent considéré comme un ordinateur minimaliste [108]. Il a besoin de 2 à 5 W, contre 50W pour un ordinateur portable et 80W pour un ordinateur fixe. Ainsi, il peut être alimenté par des panneaux solaires facilement. La durée de vie des composants est allongée et il n'a pas besoin de ventilateur car il chauffe peu. Son prix abordable et son côté "couteau suisse numérique" le rend low-tech. Néanmoins, son recyclage est tout aussi compliqué que pour les autres équipements. La facilité de réparabilité du Raspberry Pi n'est pas donnée.
- Cette source [1] explicite le matériel utilisé pour le site du solar lowtech magazine. Le serveur est un Olimex Olinuxino A20 Lime2, choisi pour sa faible consommation. L'avantage du matériel Olimex est son caractère entièrement open-source aux niveaux hardware et software, contrairement à Raspberry Pi. Mais il est un peu plus cher et demande plus de connaissances dans les systèmes Linux.

10.2.2 Techniques candidates

- Des chercheurs de l'université de Washington [69] ont créé des objets avec une imprimante 3D qui peuvent se connecter à Internet et envoyer des données sans électronique. Ils l'ont appelé "Printed Wi-fi". Ils utilisent la rétrodiffusion. Un routeur Wifi émet des ondes qui sont rétrodiffusées par une antenne (faite de plastique et de cuivre) incluse dans l'objet. Les fonctions remplies par des composants électroniques sont exécutées par des mouvements mécaniques. Ces derniers déclenchent des engrenages et ressorts. Ceci engendre des connexions et des interruptions avec l'antenne et change le signal renvoyé. Le concept est intéressant mais le plastique est source d'impacts. Il serait intéressant de remplacer le plastique par une autre matière. La technologie est plus accessible que les technologies classiques car les gens peuvent utiliser une imprimante 3D pour produire ces objets.
- Des chercheurs ont développé un circuit intégré inexact, ce qui permet de multiplier par 15 l'efficacité énergétique du circuit [19]. Le processeur fait quelques erreurs, notamment lors d'additions et de multiplications. D'après leur étude, éliminer certaines parties du circuit intégré (pruning) permet de diviser par deux sa consommation d'énergie et sa taille, et double la vitesse d'exécution. Cette approche est utilisée dans des domaines relatifs à la perception humaine (image, vidéo...) car à l'échelle humaine les erreurs ne sont pas visibles en-dessous d'un certain seuil mais aussi dans les domaines de l'IA. Ce concept permettrait de réduire l'impact de la fabrication des équipements (on élimine directement des parties du circuit, on ne les miniaturise pas) et de les rendre plus accessibles au niveau du prix. Les circuits intégrés inexacts pourraient donc rentrer dans la composition d'équipements low-tech.
- Suite au développement des circuits intégrés inexacts, d'autres chercheurs [54] ont créé un système appelé Chisel, qui permet au développeur de choisir un seuil d'erreurs tolérées. Le système a été testé sur des images. En parallèle a été créé le langage de programmation Rely. Le développeur précise le niveau de fiabilité qu'il veut. Un opérateur sous forme de point permet d'indiquer qu'une opération peut être exécutée sur du matériel non fiable. Chisel peut introduire lui-même ces points.

Chapitre 11

Conclusion

Le numérique low-tech existe-t-il ? Au vu des définitions du low-tech, un tel numérique devrait être principalement durable, accessible et utile. Il est cependant difficile de faire respecter cette définition au numérique pour plusieurs raisons.

La première concerne l'utilité du numérique. Certaines sources comme le Low-tech Lab [73] ou l'étude de J. Carrey et S. Lachaize [20] ne considèrent pas le numérique comme faisant partie des besoins de l'Homme. Nous avons auparavant classé le numérique comme répondant à plusieurs besoins définis dans les cellules de la matrice de Max-Neef. Même si l'utilité du numérique est relative, il semble qu'il ne s'agisse pas d'un domaine répondant aux besoins les plus fondamentaux.

