



HAL
open science

Pour un renouvellement durable des processeurs de calcul

Justin Chikhaoui, Abdoulaye Gamatié

► **To cite this version:**

Justin Chikhaoui, Abdoulaye Gamatié. Pour un renouvellement durable des processeurs de calcul. ComPAS 2024 - Conférence francophone d'informatique en Parallélisme, Architecture et Système, Jul 2024, Nantes, France. lirmm-04784105

HAL Id: lirmm-04784105

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-04784105v1>

Submitted on 14 Nov 2024

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

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

Pour un renouvellement durable des processeurs de calcul

Justin Chikhaoui, Abdoulaye Gamatié

LIRMM, Univ. Montpellier - CNRS,
161 rue Ada, 34090 Montpellier - France
prénom.nom@lirmm.fr

Résumé

La révolution numérique a apporté d'innombrables avantages à la société moderne, mais elle s'accompagne également d'un impact environnemental croissant, souvent difficile à appréhender. Pour mettre en place une stratégie de renouvellement durable des processeurs, il est crucial d'effectuer une analyse en profondeur des répercussions environnementales. Nous proposons un modèle de raisonnement simple, basé sur une approche analytique s'inscrivant dans les contraintes planétaires, tout en préservant les acquis sociaux et économiques. A travers une étude de cas portant sur les processeurs Intel et en exploitant les données de l'analyse de cycle de vie (ACV) issues d'une base de données d'analyse de cycle de vie du numérique, nous illustrons la pertinence du modèle de raisonnement, tout en mettant en évidence la complexité inhérente au choix de stratégies de renouvellement des processeurs judicieuses.

Mots-clés : durabilité, impact environnemental, ACV, renouvellement de processeurs

1. Introduction

Dans le contexte actuel marqué par des préoccupations croissantes en matière de durabilité, nos sociétés sont confrontées à l'impératif d'une transformation profonde pour y répondre. En tant que concept clé, la durabilité s'appuie sur trois piliers interconnectés : environnemental, social et économique [16] [13]. L'aspect environnemental vise à minimiser l'impact des activités humaines sur la nature, en adoptant des pratiques respectueuses de l'écosystème et de la conservation des ressources. Le volet social s'attache à promouvoir l'inclusion, l'équité et la qualité de vie au sein des populations. Le volet économique aspire à bâtir des bases solides pour une prospérité à long terme, favorisant l'innovation et la création d'emplois entre autres.

De par ses trois piliers, la durabilité est une question complexe qui nécessite des approches multidimensionnelles. Ces dernières comprennent une diversité de leviers pouvant être législatifs, associatifs, scientifiques, volontaristes, etc. Par exemple, en France, la loi anti-gaspillage vise à limiter les déchets et à préserver les ressources naturelles, la biodiversité et le climat [10]. L'association "Convergences" incite à l'adoption de solutions plus écologiques [4]. Des recherches explorent des méthodes de production d'énergie renouvelable en milieu urbain pour promouvoir la durabilité [9]. Ces leviers doivent s'inscrire dans un contexte de limites planétaires à ne pas franchir, notamment par rapport à des indicateurs tels que l'utilisation des ressources abiotiques, le changement climatique, etc. De plus, ils doivent veiller à améliorer ou préserver les acquis sociaux et économiques (diminution des inégalités).

Notre étude s'inscrit dans ce cadre, en se focalisant sur le pilier environnemental, à travers la question du renouvellement des technologies numériques, et en particulier des processeurs. Pour cela, au moins deux stratégies coexistent en France. La première, mise en évidence par la loi climat et résilience [5], privilégie l'adoption de solutions plus respectueuses de l'environnement, quitte à réduire la durée d'utilisation des équipements. La seconde, quant à elle, a pour but d'allonger la durée de vie des dispositifs existants, à

l'image d'une étude menée par l'ADEME et le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires [11].

Problématique : quelles stratégies de renouvellement des processeurs? La mise en oeuvre des deux stratégies précédentes, soulève une double interrogation : devrions-nous immédiatement remplacer les processeurs existants par des alternatives plus efficaces en énergie, ou bien devrions-nous maximiser leur durée de vie avant de les remplacer? D'une part, l'adoption immédiate d'un nouveau processeur pourrait améliorer la consommation énergétique et les performances opérationnelles, tout en réduisant d'éventuelles dépenses d'entretien. Elle pourrait également stimuler le développement de processeurs plus efficaces. Cependant, cela pourrait conduire à une consommation excessive de ressources abiotiques pour la fabrication de nouveaux processeurs et une augmentation de la production de déchets électroniques. D'autre part, prolonger la durée de vie des processeurs déjà utilisés permet d'économiser à court terme les coûts de remplacement, et de réduire la consommation de ressources abiotiques. En revanche, les processeurs utilisés pourraient devenir obsolètes, moins efficaces et coûteux à entretenir sur le long terme.

