

INSPIRE : Inventer un Système Productif des Infrastructures numériques Résilient

Adrien LUXEY-BITRI – Maître de conférences – Univ Lille, Inria

Personnel impliqué

Membre	Institut	Fonction	Implication	WP	Expertise
A. LUXEY-BITRI	Univ Lille, Inria	MCF	75% – 18 p.m.	Tous	Logiciels répartis, Analyse env. du num.
Post-doctorat	Inria		100% – 24 p.m.	1 & 2	Analyse environnementale
Doctorat	Inria		100% – 36 p.m.	2 & 3	Informatique, Modélisation
Stage n°1	Inria		100% – 6 p.m.	1 & 2	Informatique
Stage n°2	Inria		100% – 6 p.m.	3	Informatique
R. ROUVOY	Univ Lille, Inria	PR	5% – 1.2 p.m.	Tous	Logiciels répartis, Conso. élec. du num.
C. QUINTON	Univ Lille, Inria	MCF HDR	5% – 1.2 p.m.	Tous	Génie logiciel, Conso. élec. du num.
O. VIDAL	ISTerre	DR	n/a	1 & 3	Géologie, Industrie des mat. premières
C. TRUFFERT	Iris Instruments	PDG	n/a	1 & 3	Géophysique, Analyse environnementale
H. BREA SOLIS	Univ Lille, LEM	MCF	n/a	1 & 2	Économétrie, Gestion stratégique
S. CERF	Inria Grenoble	ISFP	n/a	Tous	Théorie du contrôle, Logiciels répartis

p. m. = personne/mois

Changements réalisés entre la pré-proposition et la proposition complète

- Focalisation plus importante sur les phases amont du projet : production d'indicateurs d'évolution du système productif numérique, et calcul des impacts environnementaux liés à l'extraction minière.
- En conséquence, moindre importance de la proposition d'un système productif numérique sobre et de son évaluation, et moindre importance du volet économique préalablement mis en avant.
- Modification marginale des intitulés des lots de travail (*Work Packages* ou WP), mais modification de leur contenu et réaffectation des membres du consortium en leur sein.

1 Contexte, positionnement et objectifs de la proposition

Le système productif numérique est notoirement tentaculaire et opaque. En conséquence, ses impacts sur les neuf limites planétaires (voir Figure 1) sont âprement difficiles à apprécier. Pour exemple, l'estimation des émissions de CO₂ (limite planétaire du changement climatique) liées au système productif numérique peut passer du simple au double suivant le périmètre considéré et la méthode de calcul utilisée [3-5]. La difficulté s'accroît quand on cherche à approximer d'autres impacts—comme ceux issus de l'extraction minière—tout aussi critiques pour les autres limites planétaires telles que la ressource en eau, le changement d'affectation des terres ou la pollution chimique. En effet, le système productif numérique est vorace en ressources naturelles que ce soit l'eau ou les minéraux or la consommation de ces derniers a un impact majeur sur l'affectation des terres ou les pollutions du sol et du sous-sol. La première difficulté pour évaluer le volume de ressources minières nécessaires au système productif numérique

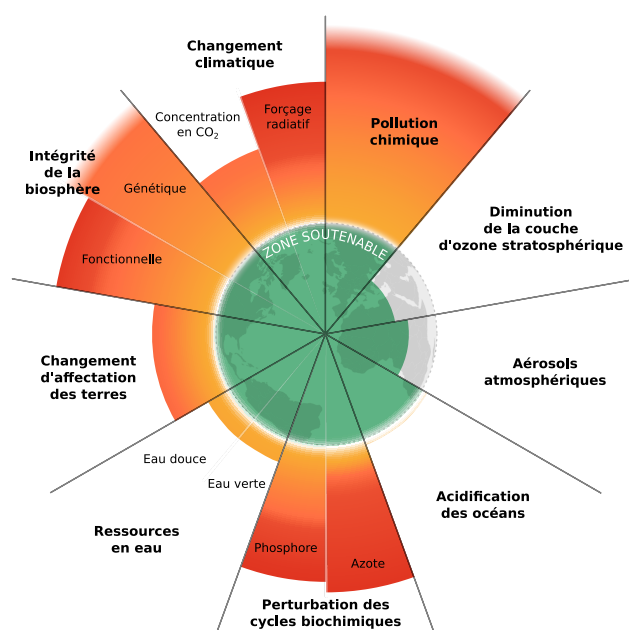


FIGURE 1 – Les neuf limites planétaires [1] et leur niveau de dépassement en 2025 [2]. Source

réside dans le fait que la composition du matériel électronique n'est jamais dévoilée par les acteurs du secteur. Pour contrer cela, les chercheurs ont mené des études scientifiques basées sur l'analyse bibliographique [6-8] mais ont également été contraints de réaliser des analyses chimiques par spectroscopie après broyage des produits finis [9, 10]. La deuxième difficulté est que l'intensité des services, consommateurs d'énergie et donc de ressources minérales, n'est pas connue. Dans d'autres secteurs d'activités, il est possible d'évaluer l'intensité d'un usage par son prix [11]. Mais cela ne peut s'adapter au numérique qui a un modèle économique hétérodoxe—les services les plus efficaces et usités tels que ceux proposés par Google sont « gratuits ». Cette réalité accroît l'opacité du secteur. Au delà de l'intérêt d'évaluer l'impact du système productif numérique sur la consommation des ressources minérales à des fins environnementales, il serait aussi utile d'en anticiper la future demande d'autant qu'il s'agit là d'une ressource finie, principalement d'origine primaire. Plusieurs problèmes entraînent un goulot d'étranglement de l'approvisionnement : le recyclage des minéraux utiles au numérique est structurellement dérisoire [12, 13]; un vicieux conflit d'usage des minéraux existe pour répondre aux ambitions des transitions numérique et énergétique [14, 15]; les pollutions et l'emprise des terres s'accroissent au fur et à mesure que la concentration en minéraux des gisements s'amenuise [11, 16]. **On pressent déjà à ce système une certaine fragilité, issue de l'obscurité de ses dépendances et des nombreuses tensions qui peuvent perturber le bon fonctionnement de sa complexe chaîne de valeur. Il est temps d'investiguer cette boîte noire, d'en analyser les flux et évaluer ses multiples impacts environnementaux, en particulier pour ceux liés à l'exploitation minière.**

1.1 Objectifs & hypothèses de recherche

Notre motivation est d'**inventer un système productif numérique résilient**, capable de s'adapter à l'inflation des usages tout en réduisant son impact socio-environnemental, et d'éclairer les décisions politiques, industrielles et pratiques d'usages. Mais **pour ce faire, il nous faudra analyser le périmètre et le fonctionnement du système**, repérer les actions possibles pour élaborer des scénarios d'évolution, et évaluer sa consommation en ressources minérales et les impacts environnementaux associés.

