

Réalisation d'un diagnostic éco-conception de mail - Technologie et usages

RAPPORT DE PROJET



La présente étude a été réalisée avec le soutien financier de l'ADEME, dans le cadre de l'appel à projets "Etudes d'écoconception des produits et des services".

Cette étude est "Libre de diffusion", publiée sous licence Creative Commons



TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| TABLE DES MATIÈRES | 3 |
| ABRÉVIATIONS | 5 |
| I. Contexte : La Naissance du projet Iroco | 6 |
| I.A. Ampleur du contexte écologique | 6 |
| I.B. Ambitions radicales autour d'un outil numérique incontournable | 7 |
| I.C. Enjeux environnementaux du mail | 9 |
| II. Démarche : sincérité et ouverture | 12 |
| II.A. Identifier les leviers de façon objectivée | 12 |
| II.B. Contribuer à des communs | 12 |
| III. Méthodologie : Étude comparative d'une modification d'usage d'un service mail | 12 |
| III.A. Approches méthodologiques | 12 |
| III.B. ACV Attributionnelle | 15 |
| III.B.1 Déroulement de l'étude | 16 |
| III.B.2 Périmètre de l'étude | 16 |
| III.B.3 Modélisation | 19 |
| III.C. ACV conséquentielle court terme ou approche marginale | 24 |
| III.C.1 Tier 1 - Terminaux utilisateur | 25 |
| III.C.2 Tier 2 - Infrastructures réseau | 25 |
| III.C.3 Tier 3 - Data centers | 27 |
| III.C.4 Méthodologie de la consommation électrique marginale | 27 |
| III.C.5 Impact marginal de l'électricité | 29 |
| III.F. L'approche conséquentielle long terme comme outil complémentaire d'aide à la décision | 33 |
| III.G Synthèse méthodologique | 35 |
| IV. Résultats | 35 |
| IV.A. ACV Attributionnelle | 35 |
| IV.A.1 Résultats | 35 |
| IV.A.2 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | 40 |
| IV.A.3 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | 41 |
| IV.A.4 Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure | 42 |
| IV.A.4 Levier 4 : Compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | 44 |
| IV.A.5 Synthèse : Scénarisation des leviers | 46 |
| IV.B. Approche conséquentielle court terme | 47 |
| IV.B.1 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | 48 |
| IV.B.2 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | 48 |
| IV.B.3 Synthèse | 49 |
| IV.C. Approche conséquentielle long terme | 51 |
| IV.C.1 Levier 4 : Compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | 52 |
| IV.C.2 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | 53 |

| | |
|---|-----------|
| IV.C.2 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | 54 |
| IV.C.3 Participation à la réduction de l'immédiateté du numérique : un cinquième levier à valoriser | 59 |
| V. Conclusions et recommandations | 60 |
| IV.A. Analyse et recommandations | 60 |
| IV.A.1 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | 60 |
| IV.A.2 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | 61 |
| IV.A.3 Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure | 61 |
| IV.A.4 Levier 4 : Rétro-compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | 61 |
| IV.A.5 Participation à la réduction de l'immédiateté du numérique : un cinquième levier à valoriser | 62 |
| IV.A.6 Synthèse | 62 |

ABRÉVIATIONS

| | |
|-------|--|
| ACV | Analyse de Cycle de Vie |
| ACV-A | Analyse de Cycle de Vie Attributionnelle |
| ACV-C | Analyse de Cycle de Vie Conséquentielle |
| ADPe | Epuisement des ressources naturelles abiotiques - métaux et minéraux |
| AP | Acidification Potential |
| AS | Analyse de sensibilité |
| FAI | Fournisseur d'accès à internet |
| GES | Gaz à effet de serre |
| GWP | Global warming potential (contribution au changement climatique) |
| IR | Radiations ionisantes |
| PEF | Product Environmental Footprint |
| PM | Particulate Matter (particules fines) |
| PUE | Power Usage Effectiveness |
| UF | Unité fonctionnelle |
| VM | Virtual Machine (machine virtuelle) |

I. Contexte : La Naissance du projet Iroco

I.A. Ampleur du contexte écologique

La société Iroco a été créée avec pour objectif de développer des outils numériques responsables et éthiques à faible empreinte environnementale. Le projet en cours de développement concerne un service d'email responsable. L'objectif recherché est de **minimiser l'empreinte environnementale et sociale du service** en combinant plusieurs approches :

- Un travail sur **l'ensemble de la filière numérique** (hébergement physique, couches applicatives, expérience utilisateur) visant à réduire les impacts environnementaux du service à chaque niveau de la filière. Ce travail se concrétise de diverses manières : partenariat avec un hébergeur engagé dans une démarche environnementale concrète, travail sur l'optimisation du code des différentes couches applicatives afin de réduire la consommation des terminaux, choix de design et d'expérience utilisateur minimisant les ressources numériques utilisées.
- Un engagement fort sur la **protection des données des utilisateurs**, à travers notamment un modèle d'affaires transparent pour le service proposé (abonnement mensuel de quelques euros, pas d'exploitation ni de vente des données personnelles) et un choix d'hébergement des serveurs en France afin de garantir une forme de proximité et de souveraineté sur les données des utilisateurs.
- Une **réflexion sur les usages et les fonctionnalités du service**, avec la volonté de s'inscrire dans une forme de sobriété, voire de frugalité numérique permettant à la fois l'utilité, la simplicité et l'accessibilité du service.

Si l'empreinte environnementale de l'outil email a longtemps été surestimée, au point que "vider sa boîte mail" ait longtemps fait partie des gestes de sobriété numérique les plus mis en avant, des mesures d'impact récentes et plus détaillées ont revu à la baisse cette empreinte¹ : il est désormais admis que l'utilisation de l'email ne représente qu'une fraction très minime de l'empreinte environnementale numérique de l'utilisateur-type. Malgré cet état de fait, **l'ampleur des impacts environnementaux du numérique** dans son ensemble mérite que l'on s'intéresse à l'ensemble des leviers permettant de les réduire, y compris lorsque ces leviers n'agissent — de manière directe en tout cas — que sur des cas d'usage présentant des impacts modérés.

¹ [Tordons le cou aux discussions sur l'impact des e-mails](#), EcoInfo, 9 novembre 2022

Rappelons brièvement en effet les principaux impacts du secteur numérique : en France, d'après le rapport ADEME-ARCEP "Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France"², le numérique est responsable :

- de 2,5% environ de l'empreinte carbone du pays ;
- de 10% environ de la consommation électrique ;
- de la mobilisation de près d'une tonne de ressources par an et par habitant (MIPS normalisé par habitant·e·s français·e·s), correspondant notamment aux matériaux et à l'énergie fossile nécessaires à la fabrication des équipements ;
- de la production d'environ 300 kg de déchets par an et par habitant·e.

La majeure partie de ces impacts est portée par la fabrication des équipements : à titre d'exemple, cette fabrication représente 78% de l'empreinte carbone du secteur, contre 21% seulement pour l'utilisation des mêmes équipements. Par ailleurs, et toujours selon la même étude, la **tendance actuelle** — en l'absence d'efforts de sobriété — est à une **nette augmentation de l'ensemble de ces impacts**, avec à horizon 2050 un quasi-triplement de l'empreinte carbone du secteur et des ressources utilisées et un quasi-doublement de l'énergie consommée. Au vu de l'urgence environnementale actuelle et des grands défis (changement climatique, épuisement des ressources non renouvelables, effondrement de la biodiversité...) que nos sociétés doivent affronter, il est donc urgent de **proposer des trajectoires numériques plus sobres** que le scénario tendanciel.

I.B. Ambitions radicales autour d'un outil numérique incontournable

Si l'email peut sembler démodé face à l'afflux constant de nouveaux modes de communication numériques, il n'en reste pas moins un **outil ubiquitaire** : on dénombrait environ 4,3 milliards d'utilisateur·ices du mail en 2022, et on estimait à environ 330 milliards le nombre de messages électroniques envoyés et reçus par jour cette même année³. La part de l'email dans le trafic Internet mondial, largement dominé par la vidéo, reste cependant modeste du fait de la relative faible quantité de données en jeu. Cela ne constitue bien entendu pas pour autant une raison pour se détourner complètement de la recherche de pratiques et d'usages numériques plus sobres.

Comment agir sur l'empreinte environnementale du mail ? **L'éco-conception logicielle** constitue une première réponse : réduire la consommation du service en énergie et en ressources grâce à une conception frugale, un design adapté ou encore une optimisation du code semble être en effet une approche pertinente. Mais cette approche, si elle n'en reste pas moins valable, atteint rapidement ses limites en matière d'impacts significatifs sur

² Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France, Rapport 2/3, E. Lees-Perasso et al., 2022

³ [Les chiffres 2023 de l'email](#), arobase.org, 24 mai 2023

l'environnement : une étude récente⁴ estime par exemple que l'empreinte carbone d'un email est constituée à 92% par l'amortissement de la fabrication des terminaux utilisés par l'expéditeur et le récepteur, et à **8% seulement par des éléments** (consommation d'énergie à la rédaction et à la lecture, transport et stockage des données) **sur lesquels l'éco-conception logicielle peut jouer un rôle direct.**

S'il ne faut pas négliger le rôle plus indirect de l'éco-conception logicielle sur la réduction des impacts liés aux équipements numériques (en réduisant le potentiel d'obsolescence technologique par exemple, via la rétro-compatibilité avec des terminaux plus anciens), il semble donc nécessaire de pousser la réflexion sur l'éco-conception plus loin qu'une simple « optimisation du code » et de comprendre quels leviers additionnels il est possible d'actionner chez les utilisateurs, notamment en matière d'usages et de comportements. **Quelles seraient les fonctionnalités, et les changements d'usage associés, qui permettraient des gains significatifs d'impact environnemental lors de l'utilisation d'une messagerie électronique ?**

Dans le cadre de cette étude, nous nous proposons donc d'étudier **l'impact de choix d'usage radicaux**, ou du moins pouvant être considérés comme tels dans un contexte où les usages numériques qui nous sont proposés sont guidés par toujours plus d'immédiateté. Ces choix d'usage comprennent par exemple :

- La possibilité d'assigner une priorité à un message électronique, dans le but d'influer sur la vitesse à laquelle il sera délivré ;
- La possibilité de n'envoyer et recevoir les messages (ou les pièces jointes) que si l'utilisateur est connecté à un réseau peu consommateur d'énergie (wifi ou filaire, contrairement aux réseaux de données de type 3G/4G/5G) ;
- La possibilité de n'envoyer et recevoir les messages (ou les pièces jointes) que si le mix électrique est favorable, c'est-à-dire provenant autant que possible d'énergies renouvelables ;
- La possibilité de n'envoyer et recevoir les messages qu'à des moments où l'infrastructure informatique est peu sollicitée, afin d'éviter les effets de pic nécessitant un dimensionnement supérieur de l'infrastructure.

Ces choix d'usage répondent à trois ambitions simultanées :

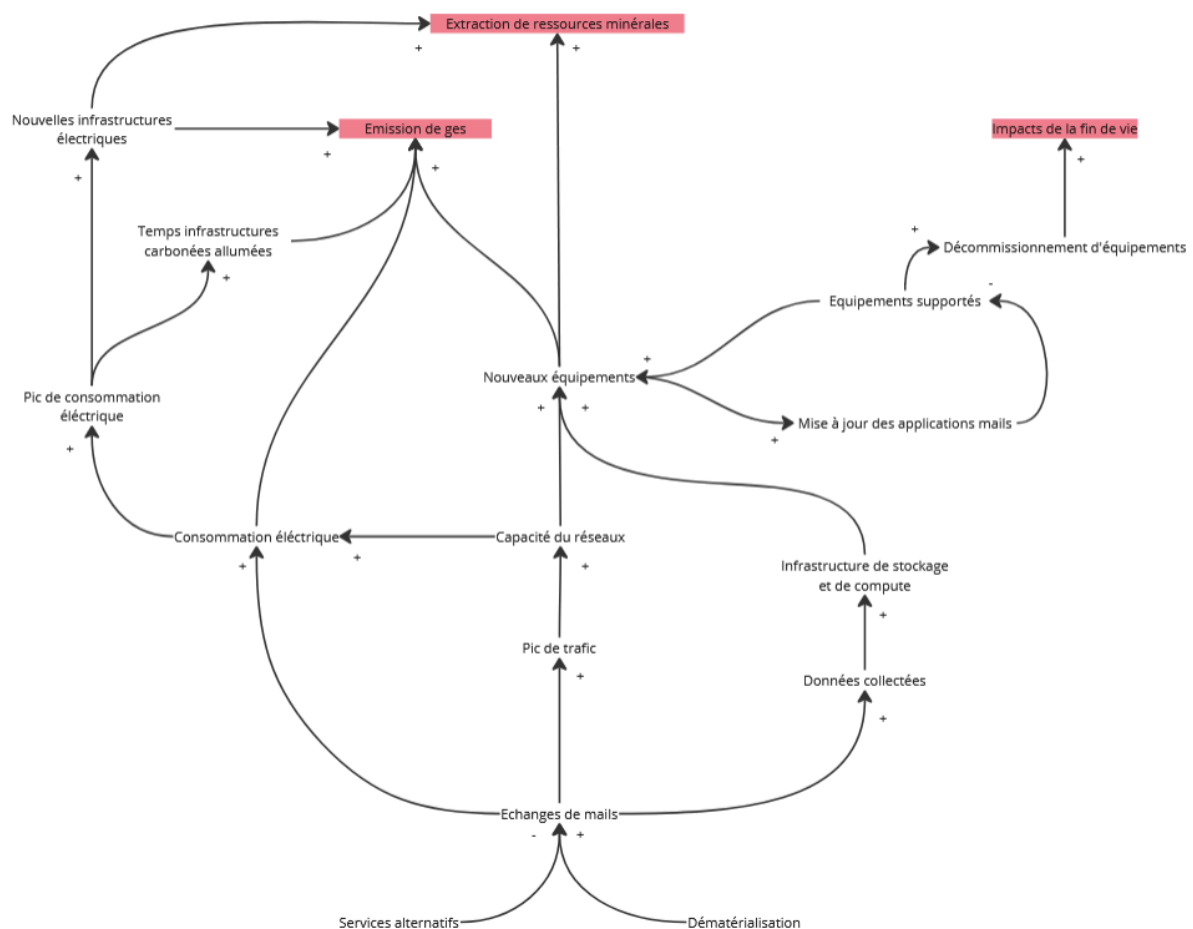
- En premier lieu et de manière évidente, **comprendre les gains d'impact** pouvant être réalisés dans le cadre de l'utilisation de l'outil email ;
- Dans le cas où ces choix d'usage se révéleraient pertinents et significatifs en matière de réduction des impacts, pouvoir **envisager de les étendre à d'autres outils et usages numériques** ;

⁴ [Empreinte carbone d'un e-mail : mythes, réalités et solutions](#), Basile Fighiera, 7 mars 2023

- Enfin, **imaginer les comportements utilisateurs** alignés avec ces cas d'usage, ainsi que la manière de sensibiliser les utilisateurs pour qu'ils soient disposés à adopter ces comportements radicalement différents de la tendance actuelle.

I.C. Enjeux environnementaux du mail

Nous proposons dans cette section de présenter les enjeux environnementaux liés aux services mails sous forme d'un diagramme de système permettant de comprendre les dynamiques menant à l'insoutenabilité de ce type de service.



La dynamique de “dématérialisation” des services et des échanges est soutenue par une **augmentation constante des usages des services numériques**. Malgré l’ancienneté de la technologie email, son usage est toujours central et en constante augmentation. *The Radicati Group* estimait la croissance du nombre de mails envoyés/reçus de plus de 4% par ans entre 2021 et 2025⁵.

⁵ [Email Statistics Report, 2021-2025 | Radicati Group](#), The Radicati Group, Inc, février 2021

| Daily Email Traffic | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Total Worldwide Emails Sent/Received Per Day (B) | 319.6 | 333.2 | 347.3 | 361.6 | 376.4 |
| <i>% Growth</i> | <i>4.3%</i> | <i>4.3%</i> | <i>4.2%</i> | <i>4.1%</i> | <i>4.1%</i> |

Table 1: Worldwide Daily Email Traffic (B), 2021–2025

Cette croissance est portée à la fois par une augmentation des mails envoyés/reçus par personne, mais également par l'arrivée de nouveaux utilisateurs (+3% par an) :

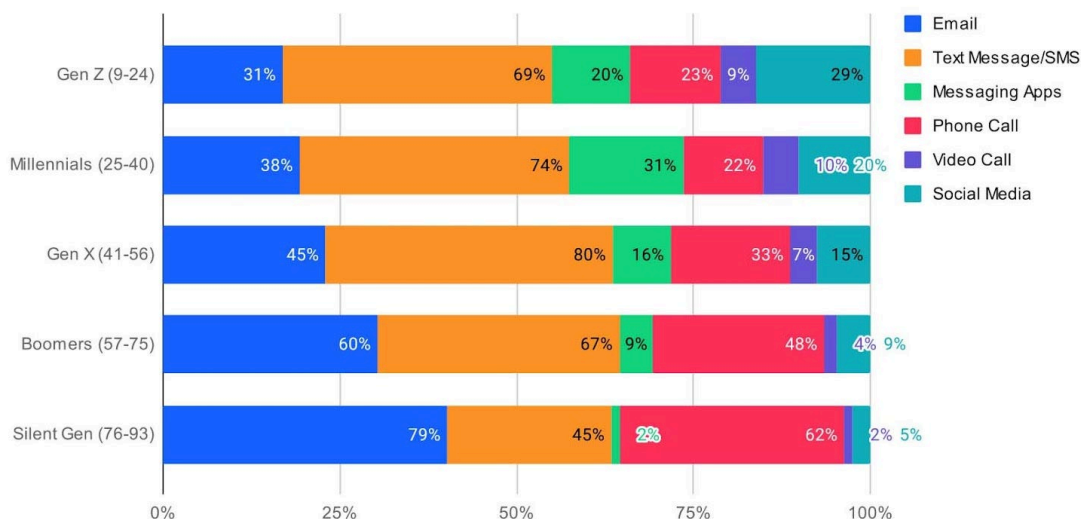
| | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Worldwide Email Users* (M) | 4,147 | 4,258 | 4,371 | 4,481 | 4,594 |
| <i>% Growth</i> | <i>3%</i> | <i>3%</i> | <i>3%</i> | <i>3%</i> | <i>3%</i> |

Table 2: Worldwide Email User Forecast (M), 2021-2025

Les échanges d'emails sont cependant concurrencés par des services alternatifs se substituant à une partie de ses usages, limitant ainsi sa croissance. C'est principalement le cas pour les usages personnels, en particulier pour les plus jeunes générations⁶. L'usage du mail dans un cadre professionnel reste cependant stable.

"Most Used" Communication Method in Personal Life by Generation

Edison Mail "2022 State of Communications Study," January 2022



Edison Mail

⁶ [Across Generations, Email Remains a Critical Tool For Daily Life](#), Edison Mail, Janvier 2022

Face à la croissance des usages, la quantité de mails sauvegardés explose, ce qui nécessite des infrastructures pour les stocker. Ils représentent pour certains acteurs une source de données pouvant être exploitée, notamment pour de l'entraînement d'algorithmes de *machine learning*. Cette croissance nécessite une constante augmentation des capacités de stockage et de calcul, ce qui s'exprime par une **augmentation de la demande en équipements numériques**.

Comme pour l'ensemble des services numériques, les applications d'email et les navigateurs utilisés pour accéder à ces applications sont mis à jour régulièrement avec de nouvelles fonctionnalités. Ces mises à jour rendent certains équipements obsolètes et non supportés : elles poussent donc au **décommissionnement d'équipements fonctionnels** qui doivent être traités prématurément en filière de fin de vie, menant à des impacts environnementaux et sociaux. Ces mécanismes, qu'on peut qualifier d'obsolescence logicielle, poussent également à un **renouvellement prématuré des terminaux**, augmentant ainsi le nombre de nouveaux équipements mis sur le marché.