Un cadre de travail propice au renouvellement de processeurs. Dans cette étude préliminaire, nous abordons la problématique de renouvellement de processeurs à travers la proposition d'un modèle de raisonnement pour analyser les enjeux environnementaux, des stratégies discutées ci-dessus, et identifier ainsi des contextes d'usage favorables à leur adoption. Par favorable, nous sous-entendons des renouvellements opérés nécessairement dans les limites planétaires, en préservant autant que possible les piliers sociaux et économiques de la durabilité. À titre d'exemple de contexte cible, considérons la politique numérique mise en oeuvre par la ville de Brest [2]. La mairie fournit des ordinateurs aux acteurs volontaires de la ville afin qu'ils puissent héberger des Points d'Accès Public à l'Informatique (PAPI). En plus d'un accès public à Internet, des formations au numérique sont proposées. Cette politique sociale a permis aux citoyens défavorisés d'acquérir un ordinateur reconditionné et un accès Internet à moindre coût. Elle a également favorisé l'émergence de communs numériques. Dès 2005, des acteurs, élus, bénévoles, techniciens, associations, militants du logiciel libre, se sont organisés autour du projet "CD Bureau libre Free Eos" afin de mettre en libre accès les outils de bureautiques. Cette initiative de la ville de Brest a ainsi permis de réduire la fracture numérique (donc les inégalités sociales) et l'illectronisme (pour faciliter l'accès au marché du travail). Cela assure des acquis sociaux et économiques, dont la pérennité dépend de la capacité à maintenir une infrastructure informatique dédiée. Pour cela, une solution possible est le renouvellement adéquat des infrastructures. Cependant, une telle action aura un impact environnemental. Afin de minimiser ce dernier, nous proposons un modèle de raisonnement permettant d'identifier un scénario adapté à cette minimisation, tout en préservant les acquis sociaux et économiques inhérents à la politique numérique, mise en place par exemple par la ville de Brest. La mise en lumière de ce nouveau levier de renouvellement vise à améliorer la durabilité en participant à la réduction des impacts environnementaux associés à des actions sociales ou économiques. Il est également raisonnable de penser que des politiques sociales pourraient exploiter ce renouvellement pour créer ou favoriser d'autres initiatives. Typiquement, lors d'un renouvellement, les acteurs publics pourraient mettre en place des réseaux circulaires facilitant l'accès au numérique, et faire don d'équipements numériques à des associations locales telles que des FabLabs, etc.

2. Modèle de raisonnement pour réduire impact environnemental de processeurs

Le modèle de raisonnement présenté dans cette section, vise à modéliser l'impact environnemental du renouvellement de processeurs en fonction de la durée d'utilisation, en utilisant des notions d'analyse de cycle de vie (ACV) [14]. Il est décrit en trois parties : caractérisation de l'impact environnemental d'un processeur selon sa durée d'utilisation; modélisation de son renouvellement; et étude de son temps d'utilisation optimal avant un renouvellement.

2.1. Impact environnemental d'un processeur en fonction de son temps d'utilisation

L'impact environnemental d'un processeur (IP) est défini par la somme des impacts associés à chacune des phases de son cycle de vie, comme suit :

$$IP(t) = P + D + U(t) + F \quad (1)$$

où P , D et F représentent respectivement les impacts environnementaux associés aux phases de production, distribution et fin de vie. La fonction $U(t)$ estime l'impact environnemental de la phase d'utilisation en fonction du temps opérationnel t . Nous considérons les impacts P , D et F comme étant fixes pour un processeur donné (cf. Section 5.3). Seul $U(t)$ est supposé variable en fonction de la durée d'utilisation. Par ailleurs, pour caractériser $U(t)$ pour tout t , nous supposons déjà disponibles des données d'ACV qui sont capables de nous fournir l'impact de la phase d'utilisation U_{ref} d'un processeur en fonction d'une durée de référence donnée. Nous désignerons cette dernière par le "temps de référence", noté t_{ref} . Ainsi, nous définissons $U(t)$ comme étant le rapport entre le temps d'utilisation et le temps de référence, multiplié par l'impact de la phase d'utilisation de référence, comme suit :

$$U(t) = \frac{t}{t_{ref}} \times U_{ref} \quad (2)$$

2.2. Impact environnemental du renouvellement d'un processeur par un autre

Un service numérique pérenne nécessite généralement le renouvellement de son infrastructure afin d'être maintenu dans le temps. Celui-ci assure une **unité fonctionnelle**, définie par une tâche réalisée sur une période ou durée déterminée. Ainsi, des systèmes différents associés à une même unité fonctionnelle, peuvent être facilement comparés.

Dans le cas du renouvellement de processeurs ici, nous considérons une tâche de calcul intensif (peu importe la nature du calcul) à réaliser par une infrastructure numérique sur une durée $t_1 + t_2$. L'infrastructure utilise au moins deux processeurs durant son fonctionnement : p_1 et p_2 . Le processeur p_1 est utilisé sur une durée t_1 . À la fin de t_1 , p_1 est censé être remplacé par p_2 qui, quant à lui, sera utilisé sur une durée t_2 .

Dans notre objectif d'identifier un scénario de renouvellement minimisant l'impact environnemental, nous cherchons à moduler le temps d'utilisation t_1 du processeur p_1 . Nous noterons le nouveau temps d'utilisation t'_1 . Pour garantir l'absence de dysfonctionnement lié à l'usure d'un processeur induite par son temps d'utilisation, nous considérons que t'_1 ne peut excéder t_1 tel que : $0 < t'_1 \leq t_1$.

Dans le scénario où $t'_1 < t_1$, l'unité fonctionnelle définie ci-dessus risque de ne pas être respectée, car sa première phase de réalisation requiert t_1 . Afin de la maintenir, nous considérerons alors une **pénalité** qui prendra la forme de l'utilisation d'un nouveau processeur similaire au dernier utilisé sur une durée $\Delta = t_1 - t'_1$.

Cela est illustré par la Figure 1, où la partie supérieure montre un scénario témoin au sein duquel p_2 succède pendant t_2 unités de temps à p_1 après t_1 unités de temps. La partie inférieure de la figure illustre un scénario de renouvellement où p_1 est prématurément remplacé après $t'_1 > 0$ unités de temps, i.e., $t'_1 < t_1$.

L'impact environnemental, RP , associé au renouvellement d'un processeur p_1 par p_2 équivaut à la somme des impacts liés au deux processeurs auquel s'ajoute une pénalité. Cette pénalité permet de maintenir l'unité fonctionnelle des deux processeurs de manière à garantir le bon déroulement des tâches à effectuer. De cette manière, on suppose qu'il n'est pas possible d'augmenter le temps d'utilisation au delà de t_{ref} afin de garantir l'absence de dysfonctionnement lié à l'usure induite par un temps d'utilisation excédentaire. Cela est illustré par la Figure 1, où la partie supérieure montre un scénario témoin au sein duquel p_2 succède pendant t_2 unités de temps à p_1 après t_1 unités de temps. La partie inférieure de la figure illustre un scénario de renouvellement où p_1 est prématurément remplacé après $t'_1 > 0$ unités de temps, i.e., $t'_1 < t_1$.