L'impact carbone comme boussole Depuis le début des années 2000, le calcul méthodique d'impact climatique par « bilan carbone » est passé d'une bonne idée sur le tableau de J.-M. Jancovici [18] à un outil qui permet aujourd'hui d'objectiver l'impact climatique et prioriser les actions de réduction d'émission de gaz à effet de serre (le CO₂ en priorité). Ce travail colossal a permis de définir un cadre normatif en France, en UE [19] et à l'ONU. Ce succès est notamment attribuable à la clarté de la méthode : le « gramme équivalent CO₂ émis dans l'atmosphère » (g. eqCO₂) encapsule bien le potentiel de réchauffement des différents gaz à effet de serre, en une métrique scalaire facilement interprétable. La séparation en 3 périmètres (*scopes* 1, 2 et 3) des impacts d'activités anthropiques permet d'en calculer le « coût chargé » sans risque de double décompte à la généralisation. Enfin, sa méthodologie, même si elle repose sur des hypothèses basiques, est limpide et appropriable : (i) définition du périmètre, (ii) inventaire des flux, (iii) application de facteurs d'émission et (iv) conversion en g. eqCO₂. Conscient que l'identification exhaustive des flux, tout comme dans notre cas, relève du défi insurmontable, J.-M. Jancovici et ses équipes ont opté pour la simplicité. Cette approche a constitué une avancée majeure, permettant une implémentation aisée de la méthode sans compromettre l'ordre de grandeur des résultats.

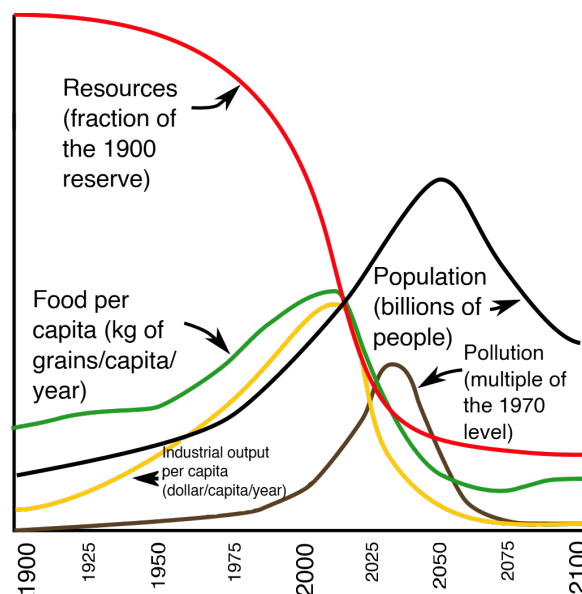


FIGURE 2 – Résultat d'une simulation pessimiste « *business as usual* » du rapport Meadows [17], exemple phare d'usage du modèle systémique Stock and Flow (S&F). Source

L'analyse systémique comme méthode Cette approche s'attache à comprendre la structure globale d'un système en cartographiant les interdépendances, les flux et les boucles de rétroaction qui le façonnent. Son utilisation la plus réputée est sans doute le « rapport Meadows » [17] (voir Fig. 2), qui permet dès 1972, avec peu de données et beaucoup d'hypothèses (décrites [20]), de prévoir les risques sociétaux d'une croissance économique non contrôlée. Le calcul d'impact carbone découle lui aussi de l'analyse systémique, en ce sens qu'il prend en compte l'ensemble des émissions liées à un système et pas uniquement ses effets directs. Dans le cadre du projet INSPIRE, nous comptons adapter cette méthode à l'analyse conjointe de multiples impacts environnementaux du numérique. Appliquée à l'analyse environnementale [11] et au système productif numérique en particulier [21], cette approche présente un double avantage. D'une part, elle permet d'évaluer simultanément plusieurs impacts environnementaux (climatiques, miniers, hydriques) là où le bilan carbone ne renseigne qu'une seule dimension. D'autre part, elle permet d'anticiper les effets indirects que génère toute intervention sur un système aussi interconnecté : des dynamiques structurellement invisibles à une analyse sectorielle classique, mais que l'outillage systémique rend explicites. Il s'agit selon nous d'une condition nécessaire pour éclairer des décisions qui engagent le système sur le long terme.

Les impacts miniers comme horizon Notre ambition est d'investiguer d'autres « limites planétaires » (voir Fig. 1) que l'impact carbone. Nous nous concentrerons sur l'extraction minière en particulier dont dépend non seulement le numérique mais aussi la décarbonation du secteur énergétique [15]. La part de ressources d'origine secondaire, issue du recyclage, demeure minime au regard des besoins gigantesques [12, 13]. Le secteur, s'il ne domine pas la demande minérale globale, demande une pureté [8] et une diversité minérale [14, 22] pour ses infrastructures et leur fonctionnement, qu'il génère des impacts en cascade : affectation des sols, disponibilité de la ressource en eau, pollution chimique, et biodiversité. Nous appellerons « impacts miniers » ces multiples impacts environnementaux qui découlent de l'extraction minière. L'idée de quantifier la pression sur les minéraux n'est pas neuve, en atteste l'*Abiotic Depletion Potential* (ADP, qu'on peut traduire en « potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ») qui fait partie depuis des décennies des facteurs d'impact environnemental étudiés par l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) [23]. L'ACV d'un bien ou service décortique sa chaîne de production pour en quantifier des impacts environnementaux tels que le dérèglement climatique, l'utilisation des sols, l'écotoxicité, ou l'épuisement des ressources (l'ADP). Recommandée par le *Joint Research centre* (JRC) de l'Union Européenne, l'ACV est utilisée e. g. par les agences étatiques française pour leur guide d'écoconception du numérique [24]. Pourtant colossal, ce travail repose malheureusement uniquement sur l'ADP concernant la matérialité des biens et services. Ses auteurs en sont les plus grands critiques [25, 26] : exprimé par la métrique scalaire notoirement obscure qu'est le « gramme équivalent antimoine » (g. eqSb), l'ADP informe uniquement sur la disponibilité de la ressource pour l'exploitation humaine (impliquant un très discuté passage par l'estimation des réserves minérales prouvées), et demande aux autres facteurs d'impact le soin d'encapsuler les impacts miniers (e. g. la pollution des eaux), ce qui est systématiquement oublié. Une méthode trop complexe n'est jamais utilisée en pratique. Nous plaçons donc pour une approche plus systématique et globale de l'estimation des impacts miniers, proche de celle de J.-M. Jancovici pour le carbone. Ainsi, pourrait-on se focaliser en premier lieu sur un minéral qui est reconnu comme critique et fortement immobilisé par le numérique, comme le cuivre. dont la demande en croissance forte et soutenue est attestée pour satisfaire les besoins des transitions numérique (dont l'IA) et énergétique [27]. On parle d'un déficit de 10 millions de tonnes d'ici 2040 [28], malgré le recyclage. Si le cuivre n'est pas le seul minéral nécessaire à l'avenir du numérique, il lui est indispensable et ne semble pas substituable. Tout comme le CO₂ pour l'impact carbone, il peut donc constituer un premier indicateur de choix pour les impacts miniers.