Ensuite, le numérique apparaît comme indissociable de l'utilisation de composants électroniques. Ces derniers sont composés de métaux et autres matériaux difficilement recyclables et réutilisables. Partant de ce constat, il sera difficile de diminuer grandement les impacts environnementaux du numérique sans en réduire l'usage même.

Les multiples techniques cités dans ce rapport montrent la difficulté à classer une technique dans la catégorie "techniques lower-tech". La plupart du temps, certains aspects sont négligés ou bien pourraient être abordés d'une manière plus efficace. Ainsi, il est compliqué d'affirmer que le numérique low-tech, vis-à-vis de la définition technique, existe.

C'est pourquoi il semble plus judicieux de parler de numérique *lower-tech*, comme nous l'avons fait auparavant pour classer les techniques, qui tendrait vers l'idéal du low-tech théorique.

Ce numérique lower-tech remplacerait celui que nous connaissons aujourd'hui, et ne viendrait surtout pas en complément de celui-ci (comme le Lightphone II qui, la plupart du temps, n'est pas utilisé comme remplaçant d'un smartphone). Il serait fondé sur des performances moindres, poussant alors à la sobriété, et s'appuyerait sur des équipements simples, réutilisables et facilement réparables. Ce numérique lower-tech permettrait en fin de compte de développer une société plus pérenne que la nôtre.

Chapitre 12

Annexe

12.1 Détails sur les DTNs

- Les réseaux tolérants aux délais (Delay Tolerant Networks) sont une piste intéressante pour réduire la consommation énergétique d'un réseau. Les auteurs de [94] expliquent le fonctionnement d'un tel réseau. Un DTN permet de communiquer dans de mauvaises conditions (environnement extrême par exemple). Les principales différences avec un réseau classique sont le délai long, la fiabilité de transmission faible, la présence d'intermittences et le débit asynchrone. Le principe se base sur une méthode de stockage-transport (store-carry-and forward) : chaque noeud intermédiaire stocke une copie du paquet en entier jusqu'à ce qu'un autre noeud stocke une copie. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'avoir une connexion constante. De plus, cette méthode prend en compte la mobilité des noeuds (on peut penser ici au data mules [30]).
Comme les DTNs sont appliqués dans des cas de connexion très basse, l'on peut facilement imaginer que le contact entre deux noeuds s'arrête avant que la totalité du paquet ait été copié. C'est pour cela que l'on applique une fragmentation sur le paquet, avant ou pendant le transfert. Il existe plusieurs types de routage pour les DTNs.
- Une étude [22] s'est focalisée sur les DTNs en cas d'urgence. La performance d'un DTN est liée au nombre de paquets copiés qui influe sur la consommation d'énergie. Une première idée est de réduire le nombre de copies en choisissant le chemin qui a les plus grandes chances d'arriver à destination. Il existe aussi des solutions au niveau du hardware pour réduire la consommation énergétique. Par exemple, une autre idée est d'activer un noeud à forte consommation dès qu'un noeud à basse consommation arrive dans sa portée et donc qu'une liaison est possible. Pour cela, il faut être capable de prédire les mouvements des noeuds pour ne pas dépasser un seuil d'énergie consommée. Un algorithme est donné dans l'étude.
- Une autre étude sur les DTNs [33] se concentre directement sur l'énergie consommée. De façon générale, les protocoles efficaces énergétiquement cherchent le chemin à suivre en prenant en paramètre l'énergie restante des noeuds.