Pour assurer un service/fonctionnalité/mission sur une unité fonctionnelle comparable, il est nécessaire

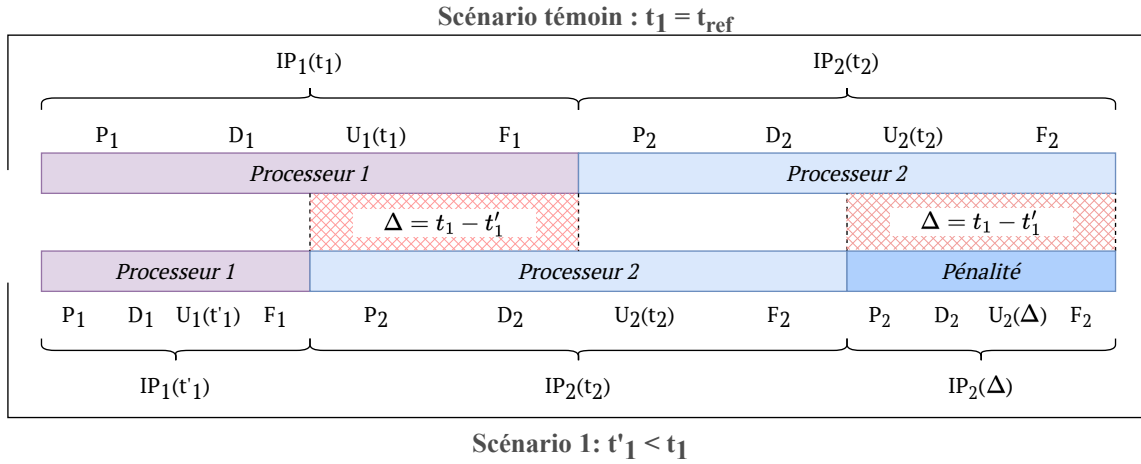


FIGURE 1 – Scénario de renouvellement d'un processeur p_1 par p_2

d'utiliser un nouveau processeur de même modèle que p_2 sur une durée $\Delta = t_1 - t'_1$. L'impact environnemental induit par l'utilisation de ce nouveau processeur durant Δ correspond ainsi à la pénalité indiquée ci-dessus.

L'impact du renouvellement d'un processeur p_1 par p_2 noté RP peut donc être exprimé comme suit :

$$RP(t_1, t_2) = IP_1(t_1) + IP_2(t_2) + IP_2(\Delta) \quad (3)$$

où t_1, t_2 sont respectivement les durées d'utilisation de p_1, p_2 , et Δ est tel que défini dans la Figure 1.

2.3. Borne temporelle de renouvellement afin de minimiser l'impact environnemental

L'identification de bornes temporelles est nécessaire pour minimiser l'impact environnemental lié au renouvellement des processeurs. Celles-ci permettent de déterminer le laps de temps durant lequel nous pourrions constater les bienfaits attendus. Dans le cas où ce laps de temps n'est pas respecté, nous pourrions observer une augmentation de l'impact environnemental. Lors du renouvellement d'un processeur p_1 par p_2 , il est important de s'interroger sur la durée d'utilisation adéquate, $t'_1 < t_1$, au-delà de laquelle aucune réduction de l'impact environnemental du renouvellement n'est possible. Pour déterminer une telle borne, nous considérons l'hypothèse suivante :

réduire t_1 à t'_1 tel que $t'_1 < t_1$, n'induit aucune augmentation de l'impact environnemental du renouvellement de p_1 par p_2 , i.e.,

$$IP_1(t'_1) + IP_2(\Delta) < IP_1(t_1) \text{ avec } t'_1 < t_1 \quad (4)$$

Si l'inéquation (4) est vérifiée, alors il est possible de diminuer l'impact environnemental du renouvellement en diminuant le temps d'utilisation du premier processeur p_1 . Sinon, nous considérons qu'il n'est pas possible de réduire l'impact en diminuant ce temps d'utilisation.

Dans le cas où l'inéquation est vérifiée nous pouvons caractériser t'_1 en le bornant via une réécriture de l'inéquation (4) comme détaillé en annexe, dans la Section 5.1. Pour cela, on réécrit d'abord chacun des termes à l'aide de l'équation (1). Ensuite, chaque terme $U(t)$ résultant est lui-même reformulé à l'aide de l'équation (2) pour expliciter la variable t'_1 dans l'inéquation (4). Enfin, on peut borner t'_1 en appliquant des transformations élémentaires. Le résultat final est le suivant :

$$0 < t'_1 < \frac{t_{ref_2} \times (t_1 \times U_1 - t_{ref_1} \times P_2 - t_{ref_1} \times D_2 - t_{ref_1} \times F_2) - t_1 \times U_2 \times t_{ref_1}}{U_1 \times t_{ref_2} - U_2 \times t_{ref_1}} \quad (5)$$

Les bornes de t'_1 permettent de nous renseigner sur la plage temporelle, durant laquelle il sera bénéfique de renouveler p_1 pour p_2 du point de vue de l'impact environnemental.

3. Application de notre modèle de raisonnement

Le modèle de raisonnement proposé dans la section précédente permet, d'une part, d'évaluer quantitativement l'impact environnemental du renouvellement de différents processeurs. Il offre, d'autre part, la possibilité de déterminer une limite supérieure sur la durée d'utilisation du premier processeur, si une telle limite existe, pour ne pas augmenter l'impact environnemental par rapport à des scénarios-témoins de renouvellement basés sur une durée d'utilisation de référence.