L'augmentation des échanges email participe également à la **hausse structurelle du trafic** sur les réseaux informatiques ; il faut néanmoins noter que le volume de données généré par les échanges email est faible comparé à celui généré par d'autres services comme le streaming ou la visioconférence. Les impacts environnementaux liés à la hausse du trafic sont de différente nature :

- Hausse de la consommation marginale d'électricité, c'est-à-dire de la consommation d'énergie directement induite par le transfert d'un email sur le réseau ;
- Hausse de la capacité installée : pour absorber la hausse du trafic, en particulier lors de pics, les opérateurs installent de nouveaux équipements. Ces équipements augmentent la consommation électrique fixe des infrastructures réseau.

La **hausse de la consommation électrique** entraîne plusieurs types d'impacts environnementaux :

- Les impacts directement liés aux sources de production électrique : plus la consommation est importante à un instant donné, plus l'électricité mobilisée sera impactante.
- Sur le plus long terme, la hausse de la consommation électrique envoie des signaux au marché de l'électricité pour qu'il se dote davantage de sites de production : leur mise en service induit des impacts environnementaux liés à leur cycle de vie.

Centrale dans tout système décrivant un service numérique, la hausse de la demande en équipements numériques est responsable des impacts liés à l'extraction des matières premières, à la fabrication des équipements, à leur distribution et à leur fin de vie.

II. Démarche : sincérité et ouverture

II.A. Identifier les leviers de façon objectivée

De nombreuses marques et entreprises communiquent aujourd'hui sur les performances environnementales de leurs produits, mais encore trop peu le font en étayant ces allégations par de l'information quantitative et objective. Par conséquent, les cas de *greenwashing* sont très nombreux et contribuent à alimenter le flou sur les impacts environnementaux réels des choix de consommation des utilisateurs, dans le secteur du numérique ou ailleurs.

L'ambition de la présente étude est de se placer à rebours de cette tendance et de **quantifier avec transparence et honnêteté les impacts des différents leviers considérés**, ainsi que leur potentiel et leurs limites, afin de fournir une information fiable et étayée. La crédibilité de l'évaluation est notamment permise par une méthodologie reposant sur l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), une méthodologie normée (voir ci-dessous), et par l'ouverture au public des données et des outils utilisés.

II.B. Contribuer à des communs

L'évaluation des impacts environnementaux des produits et services numériques a connu d'importants progrès au cours des dernières années, mais se heurte encore à un manque de données fiables et à un manque de transparence de la part de beaucoup d'acteurs du numérique. L'intention de la présente étude est donc de contribuer aux communs (données, cas d'usage, retours d'expérience...) dans une démarche *open data*, afin de collaborer de manière ouverte avec l'ensemble de l'écosystème du numérique responsable.

III. Méthodologie : Étude comparative d'une modification d'usage d'un service mail

III.A. Approches méthodologiques

L'objectif de ce rapport est de répondre à une question de comptabilité environnementale comparative :

Quels sont les impacts environnementaux d'un changement d'usage de service mail ?

Plusieurs manières d'appréhender cette question et d'y répondre sont possibles : on parle alors de différents *paradigmes de modélisation*. Nous proposons dans cette étude de présenter et d'appliquer **trois paradigmes différents** afin de proposer la vue la plus globale possible des impacts induits par le service analysé.

Le **paradigme attributionnel** est celui utilisé dans la majorité des cas, en particulier dans les études relatives aux services numériques. Il est représenté par le Bilan Carbone ou par l'ACV-attributionnelle (ACV-A) que nous allons appliquer ici. Ce paradigme entend caractériser les impacts d'une Unité Fonctionnelle⁷ (UF) (service, produit...) en lui attribuant une part des impacts globaux de la technosphère⁸. L'attribution est établie en suivant les liens physiques (énergie et matière) et monétaires nécessaires à la mise en œuvre de l'UF. D'un point de vue pratique, l'objectif est d'imputer (ou *d'allouer*, en termes ACV-A) à l'UF une part des impacts des ressources, services et produits mobilisés pour sa mise en œuvre. D'un point de vue théorique, dans le paradigme attributionnel, la somme des impacts des biens de consommation finale sera égale à l'ensemble des impacts de la technosphère puisque chaque bien de consommation final portera une part des impacts de l'ensemble des activités humaines depuis les premières technologies. Dans les faits, les règles de coupure⁹ écartent les impacts des infrastructures passés, car on considère qu'elles ont déjà été amorties sur un nombre important de biens et services.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'associer une matérialité environnementale à l'ensemble de la technosphère tout en attribuant des responsabilités à tous les impacts qui en sont issus. Sa principale limite réside dans le fait qu'elle ne permette pas de déterminer les mécanismes physiques et socio-économiques induits par la mise en œuvre de l'UF : elle ne s'intéresse pas au changement induit par l'UF mais cherche plutôt à déterminer a posteriori les responsabilités environnementales associées à cette UF.

À l'inverse, le **paradigme conséquentiel** cherche à identifier les impacts issus du changement induit par l'unité fonctionnelle. En d'autres termes, il s'agit de faire la différence entre un monde dans lequel l'UF a été mise en œuvre et un monde hypothétique (appelé *scénario contrefactuel*) où l'UF n'a pas été mise en œuvre. On s'intéresse dans cette approche uniquement aux effets postérieurs à la mise en œuvre de l'UF, là où le paradigme attributionnel va également regarder dans le passé les impacts des ressources qui ont été nécessaires à sa mise en œuvre. Dans la pratique, on se pose la question de la prise en considération d'un impact en se demandant si cet impact aurait été produit sans l'UF. L'avantage de ce principe est qu'il décrit les conséquences physiques et socio-économiques réelles induites par la mise en œuvre d'une UF supplémentaire. Il permet donc de répondre à des questions sur le choix d'une action (par exemple, quel est l'impact de charger son

⁷ L'unité fonctionnelle est l'unité de mesure utilisée pour évaluer le service rendu par le produit. De la même manière que pour comparer le prix de deux fruits, un consommateur ramène les prix au kilo, pour comparer les impacts environnementaux de deux produits, on ramènera les impacts à une unité de mesure commune. Voir <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/analyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv>

⁸ La technosphère correspond à la partie de l'environnement transformée par l'humanité.

⁹ Règles de l'ACV permettant d'exclure une partie des flux considérés dans l'inventaire tant que les flux exclus ne représentent pas une part significative de l'impact de l'UF.

véhicule électrique à 16h ? quel est l'impact de l'électrification de 80% du parc automobile à l'horizon 2040 ?). Sa principale limite réside dans le fait que cette approche ne prend pas en compte les impacts des infrastructures existantes. Cette approche ne permet donc pas un inventaire exhaustif des impacts issus de la technosphère.

Dans le schéma ci-dessous, qui illustre la différence entre les deux approches décrites plus haut, le cercle représente l'ensemble des impacts issus de la technosphère. Dans l'approche attributionnelle, on cherche à déterminer quelle part de ce cercle on peut attribuer à notre unité fonctionnelle : la forme du cercle n'est pas modifiée par cette procédure. À l'inverse, dans l'approche conséquentielle, on cherche à déterminer comment le cercle va être modifié par l'UF en ajoutant ou en retirant des impacts.

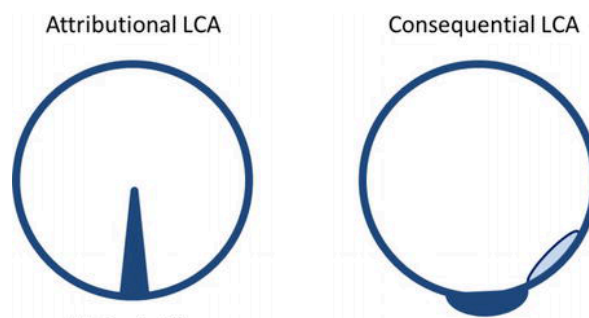


Illustration of accounting and consequence LCA (based on Weidema [12]). Ekvall, T. (2020). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.89202

On peut distinguer **deux formes d'approche conséquentielle** : le conséquentiel court terme ou *approche marginale* et le conséquentiel long terme. Puisque ces deux formes se distinguent selon un concept temporel (court/long terme) qui est par essence relatif, elles ne doivent pas être appréhendées de manière binaire mais plutôt comme un continuum.

L'approche **conséquentielle court terme**, ou approche marginale, s'intéresse aux impacts environnementaux directement induits par un changement marginal de la consommation ou de la production (e.g. impact d'une unité produite supplémentaire). Dans cette approche, on s'intéresse aux conséquences physiques marginales, c'est-à-dire à la différence entre le système considéré suite à la mise en œuvre de l'UF (surconsommation d'énergie, de matières...) et un système contrefactuel. Dans cette approche, seules les infrastructures existantes sont considérées (infrastructure constante).

L'approche **conséquentielle long terme** s'intéresse aux changements sur des temps plus longs. Il inclut plus facilement les mécanismes socio-économiques conséquents à la mise en œuvre de l'UF. Il permet d'aborder les effets indirects de l'UF : effets rebond, substitution, effets d'induction... Dans cette approche, on peut prendre en compte le déploiement de nouvelles infrastructures.

Il faut noter qu'aucun de ces paradigmes n'est intrinsèquement plus valable qu'un autre. Ils doivent néanmoins être mobilisés de manière éclairée en fonction de la question à laquelle ils doivent répondre. Dans cette étude, nous conduisons une ACV Attributionnelle afin de donner à voir la matérialité des différents leviers proposés et nous proposons également de mobiliser les deux formes d'approche conséquentielle. L'approche conséquentielle court terme s'intéressera aux impacts marginaux des leviers proposés de manière quantitative, quand l'approche conséquentielle long terme s'intéressera de manière qualitative aux effets environnementaux induits par une généralisation de certains leviers sur un temps plus long. Le tableau ci-dessous récapitule les différentes approches adoptées :

| Méthode | Question théorique | Dans notre cas |
|-----------------------------|---|--|
| Attributionnelle | Quelle part des impacts environnementaux issus de la technosphère doit-on assigner à notre UF ? | Quelle est la différence dans la part des impacts environnementaux issue de la technosphère attribuable à l'UF pour chacun des leviers implémentés ? |
| Conséquentielle court terme | Quel est l'impact environnemental de la mise en œuvre de l'UF ? | Quelle est la différence d'impacts environnementaux induite par la mise en œuvre de l'UF pour chacun des leviers implémentés ? |
| Conséquentielle long terme | | Quel est l'impact de la généralisation de chacun des leviers ? |

III.B. ACV Attributionnelle

Comme présenté dans la norme ISO 14040:2006¹⁰, une étude ACV se compose de 4 étapes interdépendantes :

1. Définition de l'objectif et du périmètre,
2. Analyse d'inventaire du cycle de vie (ICV),
3. Analyse d'impact sur le cycle de vie (AICV),
4. Interprétation des résultats du cycle de vie.

L'ACV est une technique itérative dans laquelle chaque phase utilise les résultats des autres, contribuant à l'intégrité et à la cohérence de l'étude et de ses résultats. Il s'agit d'une approche holistique et par conséquent, la transparence dans son utilisation est cruciale pour assurer une interprétation adéquate des résultats obtenus.

¹⁰ ISO 14040:2006 - Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework

Remarque : l'ACV traite des impacts environnementaux potentiels, et ne prédit donc pas les impacts environnementaux réels ou absolus.

III.B.1 Déroulement de l'étude

L'étude a été organisée selon les étapes suivantes :

- Définition de l'objectif et du périmètre de l'étude, alignement sur le fonctionnement de la messagerie,
- Définition du scénario initial et des flux de référence,
- Définition des leviers à évaluer,
- Collecte des données spécifiques et marché,
- Évaluation et analyse des leviers.

Des points de synchronisation réguliers ont été effectués avec l'équipe Iroco, entre chacune de ces étapes.

III.B.2 Périmètre de l'étude

Objectif et périmètre

L'étude consiste en une évaluation environnementale via l'analyse de cycle de vie (ACV) d'un moyen de communication asynchrone. Les raisons conduisant à réaliser l'étude sont :

- Effectuer une ACV sur un outil de communication asynchrone,
- Effectuer une ACV comparative d'envoi de mail en fonction de plusieurs leviers d'éco-conception,
- Comprendre précisément les gains environnementaux pour chacun des leviers sur un tel outil,
- Imaginer de nouveaux usages et de nouvelles manières de communiquer de façon asynchrone, comme alternative au mail classique.

Le public concerné est principalement la société Iroco en interne ainsi que l'ADEME qui participe au financement de l'étude. Aucune publication publique des résultats n'est encore planifiée, bien que les résultats puissent être réutilisés à ces fins. La seule comparaison d'ACV a pour objectif une éco-conception interne. Ainsi, aucune revue critique externe n'est à ce titre prévue.

Les systèmes étudiés sont ainsi ceux gérés par Iroco.

Unité fonctionnelle

L'**unité fonctionnelle** est l'unité de référence utilisée pour relier les entrées et les sorties, ainsi que les performances environnementales d'un ou plusieurs systèmes de produits.

Nous avons considéré l'unité fonctionnelle suivante :

'Utiliser une boîte mail pour envoyer des mails pendant une semaine'.

L'ensemble des impacts considérés sera rapporté à l'unité fonctionnelle.

Frontières du système

Au cours de cette étude, nous considérons les éléments suivants, sur la base des données ouvertes présentes dans la base Empreinte de l'ADEME :

- L'étape de production (pour les terminaux, serveurs et éléments réseau) : l'extraction des matières premières, les transports amont, les procédés de fabrication.
- L'étape d'utilisation : la consommation d'électricité induite par l'utilisation en France.
- L'étape de fin de vie :
 - La collecte des équipements hors d'usage ;
 - Le prétraitement de l'équipement ;
 - L'élimination de la fraction non valorisée : incinération, mise en décharge.

Nous ne prenons pas en compte les étapes liées à l'avant vente, à l'administration et au support du service numérique.

Scénario

Le scénario de référence correspond à un système classique comme celui opéré actuellement par Iroco :

- Les mails sont envoyés au moment de leur envoi par l'utilisateur.
- Le mail est reçu de manière quasi-synchrone.
- La durée de vie des équipements utilisée correspond à la moyenne du marché .

Le tableau suivant présente les leviers modélisés au cours de l'étude. Chacun des leviers est traité séparément pour mieux comprendre leur pertinence en comparaison au scénario de base.

| <u>Levier</u> | <u>Description</u> |
|---|--|
| Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | Lorsqu'un mail non urgent est envoyé en mobilité, le service mail attend d'être sur le réseau fixe avant de l'envoyer. |
| Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | Lorsqu'un mail non urgent est envoyé à un moment où l'électricité est très impactante, le service mail attend un moment où l'électricité est moins impactante. |

| | |
|--|--|
| Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure | Lorsqu'un mail non urgent est envoyé à un moment où l'infrastructure est très sollicitée, le service mail attend un moment où l'infrastructure est moins sollicitée. |
| Levier 4 : Rétro-compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | La rétro-compatibilité permet de maximiser la durée de vie des équipements. |

Flux de référence

Le flux de référence désigne la quantité du produit/service analysé et de consommables utilisés par ce produit/service, nécessaires pour rencontrer les besoins de l'unité fonctionnelle. Dans notre contexte, voici ceux que nous avons identifiés ensemble :

- nombre de messages envoyés,
- temps passé en itinérance versus le wifi/câble,
- urgence du message,
- pièce jointe ou non,
- taille de message (simple texte),
- terminal (smartphone, ordinateur portable, ordinateur fixe),
- proportion de l'énergie renouvelable dans le mix électrique par rapport à la localisation,
- localisation des systèmes.

Choix des indicateurs

Nous nous basons sur les indicateurs obligatoires définis dans le "Référentiel méthodologique d'évaluation environnementale des services numériques" de l'ADEME. Ces indicateurs sont un sous-ensemble de ceux définis dans le référentiel européen PEF (Product Environmental Footprint).

- **Épuisement des ressources naturelles (minérales et métaux)**
 - Unité : kg Sb équivalent (kg Sb eq.)
 - Définition : l'exploitation industrielle entraîne une diminution des ressources disponibles dont les réserves sont limitées. Cet indicateur évalue la quantité de ressources minérales et métalliques extraites de la nature comme s'il s'agissait d'antimoine.
- **Changement climatique**
 - Unité : kg CO2 équivalent (kg CO2 eq.)
 - Définition : les gaz à effet de serre (GES) sont des composés gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre.

L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre contribue au réchauffement climatique.

- **Acidification**
 - Unité : mol H⁺ eq.
 - Définition : l'acidification de l'air est liée aux émissions d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre, d'ammoniac et d'acide chlorhydrique. Ces polluants se transforment en acides en présence d'humidité, et leurs retombées peuvent endommager les écosystèmes ainsi que les bâtiments.
- **Émissions de particules fines**
 - Unité : Disease incidence
 - Définition : la présence de particules fines de petit diamètre dans l'air - en particulier celles d'un diamètre inférieur à 10 microns - représente un problème de santé humaine, car leur inhalation peut provoquer des problèmes respiratoires et cardiovasculaires.
- **Radiations ionisantes**
 - Unité: Unité : kBq U235 eq.
 - Définition : les radionucléides peuvent être libérés lors de plusieurs activités humaines. Lorsque les radionucléides se désintègrent, ils libèrent des rayonnements ionisants. L'exposition humaine aux rayonnements ionisants provoque des dommages à l'ADN, qui à leur tour peuvent conduire à divers types de cancer et malformations congénitales.