12.2 Les besoins humains selon Max-Neef

Besoins	Être (qualités)	Avoir (choses)	Faire (actions)	Interagir (paramètres)
Subsistance	santé physique et mentale	nourriture, logement, travail	se nourrir, se vêtir, se reposer, travailler	environnement du lieu de vie, conditions sociales
Protection	soin, adaptabilité, autonomie	sécurité sociale, systèmes de santé, travail	coopérer, faire des projets, prendre soin d'autrui, aider	environnement social, logement
Affection	respect, sens de l'humour, générosité, sensualité	amitiés, famille, relations avec la nature	partager, prendre soin d'autrui, exprimer des émotions	intimité, espaces intimes d'unité
Compréhension	capacité de critique, curiosité, intuition	littérature, enseignants, politiques, éducation	analyser, étudier, méditer, investiguer,	écoles, familles, universités, communautés
Participation	réceptivité, dévouement, sens de l'humour	responsabilités, devoirs, travail, droits	coopérer, s'opposer, exprimer des opinions	associations, partis, églises, relations de voisinage
Loisirs	imagination, tranquillité, spontanéité	jeux, partis, paix intérieure	pouvoir rêver, se souvenir, se détendre, s'amuser	paysages, espaces d'intimité, lieux où on peut être seul
Création	imagination, audace, inventivité, curiosité	aptitudes, qualifications, travail, techniques	inventer, construire, concevoir, travailler, composer, jouer	espaces d'expression, ateliers, publics
Identité	sentiment d'appartenance, estime de soi, cohérence	langue, religions, travail, coutumes, valeurs, normes	apprendre à se connaître soi-même, grandir, s'engager	lieux d'appartenance, cadre quotidien
Liberté	autonomie, passion, estime de soi, ouverture d'esprit	égalité de droits	s'opposer, choisir, prendre des risques, développer une prise de conscience	n'importe où

TABLE 12.1 : Matrice des besoins selon Max-Neef

Bibliographie

- [1] R. R. Abbing. How to build a low-tech website : software and hardware. <https://homebrewserver.club/low-tech-website-howto.html#network>.
- [2] ADEME. longuevieauxobjets-gouv - Accueil. <https://longuevieauxobjets.gouv.fr>.
- [3] M. A. Albream, A. M. Sheikh, M. H. Alsharif, M. Jusoh, and M. N. Mohd Yasin. Green Internet of Things (GIoT) : Applications, Practices, Awareness, and Challenges. *IEEE Access*, 9 :38833 – 38858, Feb. 2021.
- [4] Aurore. Un email, une recherche internet, c'est combien de CO2? <https://www.consoglobe.com/un-email-une-recherche-internet-cest-combien-de-co2-cg>.
- [5] BackMarket. BackMarket - Accueil. <https://www.backmarket.fr/>.
- [6] H. Bateau. La face cachée du numérique, Jan. 2021.
- [7] T. Bauwens, M. Hekkert, and J. Kirzherr. Circular futures : What will they look like? *Ecological Economics*, 175 :106703, 2020.
- [8] F. Berthoud. Obsolescence. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2013/08/27/obsolescence-extrait/>.
- [9] K. S. Bhandari and G. H. Cho. An Energy Efficient Routing Approach for Cloud-Assisted Green Industrial IoT Networks. *Sustainability*, 12(18), 2020.
- [10] M. Bhole and P. Wankhade. Daknet : Architecture and connectivity in developing nations. Technical Report 3, International Journal of Pure and Applied Research in Engineering and Technology, May 2015.
- [11] P. Bihouix. Start-up nation ? non, low-tech nation! *Socialter*, 6 :6, June 2019.
- [12] P. Bihouix. *L'Âge des Low-Tech Vers une civilisation techniquement soutenable*. Seuil, Mar. 2021.
- [13] P. Bihouix, E. Baume de Broses, G. Besse, F. Bonnifet, M. Darras, T. Désaunay, J. M. Gancille, A. Garnier, T. Groussin, T. Guillerrou, A. Keller, C. Lapierre, D. Py, S. Roudaut, A. Sinai, M. Soyer, B. Tassin, A. Vanhove, and D. Viel. Vers des technologies sobres et résilientes –Pourquoi et comment et développer l'innovation" low-tech "? <https://www.lafabriqueecologique.fr/app/uploads/2019/04/Note-31-Low-Tech-VF-1.pdf>.
- [14] P. Bihouix and R. Colon. Audition 7 - Les low-tech, quelle place en école d'ingénieur? P. Bihouix et R. Colon (15/01/2021) - YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=jruZqbLAjK4>.
- [15] F. Bordage. La publicité représente 39% du poids des pages web. <https://www.greenit.fr/2015/09/01/la-publicite-represente-39-du-poids-des-pages-web/>.
- [16] F. Bordage. Minerais des conflits : l'Europe désormais responsable. <https://www.greenit.fr/2021/01/26/minerais-des-conflits-leurope-desormais-responsable/>.
- [17] F. Bordage. Web : éliminer définitivement les publicités. <https://www.greenit.fr/2015/09/15/web-eliminer-definitivement-les-publicites/>.
- [18] F. Bordage. Empreinte environnementale du numérique mondial. resreport, GreenIT, Sept. 2019.
- [19] J. Boyd. Computing experts unveil superefficient 'inexact' chip. <http://news.rice.edu/2012/05/17/computing-experts-unveil-superefficient-inexact-chip/>.