Données et outils de traitement utilisés. Pour évaluer la pertinence de notre modèle, nous l'appliquons à des scénarios de renouvellement de processeurs existants. Les données utilisées proviennent du constructeur de processeurs Intel [8] et de la base de données d'ACV complète et payante de NegaOctet [1]. Neuf modèles de processeurs ont été sélectionnés : i3-4130, i3-6100, i3-8300, i5-4460, i5-6500, i5-8400, i7-4770, i7-6700, i7-8700 (voir Table 1). Pour chacun, nous connaissons son année de mise sur marché, sa puissance dissipée (W), et sa performance de calcul ($GFlops$). La base de données NegaOctet, est quant à elle, utilisée pour estimer l'impact environnemental des processeurs, sur la base des indicateurs suivants : utilisation de ressources ($Kg\ SB\ eq.$), acidification ($mol\ H+ eq.$), écotoxicité, eau douce ($CTUe$), changement climatique ($Kg\ Co2\ eq.$), rayonnements ionisants, santé humaine ($Kg\ U235\ eq.$), particules en suspension (*occurrence de maladie*), utilisation d'eau ($m3\ eq.$), matières premières par unité de service (Kg), énergie primaire totale (Mj).

Deux outils sont utilisés pour le traitement des données. Excel permet de formater et de réunir toutes les informations sur les processeurs dans une feuille de calcul. Ces données sont ensuite importées dans un environnement de programmation Python, utilisant certaines bibliothèques pour le post-traitement : Pandas [15] pour le chargement des données, Numpy [6] pour leur traitement, et Matplotlib [7] et Plotly [12] pour la visualisation.

Évaluation d'un scénario de renouvellement de processeur. Nous envisageons un scénario hypothétique où un acteur public exploite une infrastructure numérique pour assurer un service social semblable à celui de la ville de Brest. Initialement, nous supposons qu'en 2013, l'infrastructure était équipée de processeurs I3-4130 prévus pour une durée d'utilisation de $t_i = 5$ ans. Nous souhaitons explorer la possibilité de minimiser l'impact environnemental du renouvellement des processeurs I3-4130 par des processeurs i7-6700, et contribuer à améliorer la durabilité d'une telle action, tout en préservant le service/fonctionnalité/mission numérique.

Après caractérisation de l'impact environnemental, par phase d'ACV, de chaque processeur à l'aide de NegaOctet, nous résolvons la contrainte (5) reposant sur l'hypothèse exprimée par la contrainte (4). Le résultat, résumé dans la Figure 2, fournit les bornes d'utilisation maximales par indicateur pour observer une possible diminution de l'impact environnemental. De plus, la réduction d'impact est quantifiable en fonction de la durée d'utilisation, pour chaque indicateur, comme présenté dans la Figure 2b.

Les bornes temporelles de la figure 2a révèlent qu'il est possible de réduire l'impact environnemental des indicateurs : "Acidification", "Écotoxicité", "Changement climatique", "Rayonnement ionisant, santé humaine", "Particule en suspension", "Utilisation d'eau", "Matière première par unité de service" et "Total d'énergie primaire" en anticipant le renouvellement du processeur I3-4130 par un i7-6700. Les bornes temporelles issues de la caractérisation des points critiques (5), nous indiquent qu'entre 0 et 2,52 années d'utilisation, 8 indicateurs peuvent être améliorés. Cependant, entre 2,53 et 4,99 années d'utilisation, plus que 7 indicateurs peuvent l'être.

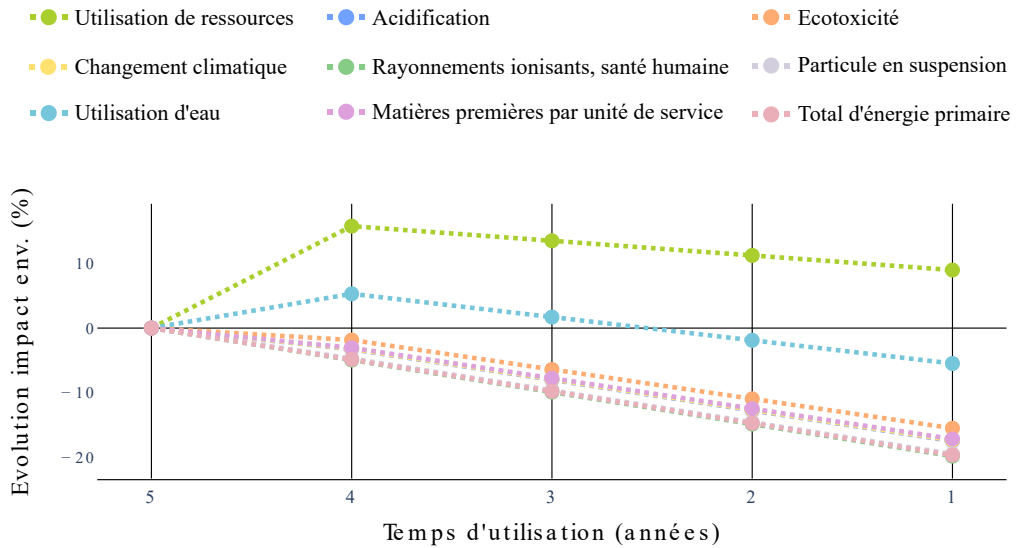
Quand à la Figure 2b, elle suggère que cette amélioration environnementale s'accroît avec la diminution du temps d'utilisation par rapport à une utilisation de référence de 5 ans. Pour 4 ans d'utilisation, la diminution moyenne est de 0.5% alors que pour 1 an d'exploitation, la diminution moyenne est de 13%.

Exploration de trois politiques de renouvellement. Considérons les politiques de remplacement de processeurs suivantes :

- *Croissance* : la génération du nouveau processeur est supérieure à celle du précédent.
- *Décroissance* : la génération du nouveau processeur est inférieure à celle du précédent. Ici, nous

Indicateur	Borne sup. t'_1 (années)
Utilisation de ressources	
Acidification	4,69
Ecotoxicité	4,40
Changement climatique	4,67
Rayonnements ionisants, santé humaine	4,99
Particule en suspension	4,95
Utilisation d'eau	2,52
Matières premières par unité de service	4,64
Total d'énergie primaire	4,97

(a) Table des points critiques



(b) Évolution de l'impact environnemental des indicateurs selon le temps d'utilisation

FIGURE 2 – Analyse du scénario à l'aide du modèle de raisonnement proposé

considérons délibérément une rétrogradation de gamme de processeur.