III.B.3 Modélisation

Planification

L'inventaire des mails envoyés en une semaine a été établi sur la base du comportement de trois personnes utilisant le service mail de manière représentative. La modification de l'inventaire pour chacun des leviers a été faite comme suit.

| <u>Levier</u> | <u>Prise en compte du levier dans le modèle</u> |
|---|--|
| Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | Les mails non urgents envoyés sur le réseau mobile dans le scénario de base sont envoyés sur le réseau fixe. |
| Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | Les mails non urgents sont décalés à 15 heures (heure où les impacts du réseau électrique sont les plus faibles en moyenne). |

| Scénario de base | | | | | | | Scénario 1 | | Scénario 2 | |
|------------------|-----------------|------------------------|------------|-------------------------|--------|-------|------------|-------|------------|-------|
| PJ | Taille (octets) | Taille totale (octets) | Device | Nombre de destinataires | Urgent | Intra | Réseau | Heure | Réseau | Heure |
| 2 | 1089 | 6097 | Desktop | 1 | OUI | NON | Fixe | 10 | Fixe | 10 |
| 0 | 9696 | 9696 | Desktop | 6 | OUI | NON | Fixe | 10 | Fixe | 10 |
| 0 | 6297 | 6297 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 12 | Fixe | 15 |
| 6 | 119653 | 155762 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 21 | Fixe | 15 |
| 2 | 34618 | 43927 | Smartphone | 6 | NON | NON | Mobile | 11 | Fixe | 15 |
| 2 | 1173 | 11101 | Desktop | 1 | OUI | NON | Fixe | 11 | Fixe | 11 |
| 0 | 2325 | 2325 | Desktop | 2 | NON | NON | Fixe | 16 | Fixe | 15 |
| 0 | 2473 | 2473 | Smartphone | 3 | NON | NON | Fixe | 16 | Fixe | 15 |
| 1 | 26079 | 93907 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 20 | Fixe | 15 |
| 0 | 3316 | 3316 | Smartphone | 1 | OUI | NON | Mobile | 22 | Mobile | 22 |
| 6 | 134920 | 171029 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 10 | Fixe | 15 |
| 0 | 12305 | 12305 | Laptop | 2 | OUI | NON | Fixe | 15 | Fixe | 15 |
| 0 | 9980 | 9980 | Laptop | 1 | OUI | OUI | Fixe | 11 | Fixe | 11 |
| 0 | 905 | 905 | Laptop | 2 | OUI | NON | Fixe | 22 | Fixe | 22 |
| 0 | 766 | 766 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 9 | Fixe | 9 |
| 0 | 1367 | 1367 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 9 | Fixe | 9 |
| 0 | 1600 | 1600 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 9 | Fixe | 9 |
| 0 | 2246 | 2246 | Laptop | 13 | OUI | NON | Fixe | 14 | Fixe | 14 |
| 0 | 1923 | 1923 | Smartphone | 1 | OUI | NON | Mobile | 14 | Mobile | 14 |
| 0 | 394 | 394 | Laptop | 1 | OUI | OUI | Fixe | 14 | Fixe | 14 |
| 0 | 939 | 939 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 18 | Fixe | 15 |
| 0 | 2712 | 2712 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 23 | Fixe | 23 |
| 0 | 3427 | 3427 | Smartphone | 1 | OUI | NON | Mobile | 9 | Mobile | 9 |
| 0 | 1184 | 1184 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 16 | Fixe | 16 |
| 1 | 399101 | 1472601 | Laptop | 1 | NON | OUI | Fixe | 9 | Fixe | 15 |
| 0 | 1182 | 1182 | Laptop | 2 | OUI | NON | Fixe | 9 | Fixe | 9 |

| | | | | | | | | | | |
|---|--------|---------|------------|---|-----|-----|--------|----|--------|----|
| 0 | 3960 | 3960 | Smartphone | 1 | OUI | NON | Mobile | 11 | Mobile | 11 |
| 0 | 960 | 960 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 11 | Fixe | 11 |
| 0 | 3658 | 3658 | Laptop | 2 | NON | NON | Fixe | 11 | Fixe | 15 |
| 0 | 1371 | 1371 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 14 | Fixe | 14 |
| 0 | 2225 | 2225 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 22 | Fixe | 22 |
| 0 | 5856 | 5856 | Smartphone | 1 | OUI | NON | Mobile | 7 | Mobile | 7 |
| 1 | 21690 | 77884 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 0 | Fixe | 15 |
| 0 | 2847 | 2847 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 10 | Fixe | 15 |
| 0 | 706 | 706 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 9 | Fixe | 15 |
| 1 | 29069 | 103837 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 9 | Fixe | 15 |
| 0 | 1286 | 1286 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 9 | Fixe | 15 |
| 1 | 84311 | 300993 | Laptop | 1 | OUI | NON | Fixe | 9 | Fixe | 9 |
| 0 | 1499 | 1499 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 9 | Fixe | 15 |
| 0 | 2169 | 2169 | Smartphone | 1 | OUI | NON | Mobile | 10 | Mobile | 10 |
| 0 | 1900 | 1900 | Smartphone | 1 | NON | NON | Mobile | 10 | Fixe | 15 |
| 1 | 904687 | 3357520 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 10 | Fixe | 15 |
| 0 | 87409 | 87409 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 12 | Fixe | 15 |
| 0 | 989 | 989 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 12 | Fixe | 15 |
| 1 | 14468 | 47551 | Smartphone | 1 | NON | NON | Mobile | 12 | Fixe | 15 |
| 0 | 982 | 982 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 18 | Fixe | 15 |
| 0 | 87365 | 87365 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 18 | Fixe | 15 |
| 0 | 896 | 896 | Laptop | 1 | NON | NON | Fixe | 20 | Fixe | 15 |

Semaine-type d'utilisation du mail pour trois personnes

Note : Au vu de la population considérée, il existe un biais de sélection qui ne rend pas nécessairement représentatifs ces usages par rapport aux usages globaux du mail.

Tier 1 - Terminaux utilisateur

L'ensemble des impacts du cycle de vie des terminaux utilisateur émetteurs et récepteurs sont pris en compte. Les données d'impact utilisées proviennent des données publiques de

la base Négaoctet, accédées depuis la base Empreinte et considérées pour une année d'usage. Les données sont fournies en annexe.

Les impacts d'une année d'usage des terminaux sont alloués à l'unité fonctionnelle sur la base du temps d'usage. Les temps d'usage journaliers suivants ont été utilisés :

| | |
|---------------------------------------|-----|
| Durée d'usage globale (mn) smartphone | 240 |
| Durée d'usage globale (mn) laptop | 228 |
| Durée d'usage globale (mn) desktop | 228 |

La répartition des terminaux utilisés établis sur la base des données d'utilisation ci-dessus est la suivante :

| | |
|--------------------|-----|
| % usage smartphone | 21% |
| % usage laptop | 71% |
| % usage desktop | 8% |

| <u>Levier</u> | <u>Prise en compte du levier dans le modèle</u> |
|--|--|
| Levier 4 : Rétro-compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | Une analyse de sensibilité sur la durée de vie des terminaux utilisateurs a été conduite pour évaluer l'importance de ce levier. |

Tier 2 - Infrastructures réseau

Les impacts associés au transfert des mails sur le réseau fixe et mobile sont pris en compte. Les données d'impacts utilisées proviennent des données publiques de la base Négaoctet, accédées depuis la base Empreinte et considérées pour un Go transféré. Les données sont fournies en annexe.

Les impacts du réseau sont alloués à l'unité fonctionnelle sur la base de la quantité de données transférées. Les données suivantes ont été utilisées sur la base des données d'utilisation fournies plus haut :

| | |
|------------------------------|-------|
| Taille d'un email (Mo) | 0,042 |
| Taille total d'un email (Mo) | 0,12 |
| % d'emails avec pièce jointe | 25% |

| | |
|-------------------------|-----|
| Nombre de destinataires | 1,6 |
|-------------------------|-----|

| | |
|--|-------|
| Total emails envoyés / collaborateur / semaine | 16,00 |
|--|-------|

La répartition entre réseau fixe et mobile pour le scénario de référence est la suivante :

| | |
|----------------|-----|
| Fibre ADSL (%) | 81% |
| 4G (%) | 19% |

La répartition entre réseau fixe et réseau mobile pour l'étude du levier 1 (modification dynamique du réseau d'accès) est la suivante :

| | |
|----------------|-----|
| Fibre ADSL (%) | 88% |
| 4G (%) | 13% |

| <u>Levier</u> | <u>Prise en compte du levier dans le modèle</u> |
|---|--|
| Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | Les impacts réseau des mails non urgents utilisent un facteur d'empreinte d'un usage du réseau via l'accès fixe. |

Tier 3 - Data centers

Les impacts associés aux infrastructures traitant les mails (IMAP & SMTP) sont pris en compte sur l'ensemble de leur cycle de vie. Les données d'impacts utilisées proviennent des données publiques de la base NegaOctet, accédées depuis la base Empreinte et données pour une année d'utilisation. Les données sont fournies en annexe. Nous avons utilisé des gabarits de machines virtuelles (*virtual machines* ou VM) pour caractériser les serveurs mis en œuvre dans la chaîne de traitement des mails.

Un *power usage effectiveness* (PUE) de 1,28 a été considéré pour déterminer la consommation électrique des équipements non-IT. Les impacts de la fabrication, le transport et la fin de vie des équipements non-IT ne sont pas pris en compte par manque de données ouvertes permettant de les quantifier. Les impacts des équipements réseau du datacenter et l'ensemble des serveurs en amont des serveurs mails (control plan, anti-spam) n'ont pas été pris en considération.

L'inventaire suivant a été établi pour le scénario de référence :

| Synthèse infrastructure | | | |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| IMAP 1 | | | |
| VMs | | | |
| # VM petites | # VM moyennes | # VMs grandes | # Storage (870 GB) |
| 0,5 | 0 | 0 | 0 |
| SMTP1 | | | |
| VMs | | | |
| # VM petites | # VM moyennes | # VMs grandes | # Storage (870 GB) |
| 0,50 | 0 | 0 | 1 |
| SMTP2 | | | |
| VMs | | | |
| # VM petites | # VM moyennes | # VMs grandes | # Storage (870 GB) |
| 0,50 | 0 | 0 | 1 |
| IMAP2 | | | |
| VMs | | | |
| # VM petites | # VM moyennes | # VMs grandes | # Storage (870 GB) |
| 0,5 | 0 | 0 | 0 |

| Levier | Prise en compte du levier dans le modèle |
|--|--|
| Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure | Une analyse de sensibilité a été conduite sur le dimensionnement de l'infrastructure à la suite de la mise en œuvre du levier 3. |

Usage

Les impacts de la phase d'usage sont évalués à partir de la puissance électrique des équipements mobilisée en phase d'usage sur la durée d'usage dédiée à la réalisation de l'unité fonctionnelle. Les facteurs d'empreinte utilisés correspondent aux facteurs moyens

pour le mix électrique français en 2019 provenant du rapport ADEME et ARCEP (2022)¹¹. Ces données considèrent les imports et exports de l'électricité ainsi que la perte en ligne¹².

III.C. ACV conséquentielle court terme ou approche marginale

On cherche dans cette approche à déterminer le coût marginal de notre unité fonctionnelle, c'est-à-dire le sur-impact généré par le fait *d'utiliser une boîte mail pour envoyer des mails pendant une semaine*.

Dans l'approche attributionnelle, on attribue une partie des impacts de l'ensemble des ressources impliquées dans la mise en œuvre de l'unité fonctionnelle à notre unité fonctionnelle dans une situation de *statu quo*. Ici, on cherche à évaluer les impacts environnementaux supplémentaires induits par la mise en œuvre de l'UF.

Par souci d'accès aux données, seul le potentiel de réchauffement climatique est considéré. En effet, les méthodes marginales étant peu utilisées, il existe peu de données (qui plus est ouvertes) pour conduire des études multicritères.

III.C.1 Tier 1 - Terminaux utilisateur

Dans une approche marginale court terme, on considère que les terminaux des utilisateurs préexistent et que l'UF n'induit pas la production de nouveaux équipements. Seule la sur-consommation d'électricité induite par l'écriture et la lecture du mail doit être prise en compte. Puisqu'aucun levier ne modifie cette valeur (mêmes terminaux, même temps d'utilisation, même heure d'utilisation), nous avons exclu le Tier 1.

III.C.2 Tier 2 - Infrastructures réseau

Dans une approche marginale court terme, on considère que l'infrastructure réseau préexiste et que l'UF n'induit pas la mise en place de nouveaux équipements. Ainsi, seule la consommation électrique marginale induite par le transfert des données sur le réseau est considérée. En d'autres termes, on considère uniquement la consommation électrique induite par l'ajout d'une certaine quantité de données transférées sur le réseau.

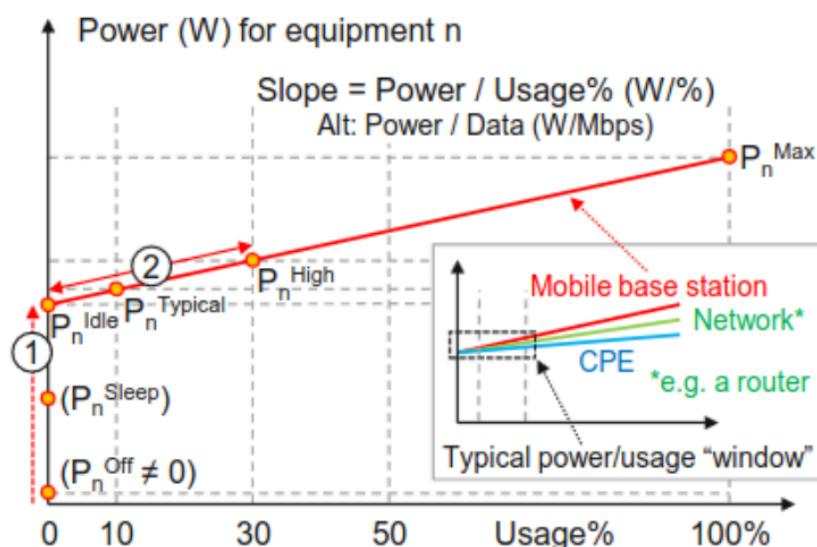
Comme l'ont montré Malmodin (2020)¹³, la consommation électrique des réseaux numériques n'est pas linéairement reliée à la quantité de données transférées : ils se comportent comme une fonction affine (de type $a \cdot x + b$). Pour maintenir un haut niveau de

¹¹ Yasmine Aiouch (Deloitte), Augustin Chanoine (Deloitte), Léo Corbet (Deloitte), Pierrick Drapeau (Deloitte), Louis Ollion (Deloitte), Valentine Vigneron (Deloitte), avec les contributions de Caroline Vateau (APL-datacenter), Etienne Lees Perasso (Bureau Veritas), Julie Orgelet (DDemain), Frédéric Bordage (GreenIT.fr) et Prune Esquerre (IDATE). 2022. Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective, Etat des lieux et pistes d'actions. 179 pages.

¹² La perte en ligne correspond aux pertes énergétiques entre le site de production et le site de consommation. En considérant les pertes on alloue l'ensemble des impacts de la production d'électricité aux consommations d'électricité finale.

¹³ Jens Malmodin (Ericsson), 2020, Fraunhofer IZM, www.electronicsgoesgreen.org 87ISBN 978-3-8396-1659-8
Electronics Goes Green 2020+

disponibilité, une partie importante de la consommation électrique est fixe. Cette part implique une consommation électrique du réseau, peu importe s'il participe à un transfert de données ou non. Nous ne comptabilisons donc pas cette part dans l'approche marginale. Une autre part de la consommation électrique est fonction du débit (la quantité de données transférée sur une unité de temps). On appelle cette part la consommation marginale du réseau. C'est cette part que nous considérons dans l'approche marginale.



Le tableau suivant résume les consommations fixes par abonné.e ainsi que les consommations marginales fonction du débit pour les différents types et sous-parties du réseau :

| Network type | Marginal/fixed | Access / backbone | Source | Unit | Value | min | max |
|--------------|----------------|-------------------|-----------------------------|--------|-------|------|-------|
| Fixe | Marginal | Access | power model | W/Mbps | 0,02 | 0,01 | 0,04 |
| Fixe | Fix | Access | power model | W/sub | 16,50 | 8,00 | 35,00 |
| Fixe | Marginal | Backbone | power model | W/Mbps | 0,03 | | |
| Fixe | Fix | Backbone | power model | W/sub | 1,50 | 0,50 | 3,00 |
| Mobile | Marginal | Access | power model | W/Mbps | 1,50 | 1,00 | 2,00 |
| Mobile | Fix | Access | power model | W/sub | 1,00 | 0,50 | 2,00 |

| | | | | | | | |
|--------|----------|----------|-----------------------------|--------|------|------|------|
| Mobile | Marginal | Backbone | power model | W/Mbps | 0,03 | | |
| Mobile | Fix | Backbone | power model | W/sub | 0,20 | 0,05 | 0,50 |

The power consumption of mobile and fixed network data services - The case of streaming video and downloading large files, Jens Malmudin, 2020

Les leviers 1 et 2 sont pris en compte de la manière suivante.

| <u>Leviers</u> | <u>Prise en compte du levier dans le modèle</u> |
|---|---|
| Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | Seule la consommation marginale est prise en compte et dépend du réseau d'accès utilisé. La consommation réseau induite par l'envoi des mails non urgents correspond à la consommation marginale du réseau fixe. |

III.C.3 Tier 3 - Data centers

Dans une approche marginale court terme, on considère que l'infrastructure réseau préexiste et que l'UF n'induit pas la mise en place de nouveaux équipements. Ainsi, seule la consommation électrique marginale induite par le traitement des mails envoyés est considérée – c'est-à-dire la différence entre la consommation *idle* de l'infrastructure et la consommation pendant le traitement de mails. De même que pour le réseau, un serveur consomme une quantité fixe d'électricité en mode *idle*.

Puisque l'ensemble des leviers décrivent des mails de caractéristiques semblables, les consommations marginales ne changent pas d'un levier à l'autre. Cependant, les mécanismes de *demand shifting* (levier 2) entraînent une différence en termes d'impact marginal de l'électricité (voir IV.C.4).

III.C.4 Méthodologie de la consommation électrique marginale

Pour déterminer la consommation marginale du traitement d'un mail par l'infrastructure, nous avons créé un injecteur de charge email¹⁴ avec plusieurs unités d'exécution parallèles qui simulent d'une part des utilisateurs qui envoient des mails (en SMTP), et d'autres qui les reçoivent (en IMAP).

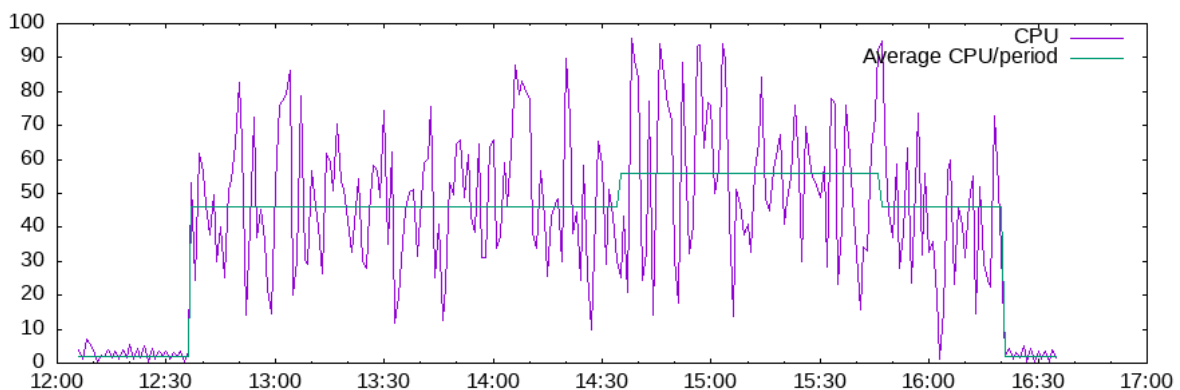
¹⁴ <https://github.com/iroco-co/mailtempest>

Le module "PaceMaker" donne le rythme global : la fréquence d'envoi de message, ainsi que le caractère aléatoire ou fixe de ces envois. Cela permet de générer un trafic et des traitements proches d'une condition réelle d'opération. La différence réside dans le fait que les messages ne sont pas envoyés à l'extérieur, afin de ne pas induire une charge sur une autre plateforme que celle qui est en test.

Nous déployons également des sondes logicielles sur le serveur pour connaître sa charge (avec la commande mpstat) ainsi que l'utilisation du réseau (avec bwm-ng¹⁵).

Pour chaque tir :

- Les sondes sont exécutées sur le serveur,
- L'injecteur est lancé avec les paramètres souhaités (nombre de workers, aléatoire/fixe),
- Nous laissons le serveur se stabiliser,
- Après avoir placé 11 messages en tant que brouillon, nous les envoyons manuellement les uns après les autres en notant la date et heure de début et fin d'envoi du groupe,
- Nous laissons la charge se stabiliser,
- Nous coupons l'injecteur et les sondes.



Après quelques tirs, nous réalisons que charges sont très irrégulières :

- Les messages sont pris aléatoirement dans le référentiel d'Enron¹⁶. Ces mails peuvent avoir entre 1 et 300 destinataires, avec des caractéristiques propres très disparates. Chaque mail envoyé induit une charge très variable.
- Le modèle aléatoire augmente encore le bruit.

¹⁵ <https://github.com/vgropp/bwm-ng>

¹⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Enron_Corpus

- Les serveurs SMTP (postfix) et IMAP (cyrus) sont tous deux basés sur un modèle *fork* : chaque message est traité par l'instanciation d'un nouveau processus. Ce processus est détruit lorsque le traitement est terminé. Cela permet au serveur d'avoir une charge minimale lorsqu'il n'y a pas de messages, et de s'adapter en créant autant de processus que de mail à traiter.

Nous réalisons que l'aspect stochastique des tirs ne change pas fondamentalement la nature de la charge. Nous réduisons alors le caractère aléatoire en injectant les messages de manière régulière, et nous réduisons la variabilité des messages envoyés en ne conservant que les messages de trois destinataires dans le corpus Enron. Cela représente 949 messages différents parmi lesquels nous sélectionnons les messages envoyés.