Le numérique comme objet d'étude Parallèlement à la transition énergétique entreprise pour contrer le dérèglement climatique, nos sociétés sont engagées dans une vaste transition numérique. Analyser les impacts miniers de ce domaine mondialement incontournable est crucial pour prévoir la future empreinte environnementale de nos sociétés. De plus, évaluer l'intensité du recours aux ressources minérales du secteur numérique évitera de se retrouver dans une impasse quant à leur approvisionnement. Caractérisé par la complexité et l'opacité de son système productif mondialisé, le numérique a comme spécificité un rythme sans précédent entre innovation et adoption mondiale (e. g. l'IA, mais aussi Uber, Airbnb, Amazon ou même l'e-mail...), l'analyse de l'impact carbone du secteur retourne des résultats parfois contradictoires [3], mais d'une qualité croissante. Le dernier rapport de l'ADEME estime à 4,4 % les émissions de gaz à effet de serre françaises du numérique en 2022 [4], et le taux de croissance de ces émissions à l'échelle mondiale serait de 6 % d'après



FIGURE 3 – Photos satellites de 3 centres de données (en colonne), avant (en haut) et après leur installation (en bas). C’est en examinant les permis de qualité de l’air—publiquement accessibles—délivrés par l’Agence de protection de l’environnement des États-Unis aux entreprises comptant opérer des groupes électrogènes, que les journalistes du *Business Insider* ont pu estimer le nombre (1 210) et la localisation de tous les centres de données opérationnels ou en construction sur leur territoire en 2025 [33].

le Shift Project [5]. La fabrique du numérique étant marquée par une culture du secret industriel, l’analyse de son empreinte matière (intrants chimiques et composition minérale du matériel) avance difficilement. Elle emploie des procédés bigarrés allant de l’analyse de littérature grise [6-8] à la spectroscopie après broyage [9, 10]. Quelques Analyses de Cycle de Vie (ACV) de périphériques numériques existent [29, 30] ; elles constituent une source de première importance, étant issues des constructeurs de matériel, qui disposent de données fiables. Malgré l’assise méthodologique des ACV (normalisée par les ISO 14040 et 14044), leur qualité varie en fonction du périmètre choisi (l’ADP, déjà insuffisant pour l’analyse des impacts miniers, n’est jamais couvert exhaustivement), et de l’impartialité de ses auteurs. La situation aurait de quoi décourager la quête des impacts miniers du numérique, s’il n’y avait le travail de terrain des historiennes et urbanistes françaises [31], et les méthodes florissantes d’investigation détournant des informations en sources ouvertes, dites d’*Open Source Intelligence* (OSInt) [32-34] (cf. Fig. 3) : on apprend par ces sources la taxonomie, la localisation, et les dynamiques de croissance des centres de données, maillon moteur du système productif numérique.

Les leviers d’intervention Le projet INSPIRE ambitionne de dépasser la description, pour proposer au moins des prévisions voire—si le temps et les résultats le permettent—des recommandations à destination des populations et des institutions publiques comme privées. Notre champ disciplinaire principal étant celui de l’informatique, qui plus est nourri d’un solide ancrage dans le tissu associatif du domaine¹, nous pouvons identifier dans l’état de l’art scientifique, technique et social, des innovations dont l’application bousculerait (pour le meilleur ou pour le pire) la trajectoire du numérique—à l’image de leviers qui seraient actionnés par ses acteurs. Sans quitter les rivages de l’analyse systémique, il s’agira ici de formuler des scénarios d’évolution du numérique, qui nourriront l’analyse prospective de ses impacts environnementaux. Une telle approche est mondialement réputée au travers des travaux du GIEC [36], et nationalement *via* l’ADEME et ses 4 scénarios [37], qui donnent à voir le large spectre d’évolutions potentielles que peut recouvrir une analyse prospective.

L’ambition du projet INSPIRE est de proposer un système productif numérique *résilient*, qui soit en mesure de résister durablement à l’inflation des usages et limite les perturbations socio-environnementales. Pour ce faire, une première étape est d’en comprendre le périmètre, les intrants et extrants (**WP1**). Ensuite, l’identification de leviers d’intervention sur le secteur numérique permettra de scénariser des trajectoires d’évolution à ce système productif (**WP2**). Enfin, la modélisation des conséquences économiques et écologiques de telles interventions instruira usages, décisions politiques et industrielles (**WP3**).

1. Le porteur appartient et contribue activement à l’association Deuxfleurs, qui fournit des services web au public, basés sur une infrastructure numérique expérimentale qui se veut sobre, résiliente et conviviale [35].

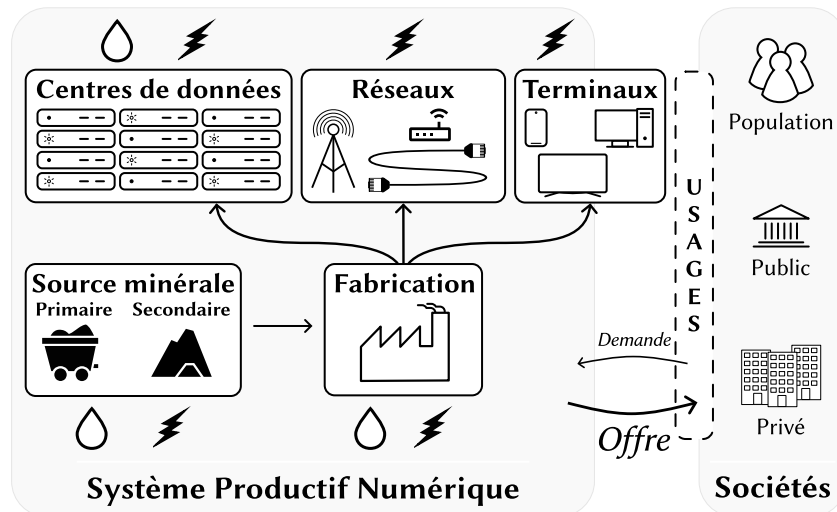


FIGURE 4 – Les constituants du système productif numérique et son interaction avec les sociétés humaines

Motivations & Objectifs

Rentrons dans le vif du sujet en présentant le périmètre du « système productif numérique » dans le cadre d'INSPIRE, en détaillant la figure 4. Le système productif numérique comprend les infrastructures numériques matérielles (*i. e.* le triptyque centres de données, grille réseaux communication et alimentation et terminaux), les usines pour leur fabrication et la matière minérale d'origine primaire et secondaire nécessaire à cette fabrication. Il interagit avec les sociétés humaines via les terminaux, au travers des services dont font usage populations, institutions publiques et privées. Pour fonctionner, ce système consomme une part significative d'eau (pour l'extraction minière, le recyclage, la fabrication des composants, le refroidissement des centre de données...) et d'électricité qui est elle même de plus en plus dépendante des ressources minérales.