- [20] J. Carrey and S. Lachaize. La recherche scientifique en low-tech : définition, réflexions sur les pistes possibles, et illustration avec un projet de métallurgie solaire. *La Pensée écologique*, 5 :7, Oct. 2020.
- [21] CHATONS. CHATONS - Accueil. <https://www.chatons.org/>.
- [22] H. Chenji and R. Stoleru. 6 - delay-tolerant networks (dtns) for emergency communications. In J. Rodrigues, editor, *Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs)*, pages 105–136. Woodhead Publishing, Oxford, 2015.
- [23] Cloudy community. Cloudy - Accueil. <http://cloudy.community/>.
- [24] CNRTL. OBSOLESCENCE : Définition de obsolescence. <https://www.cnrtl.fr/definition/obsolescence>.
- [25] Cold Turkey. Your future self will thank you. <https://getcoldturkey.com/>.
- [26] P. Comfort. What is Thin Provisioning and Should You Use It? <https://chicorporation.com/what-is-thin-provisioning-and-should-you-use-it/>.
- [27] Commown. Commown - Accueil. <https://commown.coop/>.
- [28] Cornélia. Le Li-Fi, cette technologie qui pourrait remplacer ou compléter le Wi-Fi. <https://www.ecolive.com/fr/green-actu/le-li-fi-technologie-remplacant-ou-complement-du-wifi/>.
- [29] G. Cross. 2016 World’s worst pollution problems. techreport, Pure Earth and Green Cross Switzerland, 2016.
- [30] K. De Decker. How to Build a Low-tech Internet. <https://solar.lowtechmagazine.com/fr/2015/10/how-to-build-a-low-tech-internet.html>.
- [31] K. De Decker. How to build a low-tech website? <https://solar.lowtechmagazine.com/fr/2018/09/how-to-build-a-lowtech-website.html>.
- [32] L. Dedryver and V. Couric. La consommation de métaux du numérique : un secteur loind’être dématérialisé. techreport, France Stratégie, June 2020.
- [33] S. K. Dhurandher, J. Singh, I. Woungang, J. Mishra, and T. Dhankhar. 7 - environment friendly green data broadcasting in delay-tolerant opportunistic networks. In J. J. Rodrigues, editor, *Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs) (Second Edition)*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pages 135–157. Woodhead Publishing, second edition edition, 2021.
- [34] C. Dugast and A. Soyeux. Faire sa part ? pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l’Etat face à l’urgence climatique. techreport, Carbone 4, June 2019.
- [35] C. Dupont, M. Vecchio, C. Pham, B. Diop, C. Dupont, and S. Koffi. An open IoT platform to promote eco-sustainable innovation in Western Africa : Real urban and rural testbeds. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, Aug. 2018.
- [36] Ecohost. Premium Eco-friendly Web hosting. <https://www.eco-host.co>.
- [37] EcoInfo. Le Free Cooling. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2009/10/08/le-free-cooling/>.
- [38] Ecologic. Ecologic - Accueil. <https://www.ecologic-france.com/>.
- [39] ecometer. Best practices. <http://www.ecometer.org/rules/>.
- [40] M. Efoui-Hess. Climat : L’insoutenable usage de la vidéo en ligne. resreport, The Shift Project, July 2019.
- [41] Elit-Technologies. Qu’est-ce que la virtualisation des serveurs ? <https://www.elit-technologies.fr/qu-est-ce-que-virtualisation-serveurs/>.
- [42] Emmaüs Connect. Emmaüs Connect - Accueil. <https://emmaus-connect.org/>.
- [43] Environnement-magazine. Quelle fin de vie pour les puces RFID? <https://www.environnement-magazine.fr/recyclage/article/2015/12/01/46697/quelle-fin-vie-pour-les-puces-rfid>.
- [44] eReuse. eReuse - Accueil. <https://www.ereuse.org/>.