Enfin, pour mettre en évidence la différence, nous faisons la moyenne des valeurs (charge CPU ou bande passante en entrée/sortie réseau) en phase d'injection, et la moyenne des valeurs également en phase d'envoi manuel de message. De cette façon, nous arrivons de manière reproductible à mettre en évidence le delta de charge.

Le serveur chargé est en moyenne à 43% de charge CPU. Lorsque le serveur traite 11 mails par minute, la charge CPU est d'environ à 52%. En modélisant la consommation électrique du serveur sur la base du modèle proposé par Boavizta (modèle simpliste). On obtient une consommation marginale pour le traitement d'un mail de 0,002 Wh/mail.

| Item | Value | Unit |
|------------------------------|--------|--------------|
| Marginal power | 0,002 | Wh/mail |
| Server ready - CPU load | 43,00% | % |
| Server processing - CPU load | 52,00% | % |
| Server ready - Power | 13,3 | W |
| Server processing - Power | 14,5 | W |
| Traffic (secs) | 11 | mails/second |
| Traffic (hours) | 660 | mails/hours |

Il faut noter que cette approche est extrêmement simpliste et qu'elle n'est valable que pour le contexte dans lequel l'évaluation a été conduite. En effet, la consommation marginale est extrêmement dépendante du contexte :

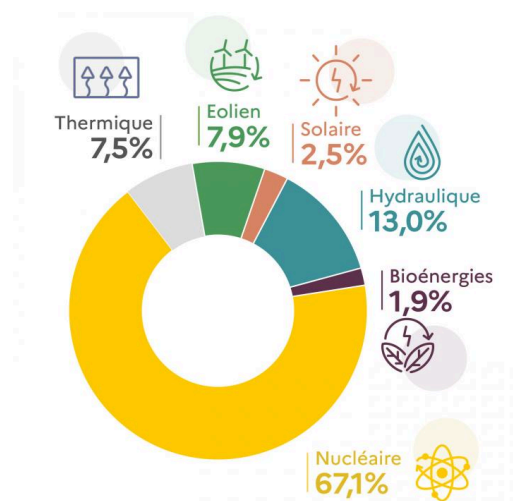
- État du serveur au moment du traitement,
- configuration hardware,
- Trafic.

De plus, cette approche ne considère pas une partie des briques de l'infrastructure (firewall, *control plan*, refroidissement...).

Ainsi, cette approche doit être considérée comme une expérience de pensée pour illustrer que la consommation marginale d'un mail est faible comparé à la consommation fixe du serveur dans cette configuration. Pour éviter une surinterprétation, aucun des leviers analysés ne fait varier la consommation marginale.

III.C.5 Impact marginal de l'électricité

Le mix électrique correspond aux sources d'énergie utilisées dans la production de l'électricité dans une période et une zone géographique données. La composition du mix électrique varie en fonction de la demande et de la disponibilité des centrales. Pour évaluer l'impact d'une unité de consommation dans un mix donné, on utilise généralement une approche attributionnelle. Dans cette approche, on calcule la moyenne des impacts des différentes sources d'énergie pondérée par leur importance dans le mix. Dans une approche cycle de vie, les impacts de la fabrication, de la mise en service et de la fin de vie des centrales sont également considérés. De cette manière, on donne une responsabilité environnementale proportionnelle à tous les acteurs utilisant le réseau électrique. Cette méthode est utilisée dans la méthode attributionnelle dans un périmètre français sur une base horaire (voir section III.B.3 - Usage).



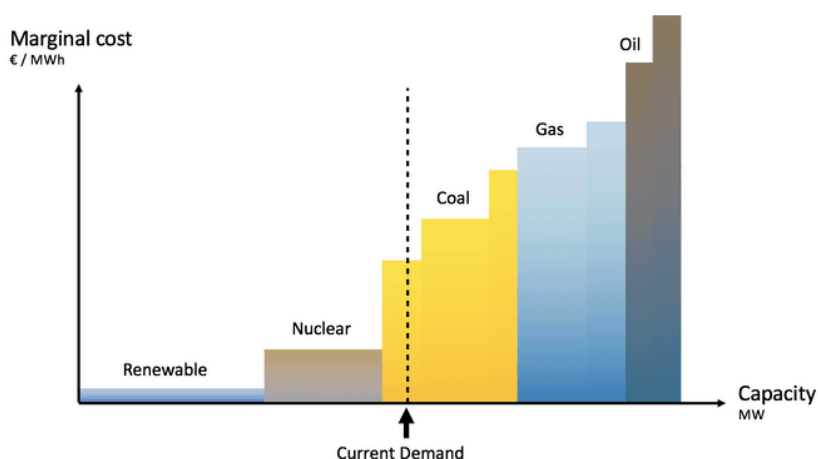
<https://www.ecologie.gouv.fr/transition-energetique-en-france>

Dans l'approche marginale cependant, nous voulons déterminer l'impact associé à une unité d'énergie supplémentaire consommée sur le réseau. En d'autres termes, nous voulons

connaître la différence d'impact entre un monde dans lequel nous aurions consommé cette unité et un monde dans lequel nous n'aurions pas consommé cette unité.

Nous ne pouvons donc pas utiliser une approche moyenne, car l'ensemble des centrales ne vont pas augmenter leur production de manière homogène, mais une centrale va produire cette unité d'électricité supplémentaire. Pour déterminer l'impact marginal, il faut identifier quelle source d'énergie va être mobilisée pour répondre à cette demande et identifier l'impact de la production d'une unité d'énergie par cette source.

Pour la déterminer, il faut s'intéresser au fonctionnement du réseau électrique et plus précisément au mécanisme du "merit order". Selon ce mécanisme, c'est la centrale avec le plus faible coût marginal (coût monétaire associé à la production d'une unité d'électricité) qui va répondre à une demande supplémentaire. Les sources d'énergie avec le coût marginal les plus faibles sont également les centrales avec les émissions de gaz à effet de serre marginal le plus faible (renouvelable et nucléaire). On peut dire qu'elles ont un impact marginal de 0 gCO₂eq. En effet, les impacts de ces sources d'énergie proviennent de la fabrication et de la fin de vie de ces infrastructures et non de l'énergie qu'elles produisent.



<https://www.electricitymaps.com/blog/marginal-emissions-what-they-are-and-when-to-use-them>

En France, la production marginale était assurée en 2007 à 25% par du nucléaire (avec un impact marginal de 0 gCO₂eq./kWh) et à 75% par des centrales thermiques (avec un impact marginal de 600 à 700 gCO₂eq./kWh)¹⁷. En l'absence de données plus récentes, on considère que cette répartition est toujours d'actualité. En partant de l'intensité carbone opérationnelle par heure en 2022 proposée par le site Electricity Maps :

- On affecte un impact marginal de 0 gCO₂eq aux 25% d'heures les moins impactantes.

¹⁷<https://docplayer.fr/1525685-Le-contenu-en-co2-du-kwh-electrique-avantages-compares-du-contenu-marginal-et-du-contenu-par-usages-sur-la-base-de-l-historique.html>

- On affecte un impact marginal de 650 gCO₂eq aux 75% d'heures les plus impactantes.

On obtient la matrice d'intensité mois/heure suivante :

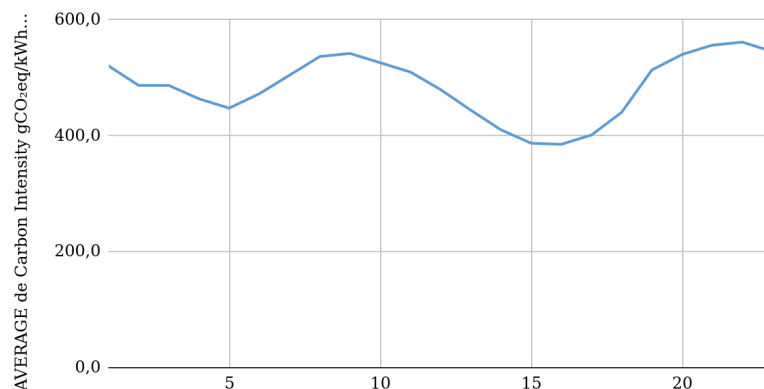
| Heure / Mois | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 461 | 348 | 587 | 477 | 440 | 650 | 650 | 608 | 650 | 503 | 455 | 398 |
| 1 | 461 | 279 | 545 | 390 | 315 | 628 | 650 | 629 | 607 | 503 | 433 | 377 |
| 2 | 461 | 279 | 563 | 390 | 335 | 585 | 650 | 629 | 585 | 488 | 455 | 398 |
| 3 | 440 | 279 | 566 | 347 | 315 | 542 | 650 | 608 | 563 | 461 | 390 | 377 |
| 4 | 419 | 232 | 545 | 347 | 335 | 520 | 650 | 608 | 563 | 398 | 347 | 377 |
| 5 | 440 | 279 | 566 | 390 | 335 | 542 | 650 | 608 | 563 | 482 | 412 | 377 |
| 6 | 482 | 348 | 587 | 433 | 398 | 520 | 650 | 608 | 607 | 482 | 542 | 377 |
| 7 | 482 | 441 | 608 | 477 | 377 | 650 | 650 | 608 | 607 | 566 | 563 | 398 |
| 8 | 524 | 441 | 608 | 498 | 377 | 650 | 650 | 608 | 628 | 545 | 542 | 419 |
| 9 | 503 | 418 | 566 | 477 | 335 | 650 | 650 | 545 | 607 | 566 | 542 | 440 |
| 10 | 503 | 418 | 566 | 412 | 252 | 650 | 650 | 524 | 585 | 566 | 542 | 440 |
| 11 | 503 | 348 | 566 | 325 | 189 | 628 | 608 | 524 | 563 | 524 | 520 | 440 |
| 12 | 482 | 325 | 545 | 260 | 126 | 585 | 524 | 482 | 520 | 503 | 520 | 440 |
| 13 | 440 | 255 | 545 | 238 | 105 | 455 | 503 | 440 | 477 | 503 | 498 | 440 |
| 14 | 419 | 255 | 503 | 195 | 84 | 368 | 440 | 440 | 455 | 503 | 520 | 440 |
| 15 | 440 | 255 | 461 | 195 | 84 | 347 | 461 | 419 | 455 | 503 | 542 | 440 |
| 16 | 440 | 255 | 461 | 195 | 84 | 412 | 503 | 440 | 455 | 545 | 563 | 440 |
| 17 | 503 | 279 | 482 | 195 | 105 | 498 | 650 | 440 | 498 | 545 | 628 | 440 |
| 18 | 566 | 418 | 587 | 303 | 231 | 628 | 650 | 503 | 607 | 608 | 607 | 440 |
| 19 | 545 | 418 | 629 | 412 | 335 | 650 | 650 | 503 | 650 | 629 | 607 | 440 |
| 20 | 566 | 418 | 629 | 477 | 440 | 650 | 650 | 587 | 650 | 608 | 563 | 419 |
| 21 | 545 | 441 | 629 | 477 | 503 | 650 | 650 | 650 | 628 | 587 | 563 | 398 |
| 22 | 545 | 441 | 629 | 390 | 503 | 650 | 650 | 587 | 628 | 566 | 542 | 398 |
| 23 | 545 | 418 | 608 | 477 | 503 | 650 | 650 | 650 | 628 | 566 | 542 | 398 |

Puisque nous ne considérons pas la saisonnalité dans nos leviers, les moyennes horaires suivantes sont utilisées :

| Hour (FR) | AVERAGE de Carbon Intensity gCO ₂ eq/kWh (marginal) - ADEME/RTE |
|-----------|--|
| 0 | 520,0 |
| 1 | 486,2 |
| 2 | 486,2 |

| | |
|---|-------|
| 3 | 463,0 |
| 4 | 447,0 |
| 5 | 471,9 |
| 6 | 504,0 |
| 7 | 536,0 |
| 8 | 541,4 |
| 9 | 525,2 |

AVERAGE de Carbon Intensity gCO₂eq/kWh (marginal)
- ADEME/RTE



| | |
|----|-------|
| 22 | 544,9 |
|----|-------|

| | | |
|--|-----------|--|
| Levier | 23 | 553,8 |
| | | Prise en compte du levier dans le modèle |
| Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | | L'impact marginal de l'électricité est utilisé en fonction de l'heure d'envoi du mail. Les mails non urgents sont modélisés avec l'électricité marginale ayant l'impact le plus faible (à 15h avec 385 gCO ₂ eq/kWh). |

III.F. L'approche conséquentielle long terme comme outil complémentaire d'aide à la décision

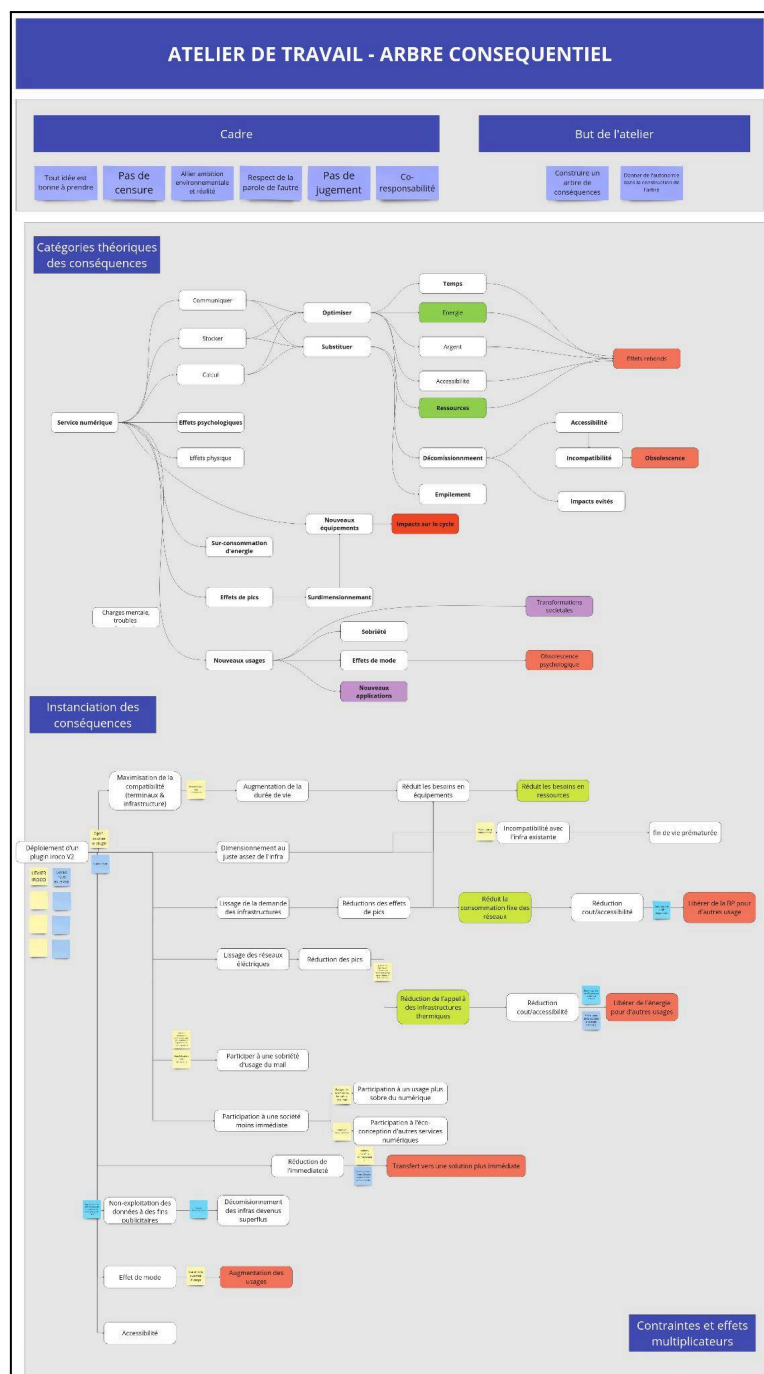
Jusqu'ici, nous avons détaillé deux méthodes pour comparer les scénarii 1 et 2 : l'ACV attributionnelle et l'approche conséquentielle court terme. Dans cette troisième approche, nous souhaitons connaître les implications environnementales d'une généralisation des leviers proposés. Nous suivons l'approche conséquentielle long terme qui souhaite répondre à la question suivante : **quelles seraient les conséquences environnementales d'une généralisation des différents leviers ?**

La méthode employée est qualitative et a pour objectif d'argumenter sur les différents leviers long terme proposés par Iroco, d'identifier les éventuelles externalités et de déterminer les

leviers à mettre en place pour maximiser les externalités positives et contraindre les externalités négatives d'une généralisation des différents leviers.

Pour alimenter cette partie, nous avons conduit un atelier d'idéation avec l'équipe d'Iroco pour co-construire un arbre de conséquences décrivant de proche en proche les effets pouvant être anticipés suite à la généralisation des leviers proposés.

Dans une deuxième partie de l'atelier, le groupe a réfléchi à des leviers et contraintes pour réduire les externalités négatives identifiées sur le graphe.



Cette matière a permis d'alimenter l'analyse conséquentielle long terme qualitative dont les résultats sont présentés en section IV.C.

III.G Synthèse méthodologique

Le tableau suivant résume les leviers modélisés dans chacune des approches proposées

| <u>Levier</u> | <u>Attributionnelle</u> | <u>Conséquentielle court-terme</u> | <u>Conséquentielle long-terme</u> |
|--|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | Oui | Oui | Oui |
| Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | Non | Oui | Oui |
| Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure | Oui | Non | Non |
| Levier 4 : Rétro-compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | Oui | Non | Oui |

IV. Résultats

IV.A. ACV Attributionnelle

IV.A.1 Résultats

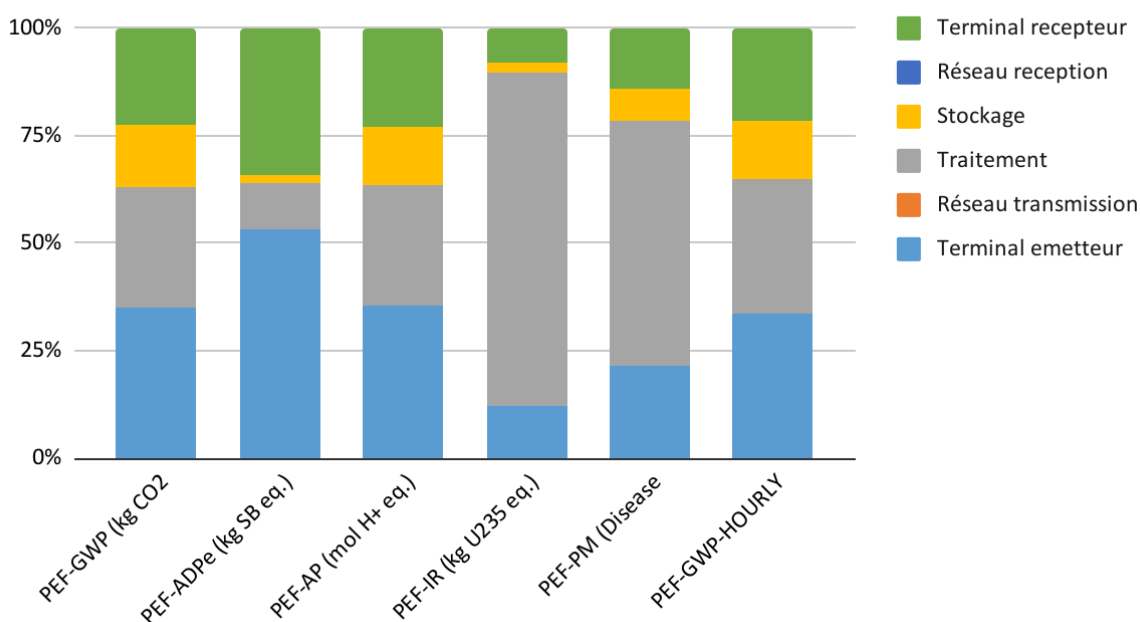
L'ensemble des impacts seront présentés ci-après, relativement à l'unité fonctionnelle suivante :

“ Utiliser une boîte mail pour envoyer des mails pendant une semaine ”.