- *Égalité* : la puissance de calcul du nouveau processeur est identique à celle de n autres processeurs, avec $n \in \mathbb{R}^+$.

Dans un premier temps, nous déterminons le nombre de bornes temporelles comprises entre]0 : 5[années. Pour cela, des matrices de choix de politiques sont présentées dans la Figure 3. Les processeurs sur l'axe des ordonnées sont remplacés par ceux présents sur l'axe des abscisses. Chaque cellule de matrice indique le nombre d'indicateurs environnementaux améliorables par les remplacements.

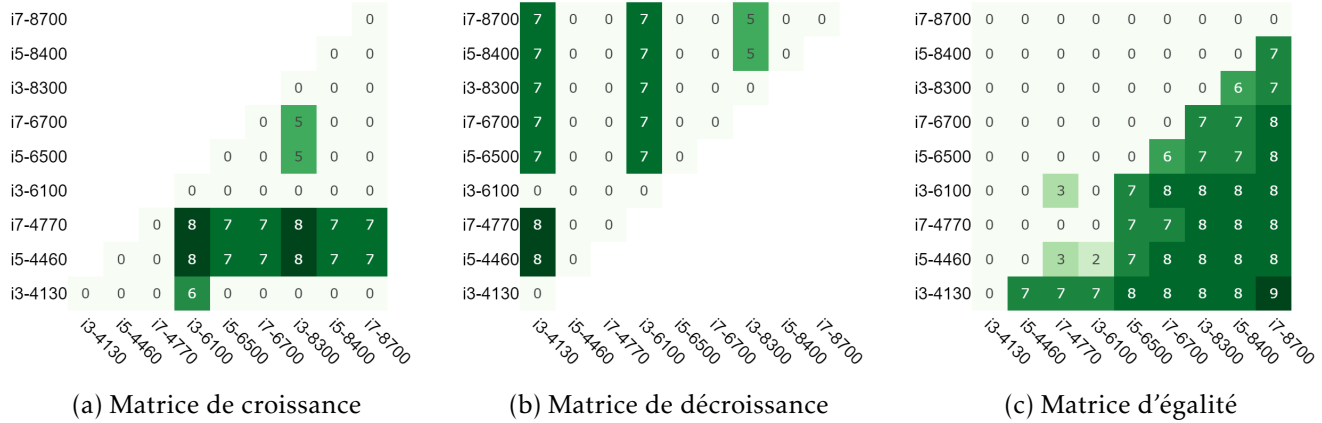


FIGURE 3 – Matrice des scénarios de croissance, décroissance et d'égalité

Dans les trois politiques, nous constatons qu'une optimisation environnementale, qui se manifeste par une réduction du temps d'utilisation des processeurs, permet généralement d'améliorer entre sept et huit indicateurs. La politique de croissance indique que 15 des 36 renouvellements possibles peuvent être améliorés en diminuant le temps d'utilisation des processeurs.

Dans la politique de décroissance, ce nombre diminue à 14. Cette proximité entre les résultats du scénario de croissance et décroissance est notamment explicable par la façon dont on a défini la décroissance. Cette dernière considère qu'un processeur n'est renouvelable qu'à l'aide d'un processeur de génération inférieure. Cela exclut une décroissance associée à une diminution du nombre de CPU utilisés.

Quant à la politique d'égalité, 36 renouvellements sur 81 présentent des améliorations environnementales. Ici, les améliorations se produisent lorsqu'on remplace un processeur par un nouveau dans une gamme (I3, i5, I7) ou génération (4, 6, 8) Intel supérieure. De plus, une valeur positive apparaît sur la diagonale haute de la matrice, alors qu'on pourrait s'attendre à observer uniquement des valeurs positives sur la diagonale basse. Le renouvellement du processeur i3-6100 (6^{ème} génération) vers le processeur i7-4770 (4^{ème} génération) présente une possible amélioration de 3 indicateurs environnementaux en diminuant le temps d'utilisation avant renouvellement. Ce renouvellement en faveur d'un processeur plus ancien peut s'expliquer par les caractéristiques des deux processeurs en question. Les deux processeurs utilisant un même jeu d'instruction (64-bit) et une même extension de celui-ci (Intel® SSE4.1, Intel® SSE4.2, Intel® AVX2). Cependant, le processeur i7-4770 possède 4 coeurs et 8 threads pour uniquement 2 coeurs et 4 threads pour le processeur i3-6100. Il est alors possible d'expliquer la situation par cette différence. Par ailleurs le processeur i3-6100 connaît une lithographie plus fine (14 nm) par rapport au processeur i7-4770 (22nm). Cela peut nous laisser penser que l'architecture d'un processeur a une plus grande importance dans son efficacité énergétique que la finesse de gravure dans ce cas là.

Pour identifier les indicateurs améliorables dans chaque politique, nous pouvons considérer les vues proposées dans la Figure 4. Quelle que soit la politique, nous constatons que ce sont les mêmes indi-

cateurs qui peuvent être améliorés : ‘Acidification’, ‘‘Ecotoxicité’’, ‘‘Changement climatique’’, ‘‘Rayonnement ionisant, santé humaine’’, ‘‘Particule en suspension’’, ‘‘Matière première par unité de service’’ et ‘‘Total d’énergie primaire’’. Les cas de croissance et décroissance offrent des résultats sensiblement similaires, avec le second ayant une marge moyenne de réduction d’impact de 10,66, tandis que le premier affiche une moyenne de 11,55 %. Le cas d’égalité offre en moyenne une réduction d’impact de 28,4 %, dont une nette amélioration de l’indicateur d’utilisation d’eau.