L'offre du système numérique vers les sociétés (clientes) est le plus souvent en avance de phase par rapport à la demande, une particularité unique comparé aux autres activité économique. Il s'agit là d'une force de perturbation (*disruption*) qui rend difficile toute modélisation du système. Le cas de l'Intelligence Artificielle (IA) l'illustre parfaitement : son adoption mondiale—poussée par un marketing agressif du secteur [38]—a suivi de quelques mois seulement son lancement, et couvre aujourd'hui la plupart des secteurs d'activités.

Notre problématique principale est : **Comment concevoir un système productif numérique qui soit résilient, en limitant ses externalités environnementales négatives ?** Nous venons de relater l'étendue du chemin à parcourir pour comprendre ledit système productif. Nous dénombrons au moins 3 questions de recherche (RQ ou *Research Questions*) à adresser pour pouvoir prétendre à répondre à la problématique, que nous détaillons ci-après :

Notre ambition étant de concevoir un numérique résilient et

RQ1 Quelle méthode employer pour calculer les « impacts miniers » liés au secteur d'activité numérique ?

Problème La seule métrique d'impact matière existante, l'ADP en équivalent antimoine, n'est pas satisfaisante. Elle n'encapsule que le problème de l'impact d'un bien ou service sur l'épuisement des ressources appropriables par l'Homme, et n'intègre pas les impacts environnementaux découlant de l'activité minière.

Hypothèses

- La méthodologie éprouvée du bilan carbone peut être adaptée à l'estimation des impacts miniers.
- Le volume de cuivre constitue un premier indicateur pertinent de l'intensité matière du numérique : il est connu du public, c'est un conducteur d'électricité universel et il n'est *a priori* pas substituable.

Stratégie Pour calculer l'impact climatique des activités anthropiques, J-M. Jancovici s'est d'abord intéressé en particulier au dioxyde de carbone, avant que la méthode ne puisse être étendue à tous les gaz à effet de serre en estimant leur potentiel respectif de réchauffement global par comparaison. Nous proposons de suivre

une stratégie similaire pour calculer les impacts miniers liés au système productif numérique : en estimer l'intensité en cuivre, avant d'étendre aux autres minéraux impliqués dans sa chaîne de production.

En tant que conducteur d'électricité universel, le cuivre est utilisé en grande proportion dans tout périphérique numérique et il est également utilisé pour alimenter les infrastructures en énergie électrique. La décarbonation du secteur énergétique accroît son utilisation avec l'installation de réseaux décentralisés. Le cuivre est massivement immobilisé et malgré une bonne faculté de recyclage, la part de cuivre d'origine secondaire (issu de la ferraille) est inférieure à la part extraite des mines. Il apparaît raisonnablement certain que ce métal ne sera pas substitué par un autre dans les décennies à venir, tant ses propriétés électriques sont précieuses. Malgré des réserves conséquentes, son approvisionnement pose question du fait de l'intense pression de la demande.

Défis

- Le cuivre pourrait échouer à représenter correctement l'intégralité des impacts miniers du secteur numérique. Certains polluants pourraient par exemple ne pas intervenir dans sa métallurgie, mais apparaître dans d'autres (comme le cyanure, utilisé particulièrement pour la métallurgie de l'or). Dans un tel cas, nous poursuivrions néanmoins nos travaux de manière spécifique au cuivre, tant son importance est cruciale et son approvisionnement incertain.
- Quantifier la demande minérale du secteur numérique de façon exhaustive peut paraître impossible tant sont manquantes les données primaires. Ce défi majeur donne lieu à notre deuxième question de recherche :

RQ2 *Comment estimer les impacts environnementaux engendrés par l'immobilisation des matières premières dans le système productif numérique ?*

Problème Devant la carence de données primaires (telles que les composants du matériel électronique, le volume de vente des équipements ou le taux de remplacement du matériel), estimer l'intensité matière du numérique semble à première vue compromis.

Hypothèses

- La croissance des réseaux nécessaires au numérique (transmission de données et d'électricité) est corrélée à celle des centres de données,
- Des méthodes détournées permettent d'estimer la croissance des centres de données sur un territoire comme la France (voir Fig 3).
- On peut estimer la diversité des impacts environnementaux issus de la mine à partir du volume de matière première extraite.

Stratégie En première instance, on pourrait être tenté-e de se tourner vers l'estimation de la superstructure des usages et de leur besoin en matériel informatique, mais l'opacité entre infrastructures et services rends rend difficile l'investigation. On postule donc qu'en ce qui concerne l'étude de la matérialité du numérique, il est préférable d'en étudier les infrastructures matérielles. Or, les derniers résultats académiques [6, 8] et journalistiques [32, 34] laissent à penser qu'une approche détournée permettrait d'obtenir quelques informations sur l'empreinte matière du numérique. Il s'agit de l'OSInt (pour *Open-Source Intelligence*), qui fut récemment utilisée par *Business Insider* pour dénombrer les centres de données construits ou en construction aux États-Unis [33] (voir Fig. 3). L'approche proposée est donc de créer une base de données documentant la croissance de l'infrastructure du numérique, en particulier les centres de données, par des moyens détournés (ou *proxies*).

Défis

- L'acquisition de données sur la matérialité du numérique en passant par des métriques *proxy* demande de trouver des corrélations entre des informations disparates. Pour ce faire, il faut une bonne connaissance des systèmes étudiés.
- La précision des données produites sera toujours critiquable, mais ne doit pas heurter la validité des résultats qui en dépendent. En ce sens, on préconise l'ouverture maximale des hypothèses et méthodes d'acquisition et de conversion, afin de pouvoir itérer face à la critique, qui sera alors bienvenue.

RQ3 *Comment dériver des trajectoires environnementales du numérique dans sa globalité à partir de leviers d'intervention sur son système productif ?*

Problème Le système productif numérique est engagé dans une trajectoire d'expansion dont les impacts environnementaux agrégés restent largement imprévisibles. Les interventions sur ce système (réglementaires, industrielles, comportementales) produisent des effets indirects qui se propagent bien au-delà de leur périmètre d'application [39]. Taxer les émissions carbone du numérique, optimiser l'efficacité des puces, ou modifier les usages des populations ne sont pas des actions isolées : elles s'insèrent dans un système d'interdépendances où chaque levier en active d'autres, parfois dans des directions contraires à l'effet recherché [40, 41]. Dériver des trajectoires environnementales cohérentes à partir de ces interventions suppose donc de disposer d'un cadre capable de représenter simultanément la diversité des leviers et la complexité de leurs interactions [42].