Résultats du scénario de base à l'échelle de l'unité fonctionnelle suivant les différentes étapes :

| IMPACT UF | | | | | | |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrenc e) | PEF-GWP- HOURLY (kg CO2 eq.) |
| Terminal émetteur | 4,32E-02 | 1,73E-06 | 2,48E-04 | 8,40E-02 | 1,88E-09 | 4,40E-02 |
| Réseau transmission | 1,01E-05 | 6,75E-10 | 4,05E-08 | 4,11E-05 | 3,88E-13 | 0,00E+00 |
| Traitement | 3,44E-02 | 3,56E-07 | 1,95E-04 | 5,35E-01 | 4,91E-09 | 4,10E-02 |
| Stockage | 1,74E-02 | 6,13E-08 | 9,61E-05 | 1,81E-02 | 6,59E-10 | 1,74E-02 |
| Réseau réception | 1,63E-05 | 1,08E-09 | 6,50E-08 | 6,59E-05 | 6,23E-13 | 0,00E+00 |
| Terminal recepteur | 2,77E-02 | 1,11E-06 | 1,59E-04 | 5,39E-02 | 1,20E-09 | 2,82E-02 |
| Total | 1,23E-01 | 3,27E-06 | 6,99E-04 | 6,91E-01 | 8,65E-09 | 1,31E-01 |

Service Iroco scénario 1 - Etapes

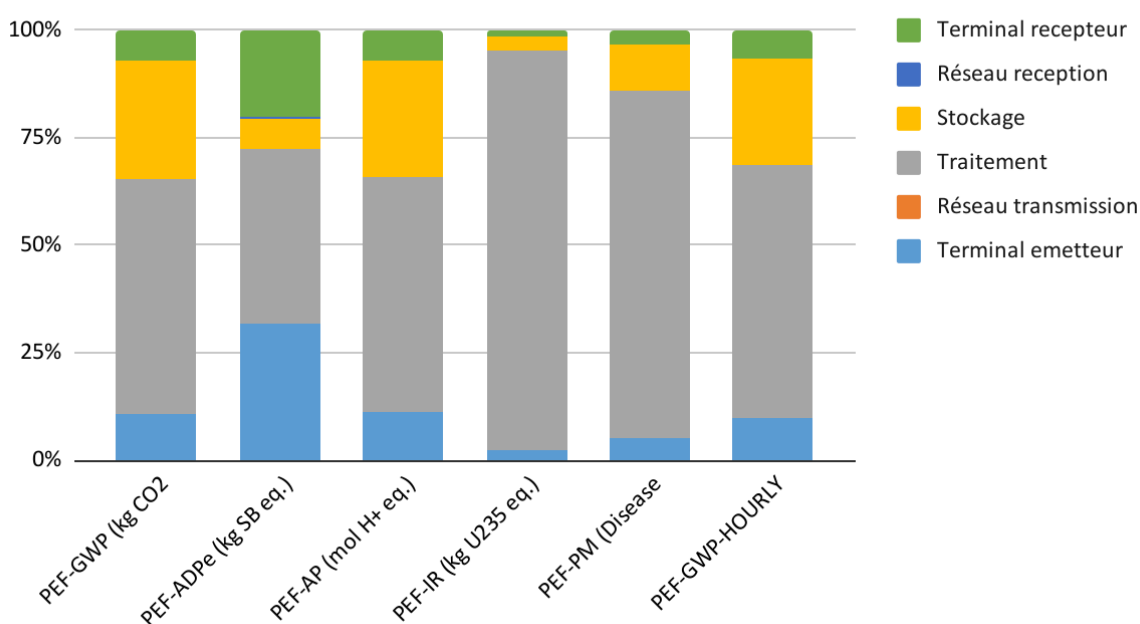


On peut constater la prédominance de l'impact des terminaux. Ceci s'explique notamment par la règle d'allocation basée sur le temps d'usage. L'allocation par temps d'usage amortit en effet les impacts du terminal sur la durée pendant laquelle le terminal est utilisé sur son cycle de vie. Ainsi, l'ensemble des impacts du terminal sont associés à ses usages. L'allocation par temps de possession amortit en revanche les impacts du terminal sur

l'ensemble du cycle de vie, incluant les moments où le terminal n'est pas utilisé. Ainsi, une partie des impacts du terminal n'est associée à aucun usage. En utilisant une règle d'allocation sur le temps de possession, on obtient les résultats suivants :

| IMPACT UF | | | | | |
|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Terminal émetteur | 6,89E-03 | 2,76E-07 | 3,96E-05 | 1,33E-02 | 2,99E-10 |
| Réseau transmission | 1,01E-05 | 6,75E-10 | 4,05E-08 | 4,11E-05 | 3,88E-13 |
| Traitement | 3,44E-02 | 3,56E-07 | 1,95E-04 | 5,35E-01 | 4,91E-09 |
| Stockage | 1,74E-02 | 6,13E-08 | 9,61E-05 | 1,81E-02 | 6,59E-10 |
| Réseau réception | 1,63E-05 | 1,08E-09 | 6,50E-08 | 6,59E-05 | 6,23E-13 |
| Terminal receveur | 4,42E-03 | 1,77E-07 | 2,54E-05 | 8,55E-03 | 1,92E-10 |
| Total | 6,32E-02 | 8,72E-07 | 3,56E-04 | 5,75E-01 | 6,06E-09 |

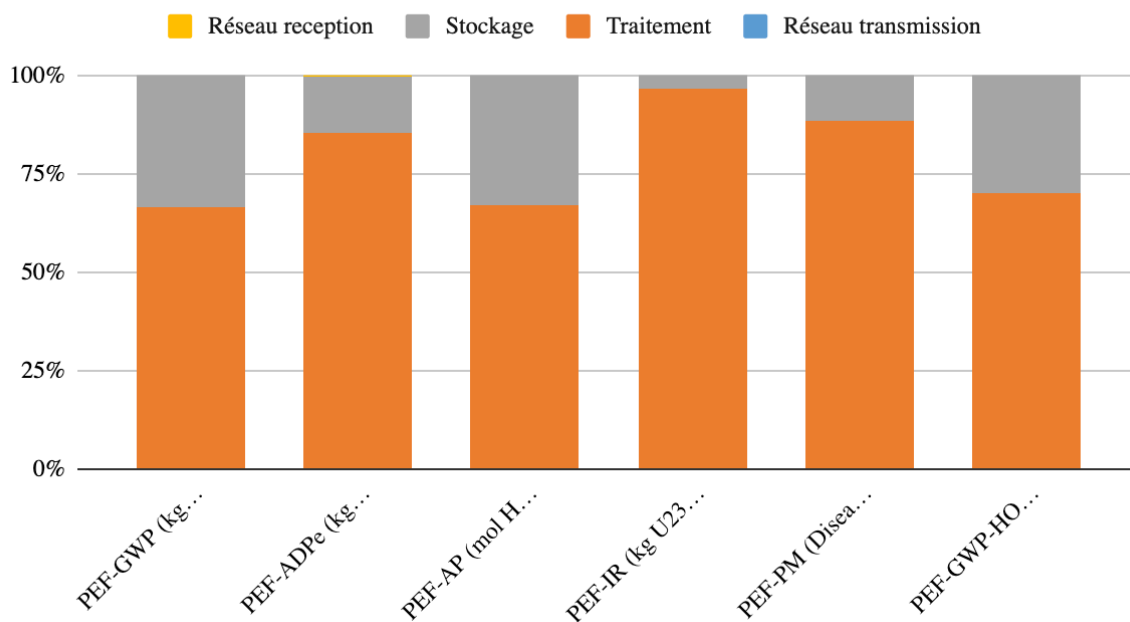
Service Iroco scénario 1 - Etapes



On peut observer que la proportion des impacts des terminaux diminue fortement. L'influence du choix de la règle d'allocation sur les impacts des terminaux nous incite fortement à effectuer une analyse qui se focalise spécifiquement sur l'infrastructure :

| IMPACT UF - Focus sur l'infrastructure | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Réseau transmission | 1,01E-05 | 6,75E-10 | 4,05E-08 | 4,11E-05 | 3,88E-13 |
| Traitement | 3,44E-02 | 3,56E-07 | 1,95E-04 | 5,35E-01 | 4,91E-09 |
| Stockage | 1,74E-02 | 6,13E-08 | 9,61E-05 | 1,81E-02 | 6,59E-10 |
| Réseau réception | 1,63E-05 | 1,08E-09 | 6,50E-08 | 6,59E-05 | 6,23E-13 |
| Total | 5,19E-02 | 4,19E-07 | 2,91E-04 | 5,53E-01 | 5,57E-09 |

Service Iroco scénario 1 - Etapes - Focus sur l'infrastructure

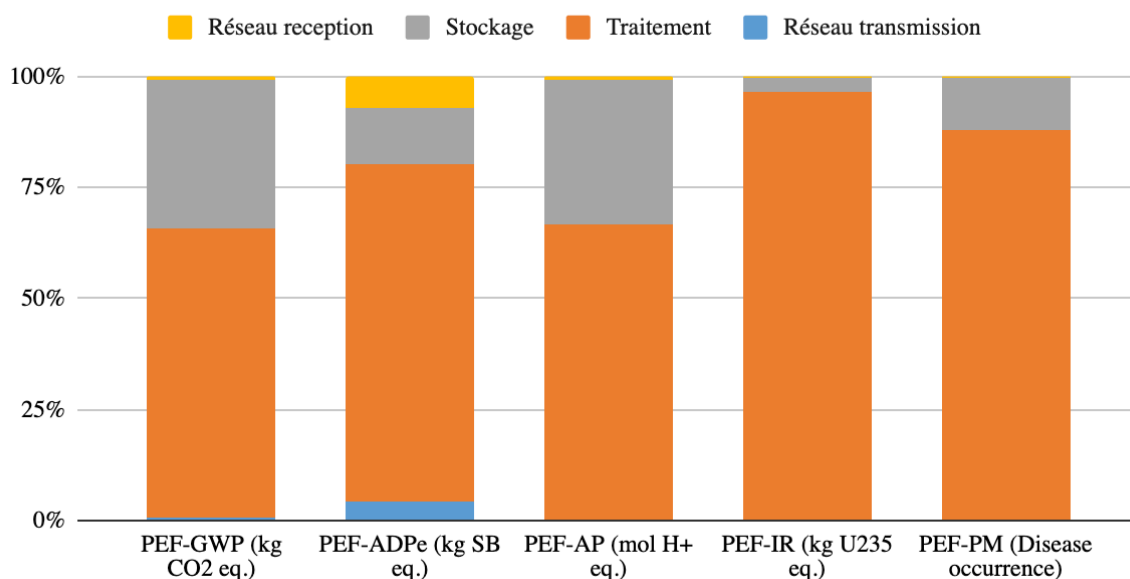


On observe que le réseau est responsable d'une part très minime des impacts des infrastructures. **Cependant, il faut noter que l'infrastructure de stockage et traitement est aujourd'hui surdimensionnée par rapport aux usages alors que la partie réseau correspond aux usages actuels (volume d'emails constaté à date).**

Si on applique l'hypothèse du nombre de mails maximum de l'infrastructure à l'évaluation de l'impact réseau, on obtient les résultats suivants :

| IMPACT UF - Focus sur l'infrastructure - Alignement du réseau | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Réseau transmission | 3,04E-04 | 2,02E-08 | 1,22E-06 | 1,23E-03 | 1,16E-11 |
| Traitement | 3,44E-02 | 3,56E-07 | 1,95E-04 | 5,35E-01 | 4,91E-09 |
| Stockage | 1,74E-02 | 6,13E-08 | 9,61E-05 | 1,81E-02 | 6,59E-10 |
| Réseau réception | 4,88E-04 | 3,25E-08 | 1,95E-06 | 1,98E-03 | 1,87E-11 |
| Total | 5,27E-02 | 4,70E-07 | 2,94E-04 | 5,56E-01 | 5,60E-09 |

Service Iroco scénario 1 - Focus sur l'infrastructure - Alignement réseau

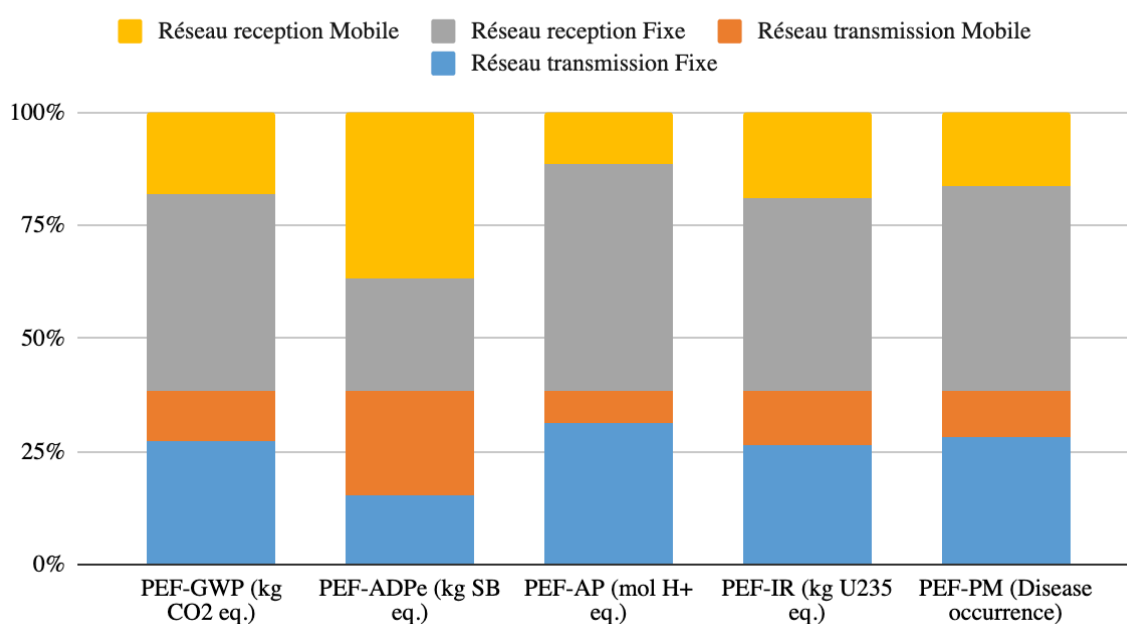


Les parties traitement et stockage restent prépondérantes même si l'impact du réseau devient visible.

| IMPACT UF - Focus sur le réseau | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |

| | | | | eq.) | occurrence) |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| Réseau transmission Fixe | 7,16E-06 | 2,72E-10 | 3,30E-08 | 2,83E-05 | 2,85E-13 |
| Réseau transmission Mobile | 2,97E-06 | 4,03E-10 | 7,54E-09 | 1,28E-05 | 1,04E-13 |
| Réseau réception Fixe | 1,15E-05 | 4,36E-10 | 5,29E-08 | 4,54E-05 | 4,57E-13 |
| Réseau réception Mobile | 4,77E-06 | 6,46E-10 | 1,21E-08 | 2,05E-05 | 1,66E-13 |
| Total | 2,64E-05 | 1,76E-09 | 1,06E-07 | 1,07E-04 | 1,01E-12 |

IMPACT UF - Focus sur le réseau



Même si le réseau mobile n'est utilisé en moyenne qu'à 19% dans le scénario de base, l'impact du réseau mobile correspond à 30% des impacts attribuables au réseau pour le critère GWP et jusqu'à 60% pour le critère ADPe.

IV.A.2 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès

Le levier 1 met en avant des règles de fonctionnement permettant de limiter l'usage du réseau mobile aux seuls emails urgents, l'impact du réseau mobile étant plus important que le réseau fixe pour un même volume de données.

Si on se focalise sur la partie réseau, voici l'évolution des impacts :

| | | | | | |
|---------------|--|--|--|--|--|
| IMPACT Réseau | | | | | |
|---------------|--|--|--|--|--|

| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
|-----------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| Réseau Base | 2,64E-05 | 1,76E-09 | 1,06E-07 | 1,07E-04 | 1,01E-12 |
| Réseau Levier 1 | 94,07% | 64,44% | 104,53% | 92,31% | 96,62% |

Plus précisément, la répartition de l'évolution entre les réseaux fixe et mobile est la suivante :

| IMPACT UF | | | | | |
|-----------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Fixe Base | 1,87E-05 | 7,07E-10 | 8,59E-08 | 7,37E-05 | 7,41E-13 |
| Mobile Base | 7,74E-06 | 1,05E-09 | 1,96E-08 | 3,33E-05 | 2,70E-13 |
| Fixe Levier 1 | 122,66% | 122,66% | 122,66% | 122,66% | 122,66% |
| Mobile Levier 1 | 25,19% | 25,19% | 25,19% | 25,19% | 25,19% |

Cependant, si on observe l'évolution des impacts ramenée à l'Unité Fonctionnelle, elle est minime:

| IMPACT UF - Levier réseau | | | | | |
|---------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Base | 1,23E-01 | 3,27E-06 | 6,99E-04 | 6,91E-01 | 8,65E-09 |
| Levier 1 | 100,00% | 99,98% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Le report de l'usage du réseau mobile vers le réseau fixe implique une diminution de 75% sur l'ensemble des indicateurs pour le réseau mobile pour une augmentation de 23% des impacts du réseau fixe.

Constats & analyses:

- Si on analyse le gain à l'échelle du réseau dans sa globalité (fixe + mobile), il est de 36% sur l'indicateur d'épuisement des ressources abiotiques (ADPe) et de 6% pour potentiel de changement climatique (GWP). Ceci s'explique, car la différence d'impact entre les réseaux mobile et fixe est particulièrement importante pour l'indicateur ADPe (x6 pour un même volume de données).
- À l'échelle de l'UF cependant, le gain est minime, la part du réseau étant initialement très limitée dans l'évaluation initiale.

IV.A.3 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps

Traité sur l'approche conséquentielle court terme (IV.B.2).

IV.A.4 Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure

Le levier 3 va permettre de lisser le traitement des emails "non urgents" et donc de sous-dimensionner l'infrastructure nécessaire.

Pour simuler un modèle de lissage du "pic" de l'infrastructure nécessaire, nous avons procédé à une Analyse de Sensibilité (AS) sur le pourcentage de diminution de la taille de l'infrastructure.

À noter que l'AS ne va influencer que sur la partie traitement, le dimensionnement du stockage restant identique.