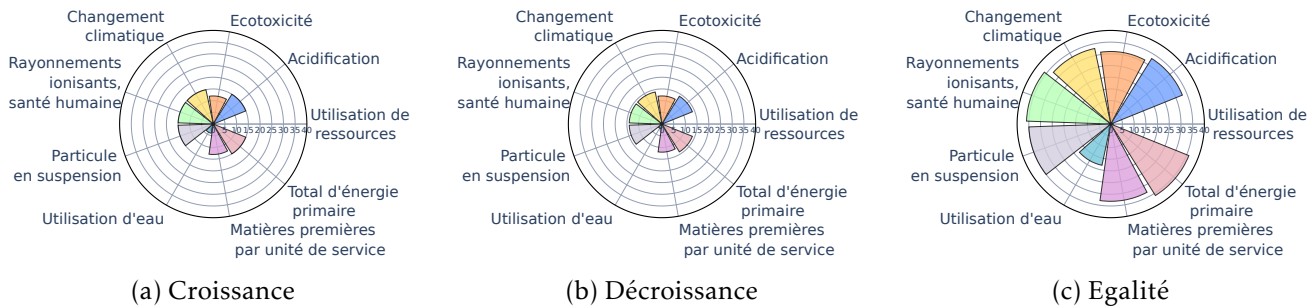


FIGURE 4 – Diagramme radar de différentes politiques de renouvellement de processeurs

Les indicateurs améliorables sont pour le plus souvent : l’acidification, l’écotoxicité, le changement climatique, les rayonnements ionisants et santé humaine, l’émission de particules en suspension, la matières premières par unité de service utilisé et l’énergie primaire totale utilisée. En revanche les indicateurs utilisation de ressources et d’eau auront tendance à augmenter.

Interprétation des résultats et critique. L’interprétation des résultats présentés ci-dessus, a pour but d’illustrer un possible raisonnement, pouvant mener à une prise de décision, suite à une interprétation des résultats. En aucun cas nous ferons une hiérarchisation des différents indicateurs environnementaux utilisés dans l’étude de cas. L’application du modèle de raisonnement présente des résultats contrastés, des possibles baisses et augmentation de l’impact environnemental relatif aux indicateurs comme l’illustre la figure 2b. Il est alors essentiel de contextualiser la situation afin de rendre la prise de décision pertinente.

L’interprétation des résultats conduit à envisager au moins deux stratégies. La première consiste à renouveler les processeur Intel i3-4130 par des processeurs Intel i7-6700 après 5 ans d’utilisation, comme initialement prévu. Elle permet de minimiser la consommation de ressources. Cependant, cette stratégie ne permettra pas de réduire l’impact des autres indicateurs environnementaux. Quant à la seconde stratégie, le renouvellement se ferait après deux ans d’utilisation. Elle permet de réduire tous les indicateurs environnementaux de 12% en moyenne, à l’exception de la consommation de ressources qui augmente de 11%.

Face au dilemme entre la réduction et l’augmentation des indicateurs environnementaux, il est crucial d’adopter un modèle de raisonnement éclairé. La prise en compte des limites planétaires constitue un élément central dans le processus décisionnel. Tout renouvellement doit intégrer la pression environnementale exercée, afin de concilier les réductions et augmentations des indicateurs, sans dépasser la résilience environnementale. Un autre aspect à examiner lors de l’adoption de ce modèle de raisonnement est l’intérêt de l’action. Comme l’illustre l’exemple de la politique numérique de Brest (cf. Section 1), les bénéfices sociaux et économiques associés au renouvellement des processeurs sont essentiels pour proposer une démarche durable. Enfin, il est important de considérer les effets pervers pouvant découler d’un renouvellement précoce. Bien que difficiles à identifier, il est impératif de s’interroger sur les impacts potentiels des actions entreprises pour progresser vers la durabilité.

Dans le cadre de l’urgence climatique actuelle, le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution

du climat (GIEC), dans son 6^{ème} rapport [3], souligne la nécessité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique à 1,5-2°C. Par conséquent, le renouvellement des processeurs après 2 ans semble être plus approprié pour atteindre cet objectif. Par ailleurs, une telle stratégie pourrait stimuler le marché de l'occasion avec la vente des processeurs renouvelés prématurément. Cependant, comme vu précédemment, une application de cette stratégie à grande échelle mettrait les ressources naturelles sous pression, d'où l'impérieuse nécessité de prendre en compte les limites planétaires pour des décisions éclairées.

Il serait à terme intéressant de se pencher sur les répercussions que pourraient avoir ces stratégies sur les piliers sociaux et économiques. Par exemple, comment appréhender le coût économique d'un renouvellement précoce de processeurs au regard des gains économiques liés à la baisse de la consommation énergétique des processeurs. De manière générale, l'application de notre modèle de raisonnement doit nécessairement tenir compte des contraintes sociales et économiques. En effet, les efforts visant à améliorer l'impact environnemental ne doivent pas compromettre ces deux aspects, mais plutôt œuvrer en synergie avec eux. Cette approche intégrée est essentielle pour éviter les pièges potentiels, tels que les effets rebond, et promouvoir une transition vers une société plus respectueuse de l'environnement, équitable et prospère.

4. Conclusion

La sélection d'une stratégie pour le renouvellement des technologies numériques est une question qui nécessite une considération approfondie des implications environnementales. Nous avons proposé un modèle de raisonnement qui contribue à cet objectif. Cela repose sur une méthode analytique qui s'inscrit dans les conditions des limites planétaires, tout en visant la préservation des acquis sociaux et économiques. À travers une étude de cas ciblant des modèles de processeurs Intel et exploitant la base de données NegaOctet, nous avons mis en lumière la complexité du choix de stratégies judicieuses de renouvellement des processeurs.