- [45] Fairphone. How do we make a fairer phone? <https://www.fairphone.com/fr/impact/>.
- [46] H. Ferreboeuf, F. Berthoud, P. Bihouix, P. Fabre, D. Kaplan, L. Lefèvre, A. Monnin, O. Ridoux, S. Vaija, M. Vautier, X. Verne, A. Ducass, M. Efoui-Hess, Z. Kahraman, M. Auzanneau, J. M. Jancovici, F. Charpentier, G. Andrieu, J. M. Laperrelle, N. Dedryvère, A. Borghini, and L. Boyer. Lean ICT - Pour une sobriété numérique. resreport, The Shift Project, Oct. 2018.
- [47] V. Forti, C. Peter Baldé, R. Kuehr, and G. Bel. The Global E-waste Monitor 2020. techreport, United Nations University, Dec. 2020.
- [48] T. G. W. Foundation. Directory. <https://www.thegreenwebfoundation.org/directory/>.
- [49] Framework. Framework - Accueil. <https://frame.work/>.
- [50] Freifunk. What is Freifunk about? <https://freifunk.net/en/what-is-it-about/>.
- [51] A. Garric. Combien de CO2 pèsent un mail, une requête Web et une clé USB? https://www.lemonde.fr/planete/article/2011/07/07/combien-de-co2-present-un-mail-une-requete-web-et-une-cle-usb_5982002_3244.html.
- [52] H. Godechot. L'équipement audiovisuel des foyers aux 1er et 2ème trimestres 2020 pour la télévision. <https://www.csa.fr/Informer/Collections-du-CSA/Panorama-Toutes-les-etudes-liees-a-l-ecosysteme-audiovisuel/Les-observatoires-de-l-equipement-audiovisuel/L-equipement-audiovisuel-des-foyers-aux-1er-et-2eme>
- [53] T. Greenwood. 17 ways to make your website more energy efficient. <https://www.wholegraindigital.com/blog/website-energy-efficiency/>.
- [54] L. Hardesty. Harnessing error-prone chips. <https://news.mit.edu/2014/programming-error-for-energy-savings-1030>.
- [55] K. Hinton. Case studies in energy consumption of Internet services :. In *unknown*, Stockholm, Sweden, Apr. 2016.
- [56] ifixit. ifixit - Accueil. <https://fr.ifixit.com/>.
- [57] Infomaniak. Hébergeur écologique. <https://www.infomaniak.com/fr/hebergeur-ecologique/charte-ecologique>.
- [58] A. International. Mon smartphone est-il lié au travail des enfants? <https://www.amnesty.org/fr/latest/campaigns/2016/06/drc-cobalt-child-labour/>.
- [59] iode. iode - Accueil. <https://iode.tech/>.
- [60] G. IT. Définition. <https://www.greenit.fr/definition/>.
- [61] Jerry. You and JerryCan - Accueil. <https://www.youandjerrycan.org/>.
- [62] A. Jindal. What is the impact of Dark Mode on battery drain? <http://mobileenerlytics.com/dark-mode/>.
- [63] Jivamaterials. Jiva - Accueil. <https://www.jivamaterials.com/>.
- [64] S. Joussellin. Be-Bound la start-up qui vous connecte à Internet par SMS. <https://www.rtl.fr/actu/sciences-tech/be-bound-la-start-up-qui-vous-connecte-a-internet-par-sms-7783204873>.
- [65] A. Kashif. Introducing OpenCellular : An open source wireless access platform - Facebook Engineering. <https://engineering.fb.com/2016/07/06/connectivity/introducing-opencellular-an-open-source-wireless-access-platform/>.
- [66] B. Kellogg, V. Talla, S. Gollakota, and J. R. Smith. Passive wi-fi : Bringing low power to wi-fi transmissions. In *13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 16)*, pages 151–164, Santa Clara, CA, Mar. 2016. USENIX Association.
- [67] J. Koomey and J. Taylor. ZOMBIE/COMATOSE SERVERS REDUX. Technical report, Anthesis, Apr. 2017.
- [68] B. L. Comment réduire l'impact des Data Centers sur l'environnement. <https://www.lebigdata.fr/data-centers-environnement>.