En faisant varier le pourcentage de diminution de l'infrastructure de traitement, on obtient les résultats suivants :

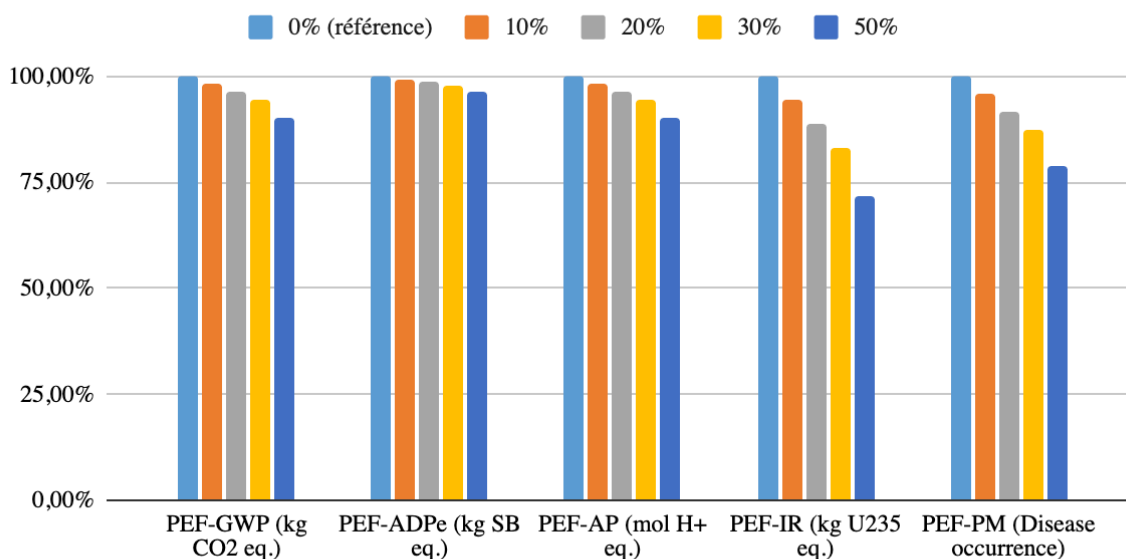
| Impact infrastructure de traitement | | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| % de diminution | PEF-GWP | PEF-ADPe | PEF-AP | PEF-IR | PEF-PM |
| 0% (référence) | 3,44E-02 | 3,56E-07 | 1,95E-04 | 5,35E-01 | 4,91E-09 |
| 10% | 3,10E-02 | 3,20E-07 | 1,76E-04 | 4,81E-01 | 4,42E-09 |
| 20% | 2,76E-02 | 2,85E-07 | 1,56E-04 | 4,28E-01 | 3,93E-09 |
| 30% | 2,41E-02 | 2,49E-07 | 1,37E-04 | 3,74E-01 | 3,44E-09 |
| 50% | 1,72E-02 | 1,78E-07 | 9,76E-05 | 2,67E-01 | 2,45E-09 |

Les impacts sont linéaires avec la taille (et donc le % de diminution) de l'infrastructure. Voici l'évolution des impacts ramenés à l'UF :

| Impact UF Levier Lissage Infrastructure | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| % de diminution | PEF-GWP | PEF-ADPe | PEF-AP | PEF-IR | PEF-PM |
| 0% (référence) | 1,23E-01 | 3,27E-06 | 6,99E-04 | 6,91E-01 | 8,65E-09 |
| 10% | 97,20% | 98,91% | 97,21% | 92,26% | 94,33% |
| 20% | 94,39% | 97,82% | 94,41% | 84,52% | 88,65% |
| 30% | 91,59% | 96,73% | 91,62% | 76,78% | 82,98% |

| | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 50% | 85,98% | 94,55% | 86,03% | 61,30% | 71,63% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|

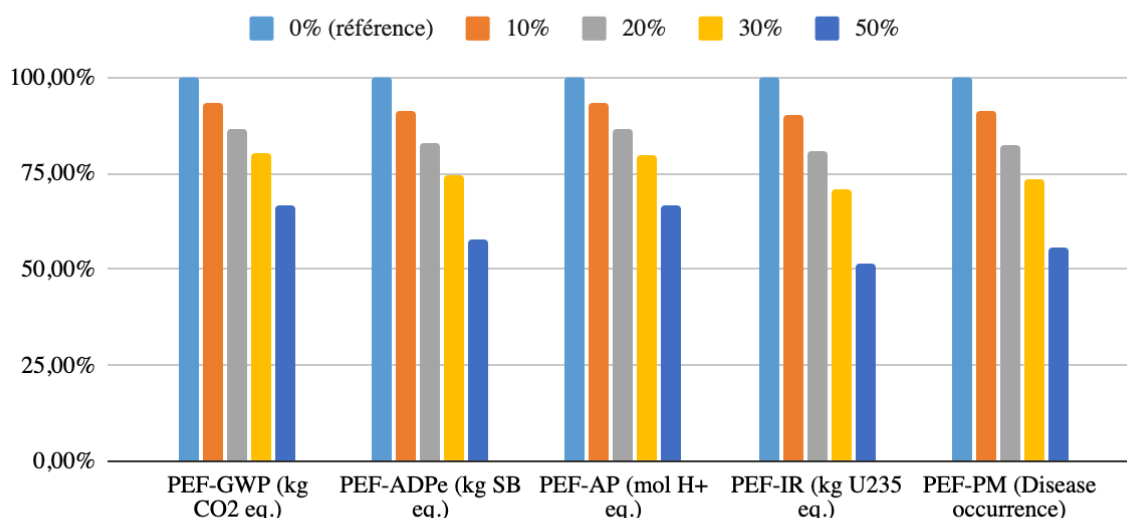
UF - Levier Lissage Traitement - % de diminution infra traitement



Compte tenu du poids important des terminaux dans les impacts évalués, il est intéressant de se focaliser sur le périmètre de l'infrastructure, qui inclut traitement, stockage et réseau.

| Levier Lissage - Focus Infrastructure | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| % de diminution de l'infrastructure de traitement | PEF-GWP | PEF-ADPe | PEF-AP | PEF-IR | PEF-PM |
| 0% (référence) | 5,19E-02 | 4,19E-07 | 2,91E-04 | 5,53E-01 | 5,57E-09 |
| 10% | 93,36% | 91,51% | 93,30% | 90,33% | 91,19% |
| 20% | 86,73% | 83,01% | 86,60% | 80,66% | 82,37% |
| 30% | 80,09% | 74,52% | 79,90% | 70,99% | 73,56% |
| 50% | 66,82% | 57,53% | 66,51% | 51,65% | 55,93% |

Levier Lissage Traitement - Focus Infrastructure - % de diminution infra traitement



Constats & analyses:

- A l'échelle de l'infrastructure, on observe des variations d'impacts importantes (de 34 à 49%) lorsque la diminution de l'infrastructure de traitement atteint les 50%.
- A l'échelle de l'UF, les variations d'impacts restent significatives (de 10 à 29%) lorsque la diminution de l'infrastructure de traitement atteint les 50%
- Ce levier apparaît donc intéressant que ce soit à l'échelle de l'infrastructure ou au niveau du service lui-même.

IV.A.4 Levier 4 : Compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs

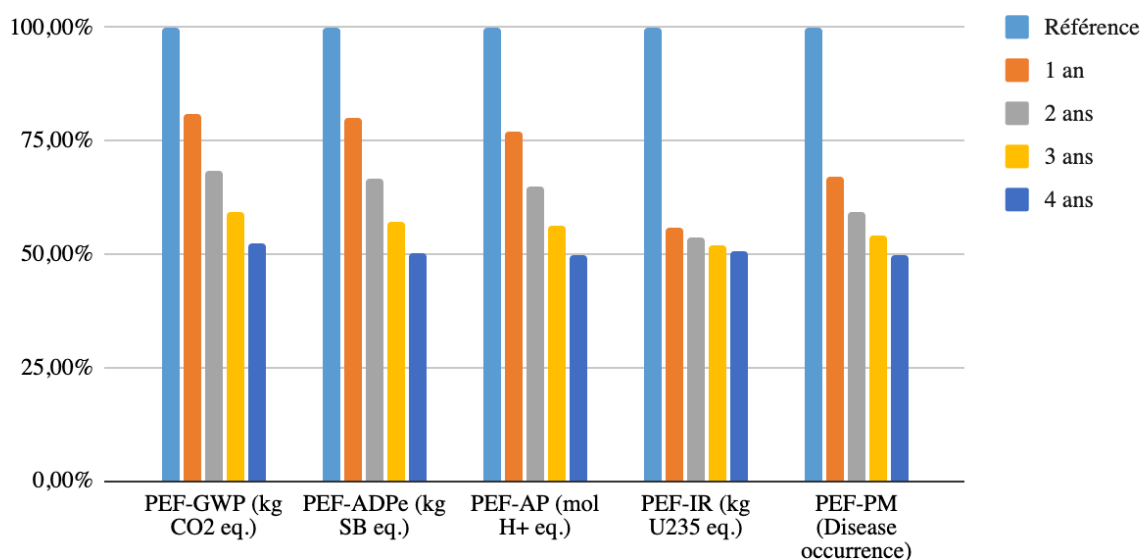
Le quatrième levier permet de conserver la compatibilité de l'application avec les terminaux des utilisateurs et d'éviter leur obsolescence.

Pour évaluer son potentiel, on a effectué une Analyse de Sensibilité sur la durée de vie des terminaux.

Si on se focalise uniquement sur l'impact des terminaux, on obtient les résultats suivants en faisant varier l'augmentation (en années) de la durée de vie des terminaux (smartphone, laptop et desktop):

| Impact de l'augmentation de la durée de vie des terminaux | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| Terminaux (fab+use) | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Référence | 7,09E-02 | 2,85E-06 | 4,29E-04 | 2,34E-01 | 3,92E-09 |
| 1 | 5,73E-02 | 2,28E-06 | 3,29E-04 | 1,31E-01 | 2,63E-09 |
| 2 | 4,83E-02 | 1,90E-06 | 2,78E-04 | 1,26E-01 | 2,33E-09 |
| 3 | 4,20E-02 | 1,63E-06 | 2,41E-04 | 1,22E-01 | 2,11E-09 |
| 4 | 3,72E-02 | 1,43E-06 | 2,13E-04 | 1,19E-01 | 1,96E-09 |

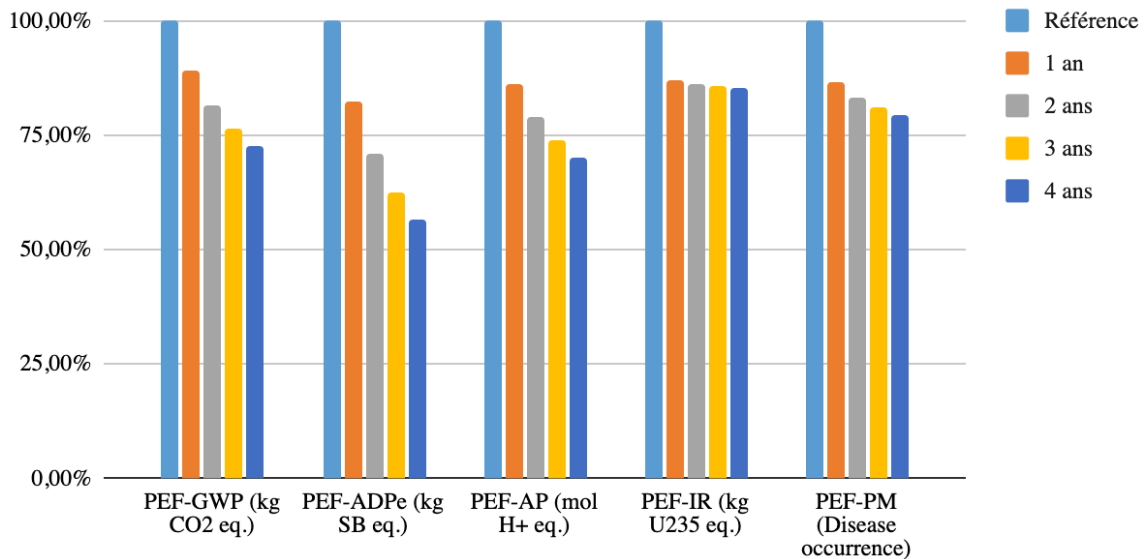
Terminaux - Impact de l'augmentation de la durée de vie



Si on ramène l'évolution des impacts à l'UF, on obtient les résultats suivants :

| Impact de l'augmentation de la durée de vie des terminaux | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| UF | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Référence | 1,23E-01 | 3,27E-06 | 7,20E-04 | 7,87E-01 | 9,49E-09 |
| 1 | 1,09E-01 | 2,70E-06 | 6,21E-04 | 6,84E-01 | 8,20E-09 |
| 2 | 1,00E-01 | 2,32E-06 | 5,69E-04 | 6,79E-01 | 7,90E-09 |
| 3 | 9,39E-02 | 2,05E-06 | 5,32E-04 | 6,75E-01 | 7,68E-09 |
| 4 | 8,91E-02 | 1,85E-06 | 5,05E-04 | 6,72E-01 | 7,52E-09 |

UF Impact de l'augmentation de la durée de vie des terminaux



Constats & Analyses:

- A l'échelle des terminaux, on observe des variations d'impacts importantes sur l'ensemble des indicateurs: de 20 à 46% pour une augmentation d'une année de durée de vie.
Pour l'indicateur de potentiel de changement climatique, le gain varie de 18% à 48% en fonction des années de durée de vie supplémentaires.
- A l'échelle de l'UF, les gains sur l'ensemble des indicateurs restent significatifs: de 11 à 18% pour une augmentation d'une année de durée de vie.
Pour l'indicateur de potentiel de changement climatique, le gain varie de 11% à 28% en fonction des années de durée de vie supplémentaires.
- Ce levier apparaît donc clé pour diminuer les impacts.

IV.A.5 Synthèse : Scénarisation des leviers

Pour synthétiser l'ensemble des leviers considérés et les analyses de sensibilité effectuées, nous avons défini 3 scénarii pour les comparer au système de référence :

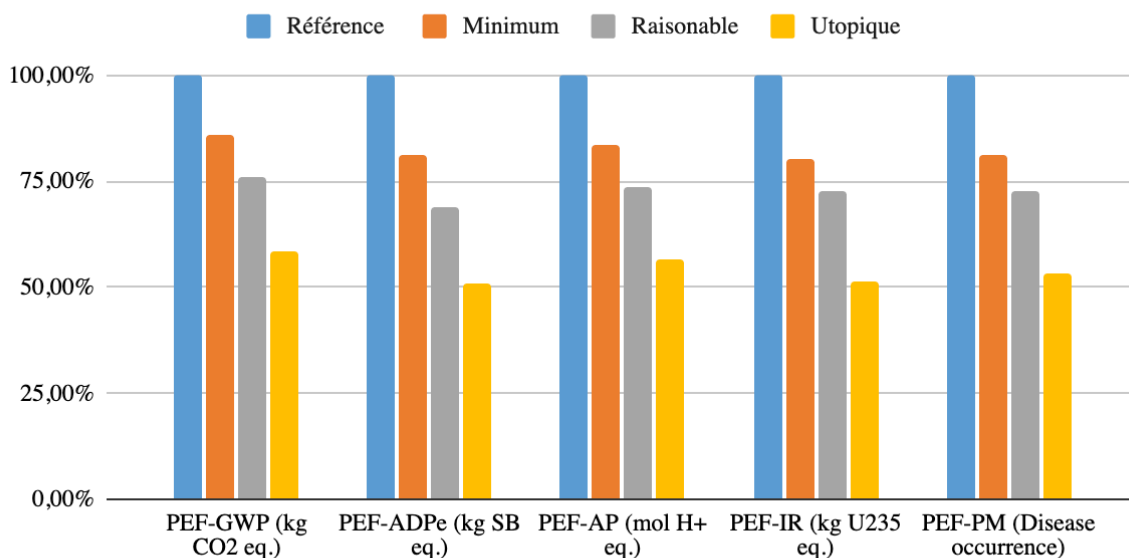
- Le scénario "minimum" : la gestion de l'urgence des mails va permettre une moindre utilisation du réseau mobile et une diminution de **10%** de l'infrastructure nécessaire (lissage minimum des traitements). L'éco-conception de l'application de mail participe à l'allongement "minimum" - **un an** - des terminaux.
- Le scénario "raisonnable" : on vise une diminution de **20%** de l'infrastructure nécessaire et un allongement de **deux ans** des terminaux.

- Le scénario "utopique" : tous les curseurs sont à droite ; diminution de **50%** de l'infrastructure nécessaire et allongement de **quatre ans** des terminaux.

Sur la base de ces hypothèses, on obtient les résultats suivants :

| Scénarisation des leviers | | | | | |
|---------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| UF | PEF-GWP (kg CO2 eq.) | PEF-ADPe (kg SB eq.) | PEF-AP (mol H+ eq.) | PEF-IR (kg U235 eq.) | PEF-PM (Disease occurrence) |
| Référence | 1,23E-01 | 3,27E-06 | 7,20E-04 | 7,87E-01 | 9,49E-09 |
| Minimum | 1,06E-01 | 2,66E-06 | 6,01E-04 | 6,30E-01 | 7,71E-09 |
| Raisonné | 9,34E-02 | 2,25E-06 | 5,30E-04 | 5,72E-01 | 6,92E-09 |
| Utopique | 7,19E-02 | 1,67E-06 | 4,07E-04 | 4,05E-01 | 5,07E-09 |

Scénarisation des leviers



IV.B. Approche conséquentielle court terme

Nous nous intéressons ici aux impacts marginaux induits par l'unité fonctionnelle dans le scénario de base et pour les leviers 1 et 2. En d'autres termes, on évalue les impacts supplémentaires conséquents de la mise en œuvre de l'UF à la différence de la méthode

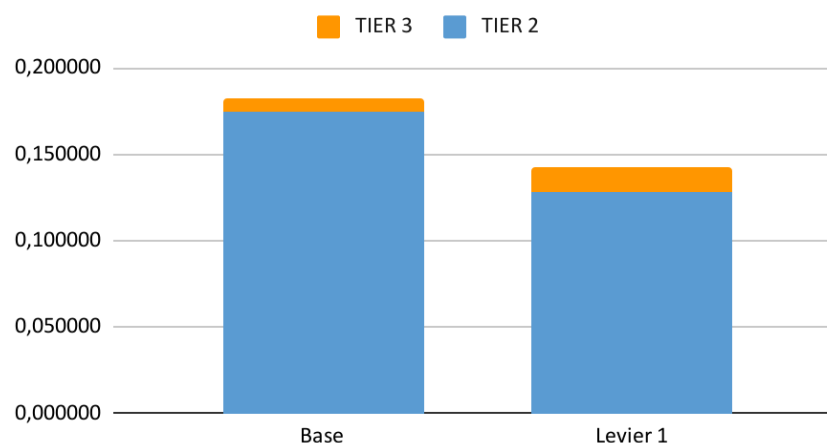
attributionnelle où l'on attribue une part de l'ensemble des ressources mobilisé pour mettre en œuvre de l'UF.

IV.B.1 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès

En appliquant le levier 1 (modification dynamique du réseau d'accès) on obtient les résultats suivants :

| Levier 1 | | | | | | |
|-------------------|----------|----------------|--------------|-------------------|----------|----------------|
| Base | | | Différentiel | Levier 1 | | |
| TIER 2 | | | | | | |
| Fixe - access | 0,045776 | <i>gCO2eq.</i> | 1,39% | Fixe - access | 0,046414 | <i>gCO2eq.</i> |
| Fixe - backbone | 0,068664 | <i>gCO2eq.</i> | 1,39% | Fixe - backbone | 0,069622 | <i>gCO2eq.</i> |
| Mobile - access | 0,059541 | <i>gCO2eq.</i> | -80,42% | Mobile - access | 0,011657 | <i>gCO2eq.</i> |
| Mobile - backbone | 0,001191 | <i>gCO2eq.</i> | -80,42% | Mobile - backbone | 0,000233 | <i>gCO2eq.</i> |
| TOTAL | 0,175172 | <i>gCO2eq.</i> | -26,97% | TOTAL | 0,127926 | <i>gCO2eq.</i> |
| TIER 3 | | | | | | |
| TOTAL | 0,006987 | <i>gCO2eq.</i> | 104,53% | TOTAL | 0,014291 | <i>gCO2eq.</i> |
| TOTAL | | | | | | |
| TOTAL | 0,182159 | <i>gCO2eq.</i> | -21,93% | TOTAL | 0,142217 | <i>gCO2eq.</i> |

Levier 1 comparé au scénario de base



Sur une semaine, le levier 1 permet une réduction d'environ 22%. Les valeurs absolues restent très faibles (gain de 0,04 gCO2eq.).