Hypothèses

- Les trajectoires environnementales du numérique sont davantage déterminées par la structure des interdépendances entre leviers que par l'intensité de chaque levier pris isolément [43].
- Cette structure est suffisamment stable pour être modélisée, et les scénarios prospectifs qui en découlent constituent une base opérationnelle pour éclairer les décisions publiques et industrielles [17, 44].

Stratégie Trois types de leviers structurent l'espace des interventions possibles : économiques, techniques et sociaux, selon qu'ils émanent d'acteurs industriels, réglementaires ou des populations. Les différents leviers n'agissent aux mêmes niveaux : une optimisation industrielle et une taxe carbone n'opèrent pas à la même échelle ni sur les mêmes temporalités, mais toutes deux modifient la demande en ressources du système [45]. Des scénarios seront construits en faisant varier l'activation et l'intensité de différentes combinaisons de ces leviers. Les trajectoires de référence existantes (ADEME, GIEC, RTE) ancreront les hypothèses quantitatives dans des projections reconnues. La modélisation S&F permettra ensuite de simuler les conséquences environnementales de chaque scénario et d'identifier les configurations les plus résilientes face aux effets rebond [11, 42].

Défis

- L'avenir pourrait ne pas ressembler aux prévisions. L'objectif de l'analyse prospective n'est pas de prédire l'avenir, mais de quantifier les conséquences d'évolutions probables d'un système. Nos trajectoires matérialiseront ainsi toujours un spectre des futurs possibles, qui servira à éclairer les décisions à venir.
- Représenter et prévoir les effets indirects reste aujourd'hui un défi en prospective (*e.g.* il est peu probable qu'une quelconque prospective aurait pu prévoir l'ampleur du développement de l'IA) [40, 46]. Ici aussi, la méthode l'emporte sur le résultat, puisque dessiner les contours des évolutions futures reste pertinent, quand bien même certaines interventions resteraient inappréciables à leur juste impact.

De ces questions nous identifions pour le projet INSPIRE trois objectifs à atteindre :

Objectif 1 : Participer à l'effort d'investigation des intrants, extrants et impacts environnementaux du système productif numérique (son matériel, ses procédés et ses services), en particulier les impacts miniers (**WP1**).

Objectif 2 : Instruire les travaux de prospective de scénarios crédibles pour le numérique, issus de leviers d'intervention concrets et actionnables issus de la bibliographie, de la veille technique et sociale (**WP2**).

Objectif 3 : Proposer un outil de visualisation prédictive des impacts environnementaux du système productif numérique, capable de prédire les conséquences d'interventions sur ce dernier, à des fins d'InSPIRation à l'idéation et d'aide à la décision stratégique (**WP3**).

Résultats attendus

Méthodologie et base de données d'estimation de l'évolution de l'empreinte matière numérique et de ses impacts miniers Suivant les objectifs 1 & 2, nous répondrons aux RQ1 & RQ2 en proposant une méthodologie : (i) d'estimation de l'évolution de l'empreinte matière du numérique (typiquement, en nombre de centres de données, quantité et typologie des serveurs, apport électrique...); (ii) de calcul des impacts miniers à partir des indicateurs précédents. Nous constituerons (*via* ladite méthodologie) une base de données montrant l'évolution du numérique sur un territoire (la France), et ses impacts environnementaux liés à la mine.

Leviers d'intervention du secteur numérique, scénarisés en trajectoires prospectives En accord avec l'objectif 3, et pour proposer une réponse à la RQ3, nous nourrirons les scénarios prospectifs existants d'une analyse plus fine des dynamiques du numérique. Par l'étude des dernières propositions à la fois académiques, techniques et citoyennes, nous produirons une liste de leviers actionnables pour infléchir la dynamique du numérique (pour le meilleur comme pour le pire). Ces leviers nourriront la proposition de scénarios d'évolution du système productif numérique, dont l'importance qui est couramment sous-représenté dans les travaux prospectifs [37].

Simulateur prospectif des impacts environnementaux du numérique En réponse à l'objectif 3 et à la RQ3, nous proposons de produire un logiciel d'analyse des impacts environnementaux du numérique basés sur les scénarios sus-cités, qui puisse représenter l'évolution des impacts miniers du numérique en fonction des trajectoires qu'on lui demande de dérouler. Imaginé comme un commun logiciel, ce simulateur se veut évolutif et appropriable à l'issue du projet par d'autres acteurs, souhaitant estimer l'impact futur d'interventions qu'ils se proposent de mettre en œuvre.

1.2 Positionnement par rapport à l'état de l'art

L'analyse environnementale du numérique

Nous observons que malgré des débuts houleux [3], l'analyse *climatique* du numérique finit par produire des résultats qui sont admis par la communauté scientifique au sens large : 4,4 % d'émissions de gaz à effet de serre françaises seraient dues au numérique en 2022 [4], et le taux de croissance de ces émissions à l'échelle mondiale serait de 6 % [5].

Quelques ACV [29, 30] existent quant aux impacts matières. On dénombre aussi des approches par l'économétrie et ses analyses de flux d'entrée-sortie [47]. Des études bibliographiques s'intéressent aux composés d'un supercalculateur [6] ou aux intrants du système productif [8]. Enfin, les données les plus précises dépendent du broyage des composants [9, 10].

On observe donc le coût de la carence de données, qui rend difficile l'établissement d'une norme admise pour l'étude des impacts matière du numérique. C'est pourtant un début primordial, puisqu'on apprend par exemple que 23 tonnes de cuivre se trouvent dans le supercalculateur Frontier [6], ce qui nous pousse à vouloir nous intéresser en particulier à ce minéral pour proposer une analyse des impacts miniers.

Systemique, prospective, visualisation

Fondements de la pensée systémique La pensée systémique trouve ses fondements formels dans les travaux de [48], qui introduit la dynamique des systèmes comme cadre de modélisation des interactions entre stocks, flux et boucles de rétroaction. Cette approche est consolidée et rendue accessible par [43], dont l'ouvrage constitue aujourd'hui la référence pédagogique de référence, tandis que [42] en fournit la formalisation opérationnelle pour la modélisation et la simulation. Ces approches quantitatives sont complétées par des perspectives qualitatives : [49] propose la Soft Systems Methodology (SSM) pour traiter des systèmes socialement construits et mal définis, tandis que [50] ancre la pensée systémique dans les organisations et introduit le concept d'archétypes (des patrons de boucles de rétroaction récurrents produisant des comportements caractéristiques).