Notre modèle de raisonnement, certes simple, fournit un moyen afin d'identifier une stratégie durable. Néanmoins, cette étude préliminaire repose sur quelques hypothèses fortes (cf. $t'_1 < t_1$). Il serait pertinent d'affiner ce modèle en relâchant ces hypothèses. De plus, appliquer le modèle de renouvellement à d'autres technologies que les processeurs permettrait de mieux définir ces bornes d'action.

Afin de pouvoir mettre en place un tel modèle, il est essentiel de traiter les questions d'effet rebond et d'après-vie des technologies numériques. Cette considération permettrait de discriminer les utilisations inadaptées du modèle de raisonnement, ainsi que de définir des stratégies pour le recyclage ou le réemploi des technologies renouvelées prématurément. En somme, le choix d'une stratégie de renouvellement des technologies numériques ne se limite pas à répondre aux besoins immédiats, mais s'étend à la contribution à un avenir durable. Notre modèle analytique est un outil pensé dans cette démarche, offrant un regard sur le renouvellement des technologies numériques dans un cadre socio-économique durable.

Remerciements

Ce projet a obtenu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI à travers son programme de recherche exploratoire.

Bibliographie

1. Consortium NegaOctet (APL, LCIE, DDEMAIN et GREEN IT). <https://negaoctet.org/> (Lien accédé en nov. 2024).
2. Briand (M.) et Brunet (B.). – Appropriation sociale du numérique, communs et politique publique, retours sur l'expérience de la ville de brest. *Netcom*, 04 2017.

3. Calvin (K.), Dasgupta (D.), Krinner (G.), Mukherji (A.), Thorne (P. W.), Trisos (C.), Romero (J.), Aldunce (P.), Barret (K.), Blanco (G.), Cheung (W. W.), Connors (S. L.), Denton (F.), Diongue-Niang (A.), Dodman (D.), Garschagen (M.), Geden (O.), Hayward (B.), Jones (C.), Jotzo (F.), Krug (T.), Lasco (R.), Lee (Y.-Y.), Masson-Delmotte (V.), Meinshausen (M.), Mintenbeck (K.), Mokssit (A.), Otto (F. E.), Pathak (M.), Pirani (A.), Poloczanska (E.), Pörtner (H.-O.), Revi (A.), Roberts (D. C.), Roy (J.), Ruane (A. C.), Skea (J.), Shukla (P. R.), Slade (R.), Slangen (A.), Sokona (Y.), Sörensson (A. A.), Tignor (M.), van Vuuren (D.), Wei (Y.-M.), Winkler (H.), Zhai (P.), Zommers (Z.), Hourcade (J.-C.), Johnson (F. X.), Pachauri (S.), Simpson (N. P.), Singh (C.), Thomas (A.), Totin (E.), Alegria (A.), Armour (K.), Bednar-Friedl (B.), Blok (K.), Cissé (G.), Dentener (F.), Eriksen (S.), Fischer (E.), Garner (G.), Guivarch (C.), Haasnoot (M.), Hansen (G.), Hauser (M.), Hawkins (E.), Hermans (T.), Kopp (R.), Leprince-Ringuet (N.), Lewis (J.), Ley (D.), Ludden (C.), Niamir (L.), Nicholls (Z.), Some (S.), Szopa (S.), Trewin (B.), van der Wijst (K.-I.), Winter (G.), Witting (M.), Birt (A.) et Ha (M.). – *IPCC, 2023 : Climate Change 2023 : Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. – juillet 2023.*
4. Convergences, 1Planet4All. – Barometre des solutions durables. <https://www.convergences.org/barometre-des-solutions-durables> (Lien accédé en nov. 2024).
5. ecologie.gouv. – Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924> (Lien accédé en nov. 2024).
6. Harris (C. R.), Millman (K. J.), der Walt (S. J.), Gommers (R.), Virtanen (P.), Cournapeau (D.), Wieser (E.), Taylor (J.), Berg (S.), Smith (N. J.), Kern (R.), Picus (M.), Hoyer (S.), van Kerkwijk (M. H.), Brett (M.), Haldane (A.), del Río (J. F.), Wiebe (M.), Peterson (P.), Gérard-Marchant (P.), Sheppard (K.), Reddy (T.), Weckesser (W.), Abbasi (H.), Gohlke (C.) et Oliphant (T. E.). – Array programming with NumPy. *Nature*, vol. 585, n7825, septembre 2020, pp. 357–362.
7. Hunter (J. D.). – Matplotlib : A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, n3, 2007, pp. 90–95.
8. Intel. – Page d'accueil du site d'intel. <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/homepage.html> (Lien accédé en nov. 2024).
9. Kammen (D. M.) et Sunter (D. A.). – City-integrated renewable energy for urban sustainability. *Science*, vol. 352, n6288, 2016, pp. 922–928.
10. Ministère de la Transition Écologique et de la cohésion des territoires. – La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire> (Lien accédé en nov. 2024).
11. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire et l'ADEME. – Prolonger la durée d'usage des objets : le ministère de la transition Écologique et solidaire et l'ademe lancent une grande campagne de mobilisation. https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2019/11/DP_Campagne_Objets-plein-d-avenirs_Novembre-2019.pdf (Lien accédé en nov. 2024).
12. Plotly Technologies Inc. – Collaborative data science, 2015. <https://plot.ly> (Lien accédé en nov. 2024).
13. Purvis (B.), Mao (Y.) et Robinson (D.). – Three pillars of sustainability : in search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 2018.
14. Réthoré (O.) et Le Féon (S.). – L'analyse de cycle de vie (acv), outil préférentiel de quantification des impacts environnementaux. *L'Encyclopédie du développement durable*, 2010.
15. The pandas development team. – pandas-dev/pandas : Pandas, février 2020.
16. World Commission on Environment and Development. – Our common future. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> (Lien accédé en nov. 2024).