IV.B.2 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps

En appliquant le levier 2 (déplacement de la demande dans le temps) on obtient les résultats suivants :

| Base | | | Différentiel | Levier 2 | | |
|-------------------|----------|---------|--------------|-------------------|----------|---------|
| TIER 2 | | | | | | |
| Fixe - access | 0,045776 | gCO2eq. | -23,76% | Fixe - access | 0,034900 | gCO2eq. |
| Fixe - backbone | 0,068664 | gCO2eq. | -23,76% | Fixe - backbone | 0,052350 | gCO2eq. |
| Mobile - access | 0,059541 | gCO2eq. | -13,39% | Mobile - access | 0,051566 | gCO2eq. |
| Mobile - backbone | 0,001191 | gCO2eq. | -13,39% | Mobile - backbone | 0,001031 | gCO2eq. |
| TOTAL | 0,175172 | gCO2eq. | -20,17% | TOTAL | 0,139848 | gCO2eq. |
| TIER 3 | | | | | | |
| TOTAL | 0,006987 | gCO2eq. | -4,59% | TOTAL | 0,006667 | gCO2eq. |
| TOTAL | | | | | | |
| TOTAL | 0,182159 | gCO2eq. | -19,57% | TOTAL | 0,146514 | gCO2eq. |

Levier 2 comparé au scénario de base



Sur une semaine, le levier 2 permet une réduction d'environ 20%. Les valeurs absolues restent très faibles (gain de 0,04 gCO2eq.).

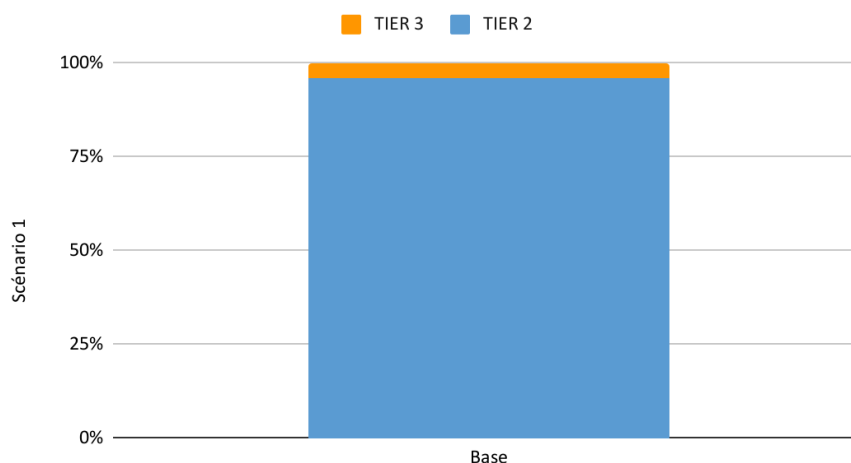
IV.B.3 Synthèse

En appliquant les leviers 1 et 2 de manière combinée, on obtient les résultats suivants :

| Base | Différentiel | Levier 1 & 2 |
|------|--------------|--------------|
|------|--------------|--------------|

| TIER 1 | | | | | | |
|----------------------------------|----------|---------|----------------|-------------------|----------|---------|
| Non pris en compte + même impact | | | | | | |
| TIER 2 | | | | | | |
| Fixe - access | 0,045776 | gCO2eq. | -22,60% | Fixe - access | 0,035432 | gCO2eq. |
| Fixe - backbone | 0,068664 | gCO2eq. | -22,60% | Fixe - backbone | 0,053148 | gCO2eq. |
| Mobile - access | 0,059541 | gCO2eq. | -80,42% | Mobile - access | 0,011657 | gCO2eq. |
| Mobile - backbone | 0,001191 | gCO2eq. | -80,42% | Mobile - backbone | 0,000233 | gCO2eq. |
| TOTAL | 0,175172 | gCO2eq. | -42,64% | TOTAL | 0,100470 | gCO2eq. |
| TIER 3 | | | | | | |
| TOTAL | 0,006987 | gCO2eq. | -6,81% | TOTAL | 0,006511 | gCO2eq. |
| TOTAL | | | | | | |
| TOTAL | 0,182159 | gCO2eq. | -41,27% | TOTAL | 0,106981 | gCO2eq. |

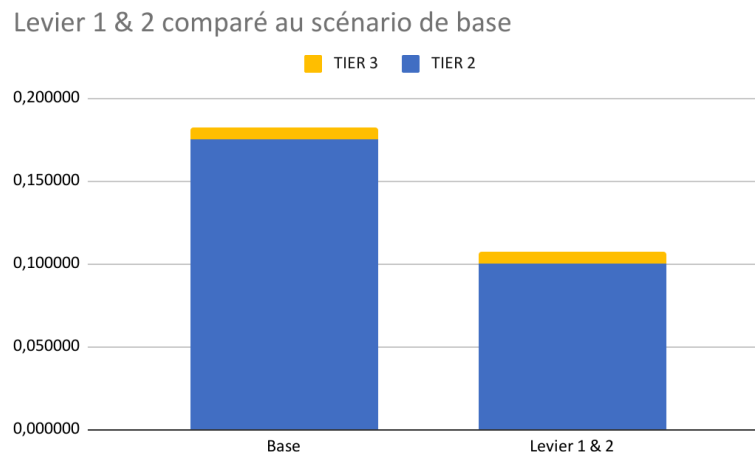
Scénario de base



Dans le scénario de base, l'impact associé au réseau représente environ 90% des impacts générés par une semaine de mail contre 10% pour l'infrastructure. Cette différence s'explique par une consommation électrique marginale de l'infrastructure faible comparée aux consommations marginales du réseau mobile.

Les impacts d'une semaine de mail dans l'approche conséquentielle court terme équivalent à 0,20 gCO2eq. Comme on peut s'y attendre, l'impact de l'UF est bien plus faible que pour l'approche attributionnelle (presque 100 fois moins impactant). Cela s'explique par la non-considération dans cette approche des impacts de la fabrication, de la distribution et de la fin de vie, ni des impacts issus de la consommation électrique fixe des équipements réseaux et d'infrastructure.

On peut en conclure que les principaux impacts environnementaux du mail ne résident pas dans les conséquences directes de leurs envois, mais plutôt dans l'ensemble de la chaîne de valeur nécessaire à son fonctionnement. S'intéresser aux impacts des mails via une approche conséquentielle court terme paraît donc peu pertinent.

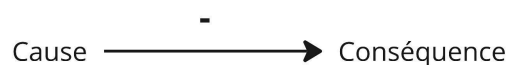


L'approche conséquentielle court-terme permet de confirmer l'intérêt relatif du deuxième système par rapport au premier (environ 40% de gain sur le critère participation au réchauffement global sur l'infrastructure). Cependant, les valeurs absolues restent extrêmement faibles (0,08 gCO₂eq. par semaine entre le scénario de base et les leviers 1 & 2 réunis).

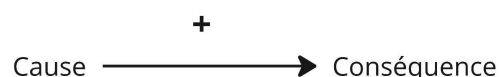
IV.C. Approche conséquentielle long terme

Comment lire un graphe de conséquence ?

Un graphe de conséquence permet de représenter des chaînes de causalité. Nous représentons les conséquences de la manière suivante :

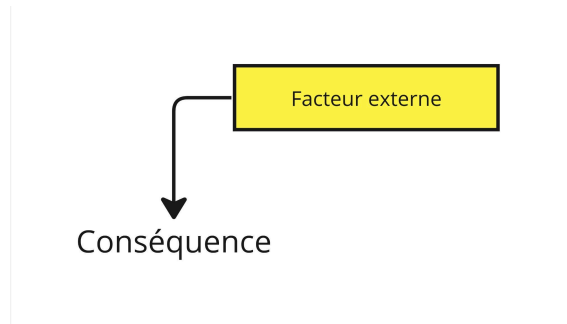


Plus la quantité de "cause" est grande, plus la quantité de "conséquence" est petite.



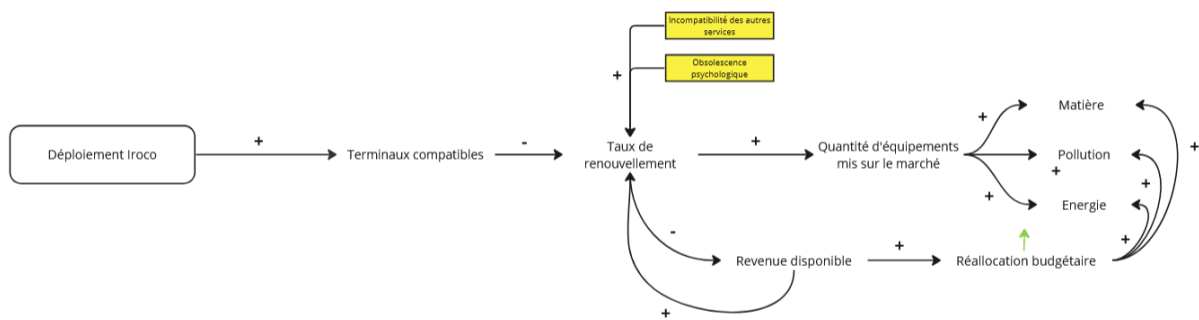
Plus la quantité de "cause" est grande, plus la quantité de "conséquence" est grande.

Note : les “+” et “-” ne correspondent pas à des effets positifs ou négatifs. Un effet “+” peut être positif comme négatif, de même pour un effet “-”.



Un facteur externe est une cause d'une des conséquences du graphe qui n'est pas relié à la conséquence initiale. Nous représentons une partie des facteurs externes afin de mieux comprendre les diverses influences qui s'exercent sur les dynamiques analysées.

IV.C.1 Levier 4 : Compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs



La durée de vie des équipements numériques, en particulier des terminaux utilisateurs, est une variable cruciale pour réduire les impacts environnementaux d'un service numérique. En reprenant les scénarios de l'ACV-A par exemple, une augmentation de la durée de vie des terminaux d'un an réduit de 10% les impacts attribuables à l'usage d'une boîte mail pendant une semaine sur le critère GWP et jusqu'à 30% en augmentant la durée de vie de quatre ans. Cette durée de vie est influencée par les différents mécanismes d'obsolescence ¹⁸ :

- **L'obsolescence technique** qui correspond à une fin de vie prématurée d'un équipement due à une défaillance d'un ou plusieurs composants.
- **L'obsolescence psychologique** ou marketing qui correspond à un renouvellement prématuré d'un équipement fonctionnel influencé par des mécanismes marketing.

¹⁸ <https://www.halteobsolescence.org/a-propos/#faq>

- **L'obsolescence logicielle** qui correspond à une fin de vie prématurée d'un équipement encore fonctionnel du fait d'incompatibilités des logiciels utilisés. C'est cette dernière qui nous intéresse puisque le système étudié est un logiciel.

Le déploiement de services mail maximisant la compatibilité avec des terminaux anciens participe à réduire le taux de renouvellement, réduisant par la même occasion les besoins en équipements supplémentaires – et les ressources et l'énergie mobilisées pour les fabriquer.

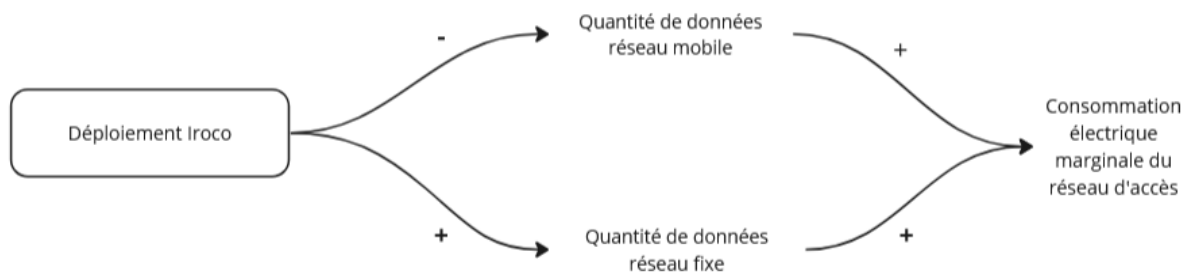
Il faut cependant noter que les terminaux sont utilisés pour une multitude de services. L'obsolescence logicielle est donc susceptible d'arriver depuis n'importe quel service utilisé. La maximisation du taux de renouvellement dépend donc de l'effort mis par l'ensemble des producteurs de services pour maximiser leur compatibilité avec les terminaux.

De plus, l'éventuelle baisse des taux de renouvellement entraîne des risques d'effets rebond liés à la hausse du budget disponible :

- Des effets rebonds directs : le budget disponible est utilisé pour acheter d'autres équipements numériques.
- Des effets rebonds indirects : le budget disponible est utilisé pour acheter d'autres biens et services ayant également des impacts environnementaux.

Il est donc nécessaire de sensibiliser les clients sur la réallocation du budget disponible.

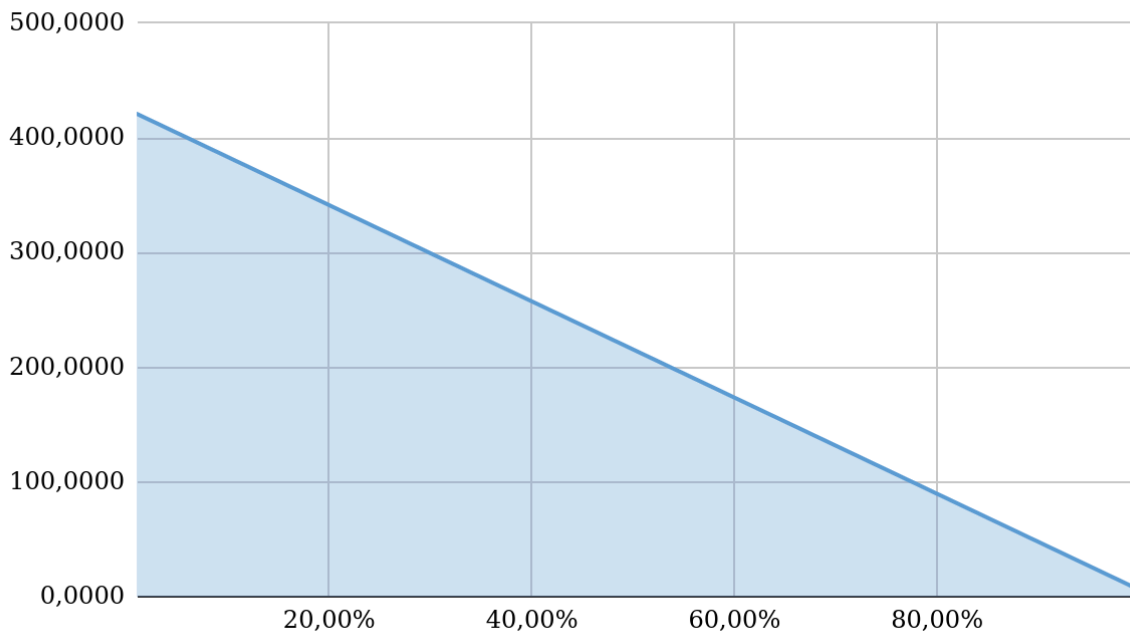
IV.C.2 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès



Le déplacement de l'envoi de mail du réseau mobile vers le réseau fixe permet des gains de consommation énergétique puisque la consommation marginale des réseaux mobiles est plus importante que celles du réseau fixe. Ce point est traité en section IV.B.1.

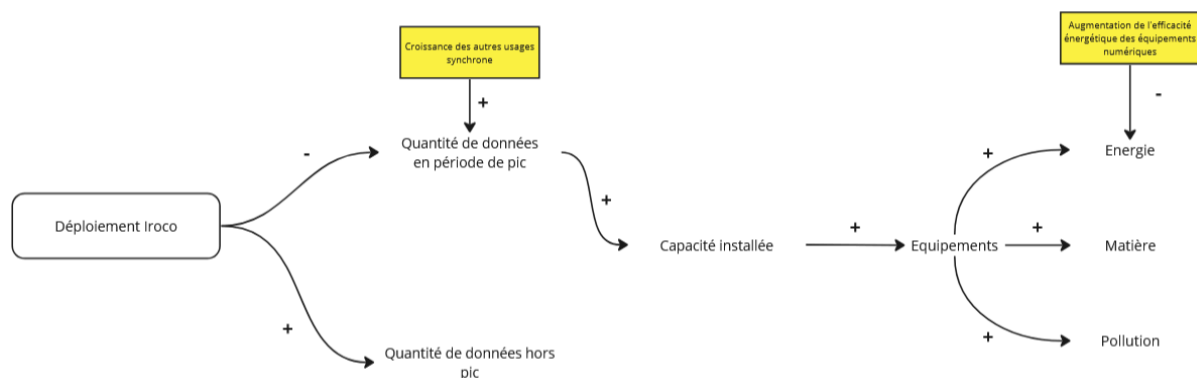
Le graphique ci-dessous présente les consommations marginales du réseau d'accès internet pendant une journée pour le service mail en fonction du pourcentage de mail envoyé via un réseau fixe. On observe une évolution de 400 kWh quand 100% des mails sont envoyés via un réseau mobile et 5,7 kWh si 100% des mails sont envoyés via un réseau fixe.

■ Consommation électrique marginale journalière totale (kWh)



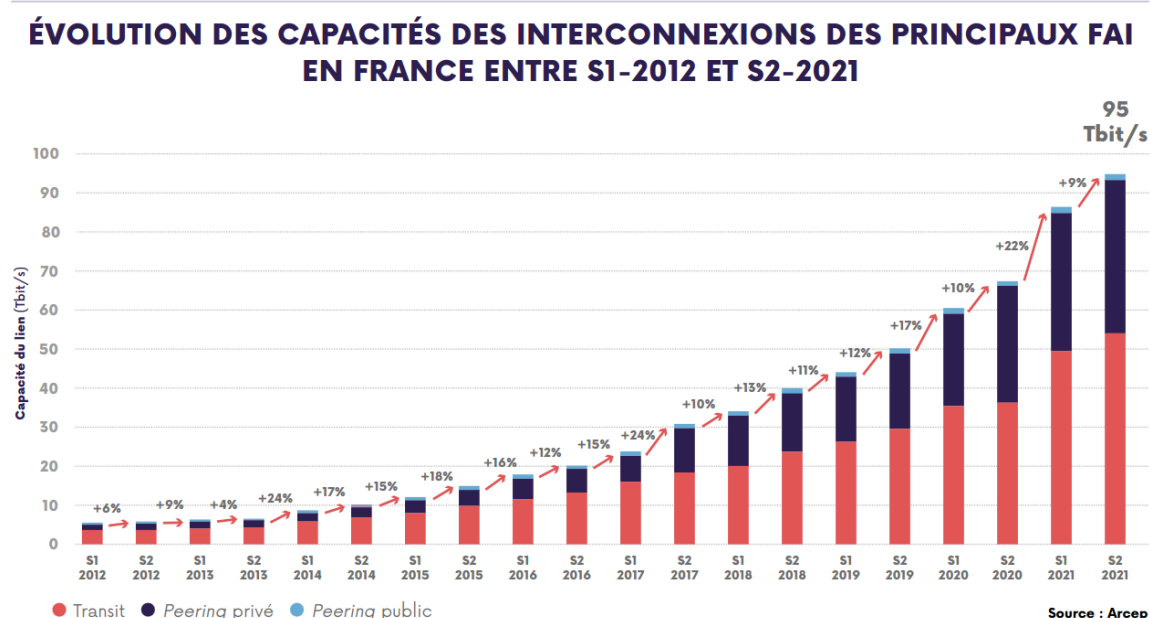
| Item | Valeur | Unités | Source |
|-------------------------|------------|--------|---|
| Poids moyen d'un mail | 728,8 | Kb | http://www.woueb.net/2007/07/17/etude-sur-la-taille-moyenne-des-mails/ |
| Nombre de mails envoyés | 1400000000 | unités | https://mailpartner.fr/blog/les-10-chiffres-du-mail-marketing-a-connaître/ |

IV.C.2 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps



Une part majoritaire des impacts environnementaux du réseau dépend de l'évolution de la capacité installée (i.e. de la quantité d'équipements installés et du débit maximal qu'ils peuvent faire transiter). On compte parmi eux les impacts induits par la consommation fixe des équipements (voir section III.C.2) ainsi que les impacts induits par les autres phases du cycle de vie des équipements réseau (extraction des matières premières, fabrication, distribution, fin de vie). En effet, plus la capacité augmente, plus les opérateurs doivent mettre en œuvre de nouveaux équipements qui doivent être fabriqués et dont la mise en service augmentera la consommation fixe des infrastructures réseau.