Méthodes systémiques Les Causal Loop Diagram (CLD) et les modèles S&F constituent les deux principaux outils opérationnels de la dynamique des systèmes. Les CLD permettent de représenter qualitativement les boucles de rétroaction d'un système et constituent un outil privilégié pour l'exploration collective des dynamiques causales [21]. Les modèles S&F prolongent cette représentation en la quantifiant : ils permettent de simuler l'évolution temporelle des ressources et des flux, et trouvent notamment une application directe dans l'analyse des flux de matières [11]. Si des approches alternatives, et potentiellement complémentaires, comme la modélisation à base d'agents [51] capturent plus explicitement l'hétérogénéité individuelle, la dynamique des systèmes offre un cadre plus adapté à l'analyse des structures de rétroaction et des flux agrégés.

Ces deux outils ne s'excluent pas : dans la pratique, les CLD servent souvent de phase exploratoire et participative avant la formalisation quantitative en S&F [42]. Cette complémentarité est particulièrement pertinente dans les contextes environnementaux et de gestion des ressources, où la complexité des inter-

dépendances rend nécessaire à la fois une lecture qualitative des dynamiques systémiques et une modélisation quantitative des flux [17]. Lorsque la construction du modèle implique des parties prenantes, l'approche dite de Group Model Building (GMB) [52] offre un cadre méthodologique rigoureux pour articuler ces deux dimensions, en faisant du modèle un objet de débat.

Prospective et scénarios La prospective constitue un cadre méthodologique complémentaire à la dynamique des systèmes, en ce qu'elle mobilise explicitement la modélisation pour explorer des futurs possibles et éclairer la prise de décision dans des contextes d'incertitude. Ses fondements méthodologiques sont posés par [44], qui formalise la construction de scénarios comme un processus structuré articulant analyse systémique et exploration qualitative des futurs.

L'articulation entre prospective qualitative et modélisation quantitative trouve une illustration dans les travaux de [17], qui combinent construction de scénarios et simulation S&F pour explorer les limites biophysiques de la croissance à l'échelle planétaire. Cette combinaison reste aujourd'hui une référence structurante pour les travaux de prospective environnementale et de gestion des ressources.

Visualisation La visualisation constitue une dimension à part entière de la pratique systémique. Les travaux fondateurs de [53] en visualisation de l'information posent les bases d'une réflexion sur la conception d'interfaces permettant d'explorer des données complexes de façon interactive, principes directement applicables à la représentation de modèles systémiques. Dans le champ du HCI et du design durable, [54] propose une articulation explicite entre pensée systémique et pratiques de design, soulignant le rôle des artefacts visuels comme médiateurs entre modélisation et prise de décision. La question de la visualisation dépasse cependant la seule lisibilité graphique : représenter un CLD ou un modèle S&F sous forme d'interface interactive ou d'infographie, c'est aussi faire des choix sur ce qui est rendu visible, agrégé ou simplifié. Ces choix orientent l'interprétation et, in fine, la décision.

Comprendre et anticiper les effets indirects

Fondements et taxonomie Le paradoxe de Jevons [55] constitue le point de départ historique de la notion d'effet rebond : l'amélioration de l'efficacité d'une technologie tend à augmenter sa consommation globale plutôt qu'à la réduire, en raison de l'accroissement de la demande qu'elle induit. Cette intuition est formalisée par [40], qui distingue trois niveaux : l'effet rebond direct (augmentation de l'usage du service rendu plus efficace), indirect (report des économies vers d'autres consommations), et macroéconomique (effets sur l'ensemble de l'économie). [41] montrent empiriquement que ces mécanismes sont suffisamment puissants pour annuler les gains de dématérialisation, y compris dans les secteurs à forte progression technique comme les Information and Communication Technologies (ICT).

Extensions à l'effet d'induction La notion d'effet rebond ne capture cependant qu'une partie des dynamiques en jeu. [39] proposent d'y adjoindre celle d'*effet d'induction* : au-delà de l'augmentation des usages existants, les nouvelles technologies numériques créent des usages entièrement nouveaux, générant une demande en énergie et en ressources qui n'existait pas auparavant. Cette distinction est centrale pour comprendre pourquoi les gains d'efficacité du numérique ne se traduisent pas en réductions d'impact environnemental. [45] confirme cette dynamique à travers une revue systématique des effets de l'adoption des ICT sur les modes de vie : si certains usages comme le télétravail réduisent les émissions à court terme, ils tendent à induire des pratiques plus carbonées à long terme.

Cadre analytique La diversité de ces mécanismes rend nécessaire un cadre analytique structuré pour les identifier et les distinguer. [46] proposent une telle grille à partir du secteur agricole, en distinguant les adaptations comportementales des producteurs et des consommateurs face aux gains d'efficacité. Bien que développé dans un contexte différent, ce cadre est transférable à l'analyse des effets rebond dans le numérique.

Vers une modélisation systémique des effets rebond L'effet rebond est structurellement un phénomène de boucle de rétroaction : une amélioration d'efficacité modifie les comportements, qui modifient à leur tour la consommation, annulant partiellement ou totalement le gain initial. Cette structure correspond aux archétypes *Fixes that fail* et *Shifting the burden* décrits entre autres par [43]. Or, la littérature existante traite majoritairement les effets rebond de façon rétrospective et sectorielle, sans outillage permettant de les anticiper avant le déploiement d'une technologie. Les travaux présentés ici comblent partiellement ce manque

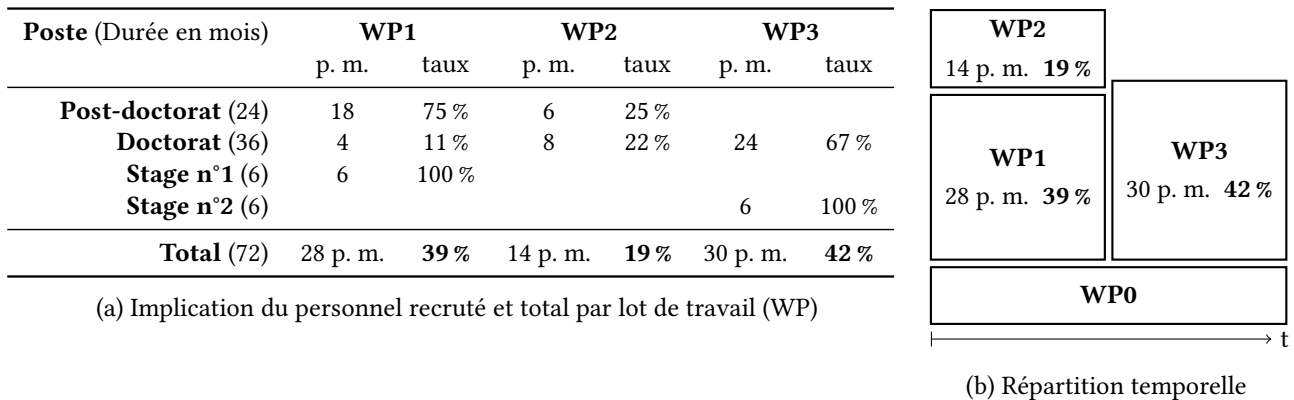


FIGURE 5 – Organisation et implication du personnel dans les WP en personne-mois (p. m.) et en taux (%)

en mobilisant les CLD et les modèles S&F pour représenter explicitement les boucles causales à l'origine des effets rebond et d'induction dans le numérique. Cette modélisation permet d'identifier en amont les points de levier où une intervention peut limiter les effets non intentionnels, et de construire des scénarios prospectifs [44] explorant différentes trajectoires d'usage sous contrainte de sobriété. Enfin, la traduction de ces modèles sous forme de visualisations accessibles aux décideurs [53, 54] vise à rendre ces dynamiques intelligibles pour des acteurs non-experts, condition nécessaire à leur prise en compte dans les processus de décision.