5. Annexe

5.1. Transformation de l'hypothèse des bornes temporelles

Ci-après, nous décrivons les différentes étapes de réécriture permettant de définir l'inéquation (5) grâce à laquelle $t'_1 > 0$ peut être borné. Pour cela, à partir de l'inéquation (4) nous développons successivement $IP(t)$ (cf. Équation (1)) et $U(t)$ (cf. Équation (2)) à l'aide de leurs expressions respectives.

$$\begin{aligned}
 & IP_1(t'_1) + IP_2(\Delta) < IP_1(t_1) \\
 \Leftrightarrow & P_1 + D_1 + U_1(t'_1) + F_1 + P_2 + D_2 + U_2(\Delta) + F_2 < P_1 + D_1 + U_1(t_1) + F_1 \\
 \Leftrightarrow & U_1(t'_1) + P_2 + D_2 + U_2(\Delta) + F_2 < U_1(t_1) \\
 \Leftrightarrow & \frac{t'_1}{t_{ref1}} \times U_1 + P_2 + D_2 + F_2 + \frac{t_1 - t'_1}{t_{ref2}} \times U_2 < \frac{t_1}{t_{ref1}} \times U_1 \\
 \Leftrightarrow & \frac{t'_1}{t_{ref1}} \times U_1 + \frac{t_1 - t'_1}{t_{ref2}} \times U_2 - \frac{t_1}{t_{ref1}} \times U_1 < -P_2 - D_2 - F_2 \\
 \Leftrightarrow & U_1 \times \left(\frac{t'_1}{t_{ref1}} - \frac{t_1}{t_{ref1}} \right) + \frac{t_1 - t'_1}{t_{ref2}} \times U_2 < -P_2 - D_2 - F_2 \\
 \Leftrightarrow & U_1 \times \frac{t'_1 - t_1}{t_{ref1}} + U_2 \times \frac{t_1 - t'_1}{t_{ref2}} < -P_2 - D_2 - F_2 \\
 \Leftrightarrow & \frac{t'_1 \times U_1 - t_1 \times U_1}{t_{ref1}} + \frac{t_1 \times U_2 - t'_1 \times U_2}{t_{ref2}} < -P_2 - D_2 - F_2 \\
 \Leftrightarrow & \frac{t'_1 \times U_1 \times t_{ref2} - t_1 \times U_1 \times t_{ref2} + t_1 \times U_2 \times t_{ref1} - t'_1 \times U_2 \times t_{ref1}}{t_{ref1} \times t_{ref2}} < -P_2 - D_2 - F_2 \\
 \Leftrightarrow & t'_1 \times U_1 \times t_{ref2} - t_1 \times U_1 \times t_{ref2} + t_1 \times U_2 \times t_{ref1} - t'_1 \times U_2 \times t_{ref1} < (-P_2 - D_2 - F_2) \times (t_{ref1} \times t_{ref2}) \\
 \Leftrightarrow & t'_1 \times (U_1 \times t_{ref2} - U_2 \times t_{ref1}) + t_1 \times (-U_1 \times t_{ref2} + U_2 \times t_{ref1}) < (-P_2 - D_2 - F_2) \times (t_{ref1} \times t_{ref2}) \\
 \Leftrightarrow & t'_1 < \frac{(-P_2 - D_2 - F_2) \times (t_{ref1} \times t_{ref2}) - t_1 \times (-U_1 \times t_{ref2} + U_2 \times t_{ref1})}{U_1 \times t_{ref2} - U_2 \times t_{ref1}} \\
 \Leftrightarrow & t'_1 < \frac{t_{ref2} \times (t_1 \times U_1 - t_{ref1} \times P_2 - t_{ref1} \times D_2 - t_{ref1} \times F_2) - t_1 \times U_2 \times t_{ref1}}{U_1 \times t_{ref2} - U_2 \times t_{ref1}}
 \end{aligned}$$

En ajoutant le fait que t'_1 est strictement positif, le résultat ci-dessus devient finalement l'inéquation (5) introduite dans la Section 2.3, comme suit :

$$0 < t'_1 < \frac{t_{ref2} \times (t_1 \times U_1 - t_{ref1} \times P_2 - t_{ref1} \times D_2 - t_{ref1} \times F_2) - t_1 \times U_2 \times t_{ref1}}{U_1 \times t_{ref2} - U_2 \times t_{ref1}}$$

5.2. Données utilisées dans l'évaluation du modèle de raisonnement

Les données relatives aux modèles de processeurs Intel utilisés dans les analyses sont présentées dans la table 1. Elles proviennent du site Intel : <https://www.intel.com/content/www/us/en/search.html#sort=relevancy>

Processeur	Model	Génération	année de lancement	PDT (W)	Puissance (GFlops)
i3-4130	i3	4	2013	54	108,8
i5-4460	i5	4	2013	84	204,8
i7-4770	i7	4	2013	84	217,6
i3-6100	i3	6	2015	51	124,8
i5-6500	i5	6	2015	65	204,8
i7-6700	i7	6	2015	65	217,6
i3-8300	i3	8	2017	62	236,8
i5-8400	i5	8	2017	65	268,8
i7-8700	i7	8	2017	65	307,2

TABLE 1 – Données relatives aux processeurs

5.3. Observations supplémentaires

Comportement des variables face à une dilatation du temps d'utilisation. L'empreinte environnementale lors des phases de production, de distribution et de fin de vie d'une technologie numérique n'est pas directement influencée par sa durée d'utilisation. Toutefois, une prolongation de la durée d'utilisation peut avoir des répercussions indirectes sur la phase de fin de vie. Cette dernière peut prendre diverses formes. Par exemple, une réduction de la durée d'utilisation entraîne une phase de fin de vie prématurée pendant laquelle la technologie est encore fonctionnelle. Elle peut alors être réutilisée grâce au marché de l'occasion ou bien entrer dans une phase de fin de vie telle que décrite dans l'ACV. Dans ces deux scénarios, l'impact environnemental de la phase de fin de vie sera radicalement différent. Dans notre modèle, une telle considération permettrait de favoriser une diminution de la durée d'utilisation.