La capacité des réseaux ne cesse d'augmenter à un rythme important. On peut observer ce phénomène en regardant les capacités d'interconnexion des principaux FAI entre 2012 et 2021 (ARCEP). Si l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements mise en œuvre permet de limiter la hausse de la consommation d'énergie, l'augmentation de la capacité du réseau participe tout de même à l'augmentation des impacts du cycle de vie des réseaux numériques.

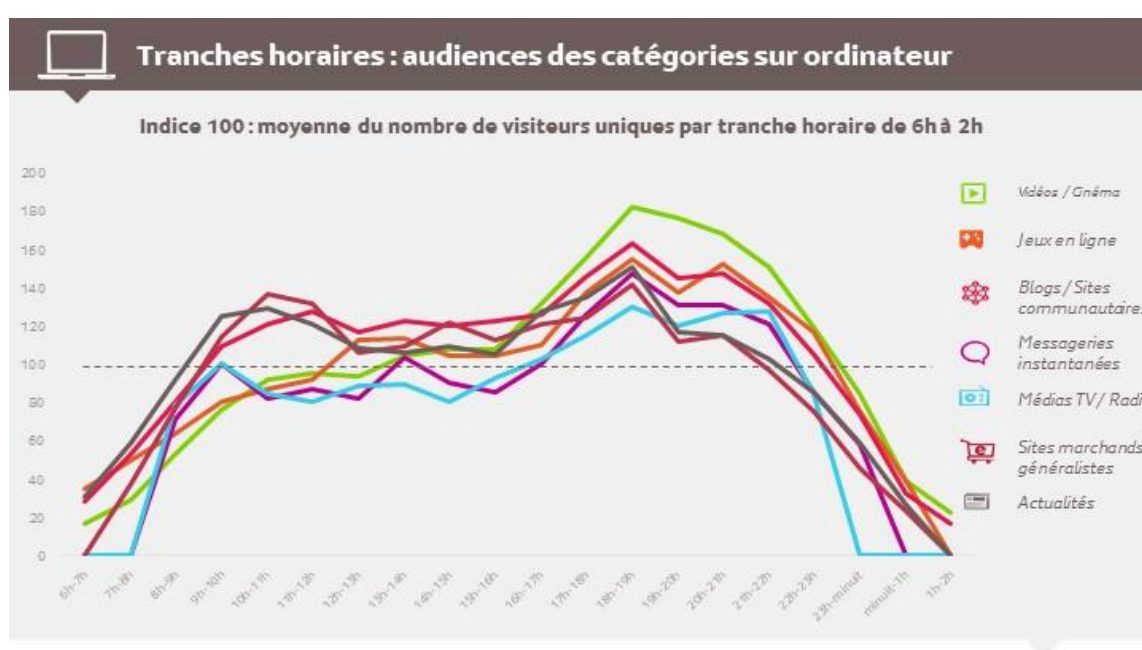


Plusieurs paramètres influent sur la hausse de la capacité installée :

- L'augmentation du trafic lors des pics de consommation,
- Les évolutions technologiques,
- La concurrence entre les opérateurs,
- La régulation,
- Les aspects géopolitiques.

L'augmentation du trafic lors des pics de consommation nous intéresse tout particulièrement, car les opérateurs de services numériques peuvent directement influencer le pic en optimisant leurs systèmes (déplacer les tâches automatiques, compresser les données...) ou en proposant des modifications d'usage (baisse de qualité, déplacement des usages dans la journée). Dans le cas d'Iroco, un changement d'usage est proposé en permettant de déplacer un envoi de mail en dehors des pics.

Le pic de consommation journalier, tous usages confondus, se trouve généralement en fin de journée lors des pics de consommation de vidéo, de jeux vidéo et de médias sociaux. Depuis l'essor du télétravail, le pic tend à se lisser avec la hausse des usages professionnels, en particulier les vidéoconférences.



Mediametrie, 2018,

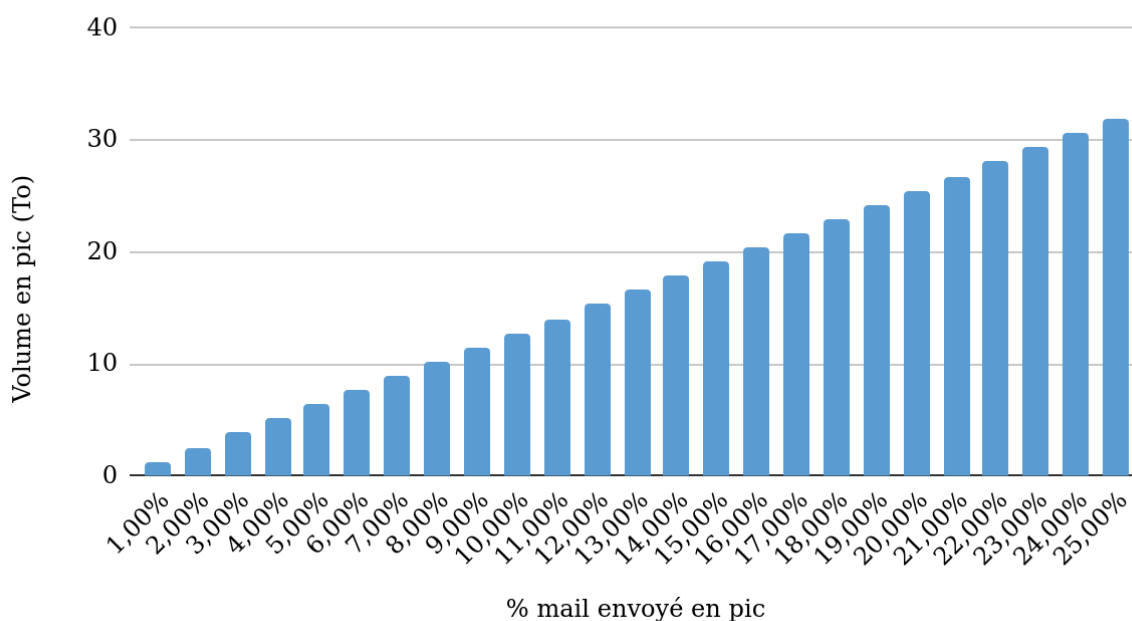
<https://www.mediametrie.fr/fr/Y%E2%80%99a-t-il-un-Prime-Time-sur-Internet-%3F>

Il n'existe pas de données sur le volume de mails envoyés pendant les pics de consommation. On peut néanmoins regarder l'évolution des besoins en fonction du pourcentage de mails envoyés durant un pic. En prenant 25% comme proportion maximale de mails envoyés en période de pic (hypothèse très conservatrice, car les mails sont généralement envoyés dans la journée) et 1% comme hypothèse minimale (hypothèse très optimiste de réduction à la suite de l'introduction du levier 2), on obtient à l'échelle de la France le graphe suivant, avec les hypothèses ci-dessous :

| Item | Valeur | Unités | Source |
|------|--------|--------|--------|
|------|--------|--------|--------|

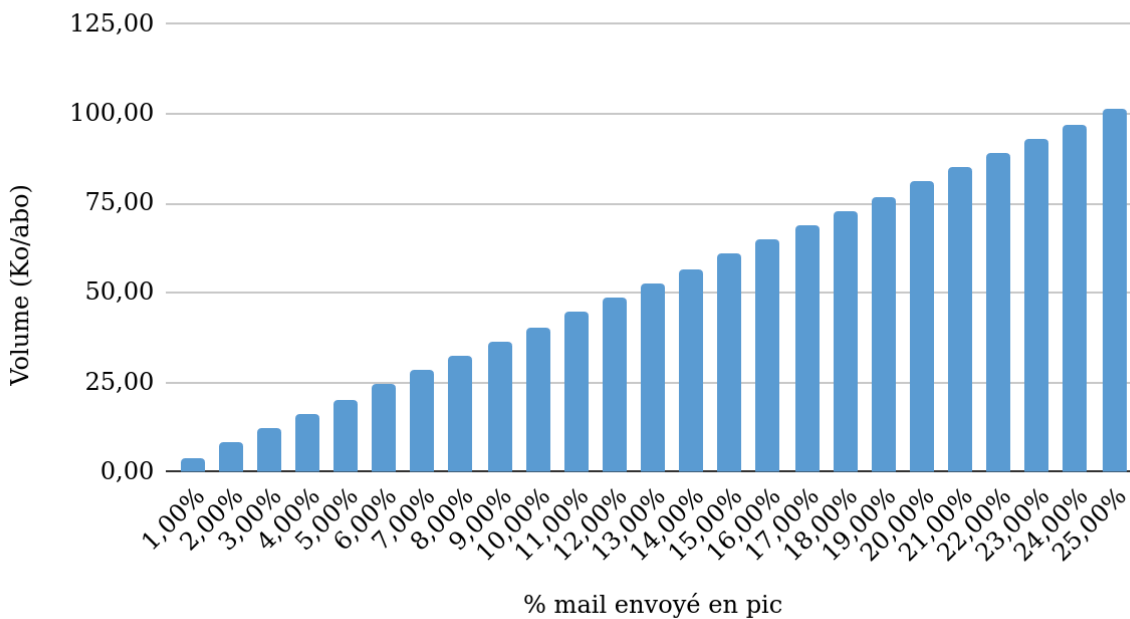
| | | | |
|------------------------|------------|--------|---|
| Poids moyen d'un mail | 728,8 | Kb | http://www.woueb.net/2007/07/17/etude-sur-la-taille-moyenne-des-mails/ |
| Nombre de mail envoyée | 1400000000 | unités | https://mailpartner.fr/blog/les-10-chiffres-du-mail-marketing-a-connaître/ |
| nb Abonné.e.s | 315000000 | unités | https://www.frandroid.com/telecom/forfait-internet/1292669-vous-etes-encore-en-adsl-vous-voila-minoritaire#pid=2 |
| Débit mail | 1000 | Kbs | Hypothèse |
| Débit FHD | 5000 | Kbs | https://hal.science/hal-04059523 |

Volume en pic (To) par rapport à % mail envoyé en pic



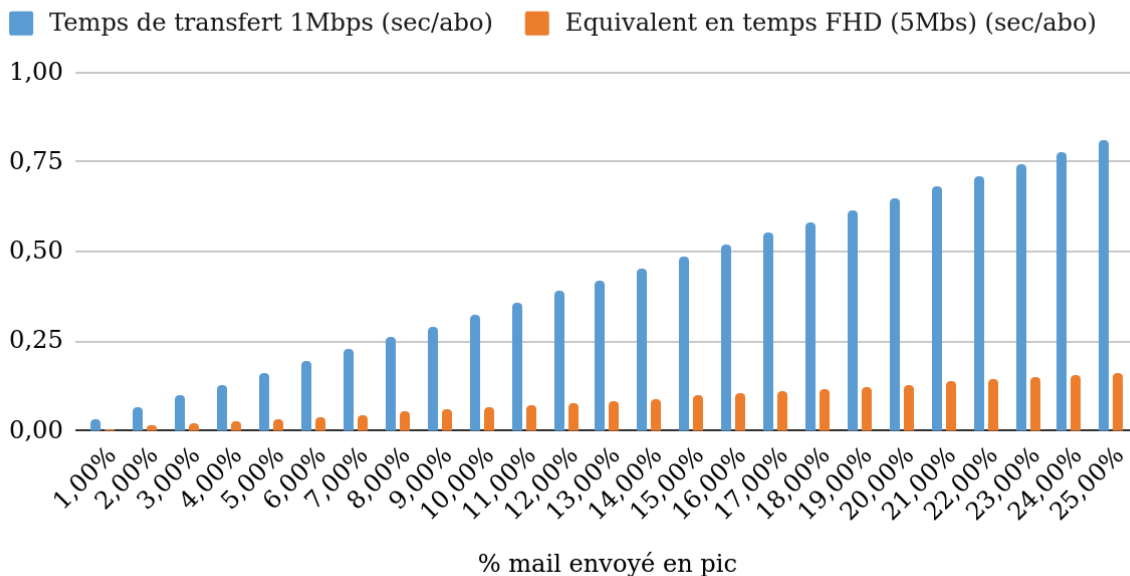
Si 25% des mails sont envoyés en période de pic, cela représente 30 To à transférer sur le réseau français contre 1,3 To à 1%. Cette différence paraît très faible, en particulier quand on la rapporte au nombre d'abonné.e.s (100 Ko à 25%, 4 Ko à 1%).

Volume (Ko/abo) par rapport à % mail envoyé en pic



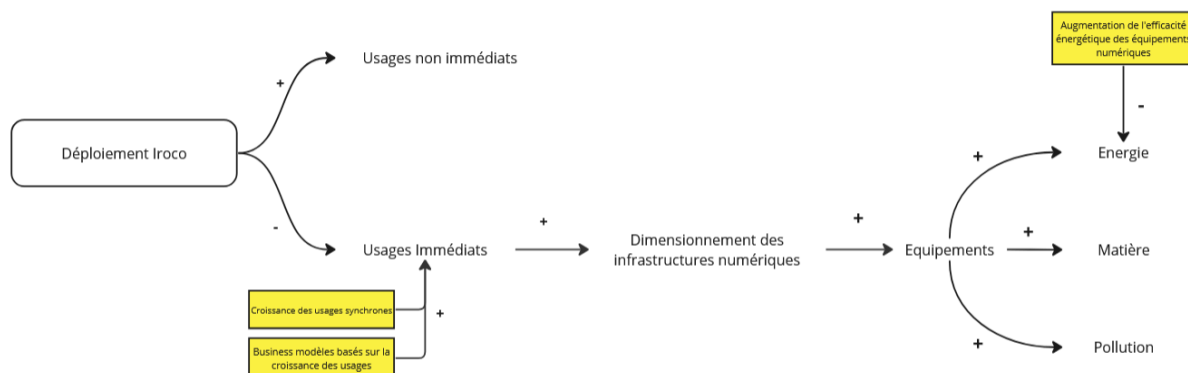
Ces volumes représentent moins d'une seconde de sollicitation du réseau pour l'envoi d'un mail à 1 Mbps. Si on compare à un usage tel que la vidéo en ligne FHD (5 Mbs) passer de 25% à 1% de mails envoyés en période de pic, équivaut à réduire sa consommation de vidéo en Full HD en période de pic de 0,16 seconde par abonné.e. On peut ajouter que comparativement à des usages synchrones (tels que la vidéo en ligne), les services mail sont asynchrones. Le débit acceptable peut être réduit de manière importante sans réduire la qualité de service.

Temps de transfert 1Mbps (sec/abo) et Equivalent en temps FHD (5Mbps) (sec/abo)



Le levier 2 semble être une mesure pertinente pour lutter contre la croissance de la capacité installée et des impacts associés. Cependant, son application au cas du mail paraît très limitée, car les volumes et débits en jeu sont trop faibles pour agir sur la capacité installée.

IV.C.3 Participation à la réduction de l'immédiateté du numérique : un cinquième levier à valoriser



Si l'application d'une telle démarche au cas du mail semble limitée, elle aurait un effet plus important appliqué à des services plus intensifs en données comme la vidéo en streaming. La principale difficulté réside dans la synchronicité de ce type de service qui rend plus difficile la décorrélation entre le moment de distribution et le moment où la ressource est utilisée. L'enjeu est donc de réduire l'immédiateté des usages numériques.

Cela implique un travail de réflexion sur les besoins fondamentaux des usagers vis-à-vis du numérique, mais également de travailler sur les leviers techniques permettant à la fois de répondre à ces besoins tout en stoppant la croissance des infrastructures numériques.

Les travaux et réflexion d'Iroco vont dans ce sens et semblent représenter un levier environnemental majeur, bien que non quantifiable, permettant d'inspirer d'autres acteurs à implémenter des services numériques compatibles avec les limites planétaires. Une telle démarche doit se confronter à la croissance actuelle des usages synchrones, notamment poussée par les modèles d'affaires du numérique basés sur la croissance des usages.

V. Conclusions et recommandations

IV.A. Analyse et recommandations

Rappel des approches et des leviers mis en œuvre :

| <u>Levier</u> | <u>Attributionnel</u> | <u>Conséquentiel court-terme</u> | <u>Conséquentiel long-terme</u> |
|--|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | Oui | Oui | Oui |
| Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | Non | Oui | Oui |
| Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure | Oui | Non | Non |
| Levier 4 : Rétro-compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | Oui | Non | Oui |

IV.A.1 Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès

Les 3 approches (ACV-A, conséquentielle court terme, conséquentielle long terme) soulignent que la modification dynamique du réseau d'accès est une bonne solution à l'échelle du réseau. Cependant, il apparaît très faible à l'échelle du service, car celui-ci consomme un faible volume de données. L'analyse relative montre néanmoins que ce levier peut être pertinent dans d'autres cas d'usage plus gourmands en données.

Effet : Faible

IV.A.2 Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps

Comme pour le levier 1, l'approche conséquentielle court terme montre un gain relatif significatif à l'échelle des infrastructures, principalement dû au réseau. Cependant, le gain absolu est minime à l'échelle du service. Ceci illustre bien que les principaux impacts environnementaux du mail ne résident pas dans les conséquences directes de leurs envois, mais plutôt dans l'ensemble de la chaîne de valeur nécessaire à son fonctionnement.

Effet : Faible

IV.A.3 Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure

La simulation d'un modèle de lissage du "pic" de l'infrastructure de traitement montre un gain important à cette échelle (de 34 à 49% en fonction des indicateurs pour une diminution de 50% de l'infrastructure de traitement).

À l'échelle du service, le gain reste significatif, au-delà de 10% pour tous les indicateurs, avec une hypothèse de diminution de 50% de l'infrastructure de traitement

Effet : Moyen

IV.A.4 Levier 4 : Rétro-compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs

La capacité d'un service numérique à limiter l'obsolescence des terminaux et donc de prolonger leur durée de vie est un levier clef pour réduire ses impacts environnementaux.

À l'échelle des terminaux et dans une approche attributionnelle, on observe des variations d'impacts importantes sur l'ensemble des indicateurs: de 20 à 46% pour une augmentation d'une année de durée de vie.

A l'échelle du service, les gains sur l'ensemble des indicateurs restent significatifs : de 11% à 18% pour une augmentation d'une année de durée de vie.

Cependant, l'approche conséquentielle long terme met en avant des limites potentielles :

- 1) les terminaux étant utilisés pour une multitude de services, le recul de l'obsolescence logicielle dépend aussi des efforts effectués par les autres producteurs de services.
- 2) L'éventuelle baisse des taux de renouvellement des terminaux peut entraîner des effets rebond liés à la hausse du budget disponible.

Effet : Important

IV.A.5 Participation à la réduction de l'immédiateté du numérique : un cinquième levier à valoriser

Si certains leviers, permis par une évolution asynchrone des usages, ont montré un faible impact sur le service mail, leur application à des services plus intensifs en données, comme la vidéo en streaming, apparaît prometteuse.

Cela illustre bien l'enjeu de réduire l'immédiateté des usages numériques. Il faut à la fois réfléchir à la réalité des besoins, et travailler sur les leviers techniques "juste nécessaires" pour stopper la croissance des infrastructures.

Ces travaux et réflexions d'Iroco vont dans ce sens. Ils peuvent inspirer d'autres acteurs à implémenter des services numériques compatibles avec les limites planétaires.

Effet : Très important

IV.A.6 Synthèse

| <u>Levier</u> | <u>Effet</u> |
|---|-----------------------|
| Levier 1 : Modification dynamique du réseau d'accès | Faible |
| Levier 2 : Déplacement de la demande dans le temps | Faible |
| Levier 3 : Diminution du dimensionnement de l'infrastructure | Moyen |
| Levier 4 : Rétro-compatibilité du service mail avec les terminaux utilisateurs | Important |
| Levier 5 : Participation à la réduction de l'immédiateté du numérique : un cinquième levier à valoriser | Très important |