1.3 Méthodologie & gestion des risques

Afin de répondre à la question de recherche « Comment concevoir un système productif du numérique résilient ? », nous mobiliserons plusieurs disciplines scientifiques (systémique, géologie, économie, sciences de l'environnement et informatique), comme en atteste l'interdisciplinarité du consortium. D'une durée de 4 ans, le projet INSPIRE requerra l'**embauche d'un post-doctorat, d'un doctorat et de deux stages**. Ce personnel sera encadré en partie par le porteur, avec la participation des membres du projet au gré des tâches en cours.

Notre travail s'organisera en 4 lots de travail (*Work Packages* ou WP), dont la répartition est illustrée Fig. 5. Le premier **WP0** consistera en la coordination et la dissémination des résultats du projet, tandis que les WP 1 à 3 porteront sur la recherche à proprement parler : le **WP1** d'une durée de 2 ans, s'attachera dès le début du projet à modéliser le système productif numérique en produisant des données sur la croissance du domaine (en particulier les centres de données) et en adaptant la méthodologie du bilan carbone pour le calcul des « impacts miniers » (en particulier le cas du cuivre); le **WP2** lui aussi d'une durée de 2 ans, démarrera parallèlement dès le début du projet, et consistera à produire des scénarios d'évolution du système productif numérique en se basant sur des leviers d'intervention qui seront identifiés par analyse de la bibliographie « grise »; le **WP3** enfin, durera la totalité des 2 dernières années, et consistera à produire une analyse prospective des impacts environnementaux du numérique (grâce aux données et modèles du **WP1**) selon les scénarios produits au **WP2**.

WP0 Coordination et dissémination

M1 à M48 – 4 ans

Tout au long du projet, le **WP0** consistera à piloter et coordonner l'ensemble des parties prenantes pour garantir la mise en œuvre du plan de travail, tout en s'adaptant aux aléas scientifiques et contraintes administratives.

Tâche 0.1 : Coordination du projet Le coordinateur est chargé des recrutements ainsi que de l'animation du collectif de travail. Il s'assurera de l'articulation des compétences et du respect du calendrier. Outre les **réunions plénières bi-annuelles** dédiées à la communication des dernières avancées et au renforcement des liens de l'équipe, des points réguliers seront tenus tout au long de la vie du projet pour répondre aux besoins d'expertise scientifique et de transversalité.

T0.2 : Dissémination des travaux Au moins à chaque livrable des lots de travail disciplinaires ci-dessous, une communication interne et externe sera entreprise pour que le consortium, la communauté scientifique, technique, et le public soient informés des avancées du projet INSPIRE. Pour ce faire, sera mise en place une stratégie de publication lors du lancement du projet : on veillera notamment à assurer la **diffusion en archive ouverte de toute base de données et publication** émanant d'INSPIRE. Est notamment proposée la **création d'un site internet** (sous l'égide de Deuxfleurs) qui permettra au large public de se tenir informé des dernières découvertes du projet, et de donner à tous les membres du consortium l'objectif éditorial commun de raconter l'histoire de l'analyse environnementale du numérique.

Partenariat

- **A. LUXEY-BITRI** sera en charge de la coordination administrative (au travers d'Inria), stratégique et de l'animation du projet INSPIRE. Il dédiera au total 2 mois (ou 8 % de son temps de recherche total) à ce lot de travail.
- **Tous les membres** du projet contribueront à l'encadrement du personnel, à produire des publications d'avancement, et au planning stratégique.
- **Deuxfleurs** assurera l'hébergement du site du projet, incluant un travail épisodique de ses bénévoles.

Gestion des risques

- *Risque faible* : Le principal défi organisationnel d'INSPIRE concerne le **recrutement du personnel**, étant donné les profils interdisciplinaires recherchés. Concernant le post-doctorat devant débuter dès le début du projet, plusieurs candidats sont d'ores et déjà identifiés, notamment issus des communautés scientifiques Green Days (France) et ICT4S (international). Le doctorat et les stagiaires pourront être issus du même vivier ou de l'Université de Lille, où l'appétence pour les questions environnementales et l'interdisciplinarité manifeste s'observe par la vitalité de l'Institut des Transitions Environnementales et Sociales (ITES) local d'une part, et par l'expérience du porteur en enseignement des enjeux environnementaux du numérique. En dernière instance, le doctorat pourrait être redéfini en post-doctorat, au vu de la quantité et de la qualité des nouveaux docteurs spécialistes du sujet.
- *Risque faible* : Le second risque organisationnel concerne l'**animation du projet**, qui pourrait être gênée par les obligations et la disponibilité des différents membres du projet. Ce risque est mitigé d'une part par l'existence d'un pôle lillois conséquent et moteur, et d'autre part par la variété des disciplines représentées dans le consortium INSPIRE.

WP1 Modélisation du système productif du numérique

M1 à M24 – 2 ans – 28 p. m. – 39 %

Ce premier lot de travail consistera à élaborer un modèle du système productif numérique pour en estimer les impacts environnementaux de façon paramétrique : à un ensemble d'indicateurs attachés à la chaîne de valeur du numérique devra correspondre un ensemble d'indicateurs d'impact environnemental. La première tâche **T1.1** consistera à **proposer une méthodologie d'évaluation de l'impact environnemental** du système productif numérique, ce qui permettra d'en circonscrire l'étude selon plusieurs dimensions : à quel sous-ensemble du système productif restreindre l'analyse, en utilisant (ou produisant) quels indicateurs pour le décrire, et en évaluant quels impacts environnementaux ? La deuxième tâche **T1.2** s'attachera à **obtenir ou produire des indicateurs représentant la chaîne de valeur du numérique**, e. g. flux de production du matériel, rythme de fabrication des centres de données... Enfin, la tâche **T1.3** consistera à **calculer un ensemble de métriques d'impact environnemental**, pour un système productif donné, représenté par les indicateurs sélectionnés dans la tâche précédente.