- [69] J. Langston. In first, 3-D printed objects connect to WiFi without electronics. <https://www.washington.edu/news/2017/12/05/in-first-3-d-printed-objects-connect-to-wifi-without-electronics/>.
- [70] Legifrance. Article 99 de la loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1). https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2015/8/17/2015-992/jo/article_99.
- [71] Les Ateliers du Bocage. Les Ateliers du Bocage - Accueil. <http://ateliers-du-bocage.fr/>.
- [72] D. Lovely. New Green Technology from UMass Amherst Generates Electricity ‘Out of Thin Air’. <https://www.umass.edu/newsoffice/article/new-green-technology-umass-amherst>.
- [73] Low-tech Lab. Low-tech Lab – Accueil. <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech>.
- [74] D. Mallarino. Agir sur les services numériques. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2021/03/01/agir-sur-les-services-numeriques/>.
- [75] A. Mark, B. Paolo, B. John, N. Liam, R. Andre, and T. Robert. 2018 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency : Version 9.1.0. techreport, European Commission, Feb. 2018.
- [76] K. Marquet, J. Combaz, and F. Berthoud. Introduction aux impacts environnementaux du numérique. In *1024, bulletin de la Société Informatique de France*, pages 85–97. unknown, Apr. 2019.
- [77] Mazi. Mazi - Accueil. <http://mazizone.eu/>.
- [78] Mcarre. Mcarre - Accueil. <https://www.mcarre.fr/>.
- [79] C. McGuire, M. R. Brew, F. Darbari, S. Weiss, and R. W. Stewart. WindFi - a renewable powered base station for rural broadband. In *19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, pages 265–268, Vienna, Austria, Apr. 2012. IEEE.
- [80] Minimal. Minimal - Accueil. <https://minimal.aupya.org/>.
- [81] mytinyDC. mytinyDC - Accueil. <https://www.mytinydc.com>.
- [82] netCommons. netCommons - Accueil. <https://netcommons.eu/>.
- [83] C. numérique Responsable. Les 115 bonnes pratiques. https://collectif.greenit.fr/ecoconception-web/115-bonnes-pratiques-eco-conception_web.html.
- [84] ordi 3.0. Ordi 3.0 - Accueil. <http://www.ordi3-0.fr/index.html>.
- [85] Osmocom. Open Source Mobile Communications. <https://osmocom.org/>.
- [86] M. Otsuka. How to Build a Low-tech Website : Design Techniques and Process. <https://github.com/lowtechmag/solar/wiki/Solar-Web-Design>.
- [87] M. Patterson. ERE : a metric for measuring the benefit of reuse energy from data center. techreport, The Green Grid, 2010.
- [88] L. Phone. The Light Phone - Accueil. <https://www.thelightphone.com/>.
- [89] Plausible. Plausible - Accueil. <https://plausible.io/>.
- [90] C. Preist, D. Schien, and E. Blevis. Understanding and mitigating the effects of device and cloud service design decisions on the environmental footprint of digital infrastructure. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, page 1324–1337, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [91] J. Qadir, A. Sathiaselan, L. Wang, and J. Crowcroft. Taming Limits with Approximate Networking. In *Second Workshop on Computing within Limits*, pages 1–8, California, Irvine, June 2016. Limits2016, Association for Computing Machinery.
- [92] Qarnot. Qarnot - Accueil. <https://qarnot.com/>.
- [93] Revayu. Revayu energy - Accueil. <https://www.revayuenergy.com/>.
- [94] J. Rodrigues and V. Soares. 1 - an introduction to delay and disruption-tolerant networks (dtns). In J. Rodrigues, editor, *Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs)*, pages 1–21. Woodhead Publishing, Oxford, 2015.

- [95] G. Roussilhe, S. Julé, and D. Salmon. Faire un site low-tech. <https://lowtechlab.org/fr/actualites-blog/faire-un-site-low-tech>.
- [96] G. Roussilhe. Une erreur de "tech". <http://www.gauthierroussilhe.com/post/erreur-tech.html>.
- [97] P. Schmitt, F. Bordage, J. F. Girard, C. Eid, H. Ripert, J. C. Chaussat, M. Villemon, T. Vonck, E. Mely, and V. Courboulay. Référentiel Green-IT les 65 bonnes pratiques clés, May 2020.
- [98] Sigfox. Sigfox - Accueil. <https://www.sigfox.com/en>.
- [99] F. Soyez. Pourquoi l'intelligence artificielle est un désastre écologique. <https://www.cnetfrance.fr/news/pourquoi-l-intelligence-artificielle-est-un-desastre-ecologique-39886927.htm>.
- [100] Stimergy. Stimergy - Accueil. <https://stimergy.com/>.
- [101] Stratosfair. Stratosfair - Accueil. <https://stratosfair.com/>.
- [102] Telecoop. Telecoop - Accueil. <https://telecoop.fr/>.
- [103] The Green Emporium. Notre démarche low-tech. <https://the-green-emporium.hashbang.fr/low-tech.html>.
- [104] O. Trudu, A. Pontal, and F. Bordage. Quelle démarche Green IT pour les grandes entreprises françaises? resreport, WWF, Le Pré Saint-Gervais, Oct. 2018.
- [105] B. T.Smith. txti - Accueil. <https://txti.es/>.
- [106] D. Turek, P. Radgen, and S. Türk. Reality vs. Theorie – energetic optimisations for small scale data centres. In *Industrial Efficiency 2018 : Leading the low-carbon transition*, 2018.
- [107] J.-J. Valette. Le numérique, citadelle high-tech? *Socialter*, 6 :32, June 2019.
- [108] J. J. Valette. L'ordi minimaliste existe déjà. *Socialter*, 6 :36, June 2019.
- [109] D. Vega, L. Cerdà-Alabern, L. Navarro, and R. Meseguer. Topology patterns of a community network : Guifi.net. In *2012 IEEE 8th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 612–619, 2012.
- [110] P. Vion-Dury. Le paradoxe de Jevons. *Socialter*, 6 :52, June 2019.
- [111] A. Wainscott-Sargent. Leveraging the 5G Network to Wirelessly Power IoT Devices. <https://rh.gatech.edu/news/645735/leveraging-5g-network-wirelessly-power-iot-devices>.
- [112] A. White. GreenTouch Final Results from Green Meter Research Study Reducing the Net Energy Consumption in Communications Networks by up to 98% by 2020. In *unknown*, 2015.
- [113] Why! L'obsolescence programmée. <https://whyopencomputing.com/fr/>.
- [114] Wikipedia. Besoins humains fondamentaux. https://fr.wikipedia.org/wiki/Besoins_humains_fondamentaux.
- [115] Wikipédia. DiY networking. https://en.wikipedia.org/wiki/DiY_networking.
- [116] Wikipédia. Transactions à haute fréquence. https://fr.wikipedia.org/wiki/Transactions_%C3%A0_haute_fr%C3%A9quence.
- [117] YunoHost. YunoHost. <https://yunohost.org>.