Interviendront pour ce lot de travail : le **post-doctorat** (75 % de son temps) recruté dès le 1^{er} mois (M1), le **stage n°1** (100 %) recruté au printemps 2027 (M8), et le **doctorat** (11 %) recruté en 2^e année (M13).

T1.1 : Méthodologie d'évaluation de l'impact environnemental Cette première tâche portera la lourde mission de **circonscrire l'étude** du système productif numérique qui sera réalisée par le projet INSPIRE. En effet, la proposition d'une méthodologie d'évaluation crédible nécessite de répondre à deux questions, pour lesquelles nous disposons déjà de pistes :

- (i) *Quels indicateurs d'évolution de ce système sont estimables avec les informations disponibles ?*

La méthodologie OSInt—l’investigation de données publiques *proxies* pour mener indirectement une enquête—a démontré sa capacité à dénombrer et localiser les centres de données états-uniens (cf. Fig 3). Il semble en effet pertinent de chercher à **mesurer l’évolution et l’intensité matière des centres de données**, qui représentent l’infrastructure des services numériques les plus utilisés, et dont l’empreinte carbone domine presque celle du secteur [4]. D’une part le comptage des infrastructures est plus facile que de quantifier les services numériques, et d’autre part les infrastructures installées et celles projetées présentent des usages de demain—ce qui est cohérent avec notre ambition prospective. Le territoire d’étude pour ce consortium est **la France**, notamment métropolitaine, pour laquelle il existe déjà des cartes de centres de données, mais qui s’avèrent sujettes à caution et lacunaires en informations matérielles (demande électrique, quantité et types de serveurs, taux de renouvellement...).

(ii) *Quelles métriques d’impact environnemental sont calculables à partir de ces indicateurs ?*

Les multiples impacts environnementaux liés à l’extraction minière croissent rapidement, mais restent connus de la profession. Il s’agit en premier lieu de l’affectation des terres, de la disponibilité de la ressource en eau, de la pollution chimique et de l’intégrité de la biosphère. Les experts géoscientifiques du consortium nous encourage à focaliser notre étude en premier lieu sur la **chaîne d’approvisionnement du cuivre**, car il domine en proportion tous les autres minéraux dans les derniers équipements électroniques analysés [10], il n’est pas substituable par une autre substance et il est en conflit d’usage avec d’autres secteurs (énergétique notamment). De plus, les impacts environnementaux liés à l’extraction du cuivre sont croissants du fait d’une diminution drastique de sa concentration (grade) et de l’approfondissement des gisements dans les nouveaux gisements découverts [56]. Il faut alors mobiliser beaucoup plus de terre pour extraire la même quantité de minéral ce qui conduit à une emprise du foncier plus importante et un impact sur les eaux (souterraines et de surface) plus grands. Notons l’existence d’autres minéraux candidats, dont le tantale, un des rares métaux à être utilisé principalement par le secteur électronique. Dans tous les cas, nous pourrions implémenter d’autres substances (minéraux critiques) dans notre modèle.

Nous produirons finalement le livrable **L1.1 : une méthodologie claire et précise pour estimer l’évolution du numérique et calculer certains de ses impacts environnementaux**.

T1.2 : Estimation de l’intensité matière Cette tâche consistera en la mise en œuvre du premier volet de la méthodologie du **L1.1**. Il s’agira d’abord de compiler des données publiquement accessibles dont on aura identifié qu’elles décrivent l’évolution du système productif numérique. Des indicateurs seront ensuite calculés à partir de ces données, pour évaluer l’intensité matière du numérique sur un territoire. Ce travail, bien que procédural, s’avérera chronophage et requerra rigueur et documentation.

Nous produirons le livrable **L1.2 : base de données de l’intensité matière du numérique**, qui devrait en toute hypothèse porter sur **les centres de données en France**, et plus précisément sur **la quantité, le type, et le taux de renouvellement des serveurs informatiques**. Les livrables **L1.1** et **L1.2** seront publiés ensemble sous forme d’article scientifique à destination de la communauté internationale en sciences de l’environnement et/ou de l’informatique. Nous communiquerons aussi ces résultats sous forme de billet de blog sur le site du projet.

T1.3 : Calcul des impacts miniers Il s’agira pour cette tâche d’utiliser la méthodologie du livrable **L1.1** et la base de données produite au **L1.2** pour calculer les impacts environnementaux liés à l’extraction minière du système productif numérique. Que la tâche **T1.1** valide la focalisation sur le cuivre ou décide d’inclure d’autres minéraux, nous devons nous attacher à la chaîne de production du minéral : de l’extraction aux procédés métallurgiques pour sa séparation, afin de proposer une méthode de calcul des impacts environnementaux multivariés (affectation des terres, disponibilité de la ressource en eau, pollution chimique, biodiversité...) par unité de minéral produit pour le numérique. L’extraction demeure la plus impactante au premier ordre comparée aux procédés métallurgiques de séparation mais nous pourrions en tenir compte. L’objectif est de produire une formule (et ses hypothèses) pour calculer par exemple « km² artificialisés par serveur de tel type ».

La tâche donnera lieu au livrable **L1.3 : méthode de calcul d’impacts environnementaux par unité**

de matériel informatique, qui devra particulièrement veiller à expliciter ses hypothèses simplificatrices afin d'en permettre l'adoption, la critique et le dépassement. Nous chercherons ici aussi à publier le **L1.3** en tant qu'article scientifique, soit dans les sciences de l'environnement, soit en géosciences, suivant la qualité géoscientifique du travail produit. Ici aussi, nous relaterons nos recherches sous forme de billet de blog sur le site internet d'INSPIRE.

Partenariat

- L'équipe d'informatique lilloise constituée d'**A. LUXEY-BITRI**, **C. QUINTON** et **R. ROUYOY** assureront l'encadrement du personnel, et participeront tout particulièrement aux tâches **T1.1** et **T1.2**, s'agissant de circonscrire l'étude à des indicateurs pertinents pour estimer l'évolution du système productif numérique, en prenant appui sur des métriques techniques dont il faudra détourner l'usage.
- **H. BREA-SOLIS**, expert en économétrie, contribuera à l'élaboration de la méthodologie en tâche **T1.1**, qui se basera au moins en partie sur des données de flux économiques et de matière (typiquement issus de l'analyse d'entrées-sorties [47]).
- Les spécialistes en géosciences **O. VIDAL** et **C. TRUFFERT** seront particulièrement impliqués durant la tâche **T1.3**, du fait de leur expertise irremplaçable sur les méthodes d'extraction et l'approvisionnement en minéraux. Ils porteront tout particulièrement attention à la validité de la méthode et à l'explication de nos hypothèses.

Gestion des risques

- *Risque important* : Suivant la qualité des données *proxy* et de leur conversion en indicateurs d'évolution du système numérique, **la tâche T1.1 pourrait nécessiter plus de temps que prévu**, auquel cas le post-doctorat y consacrerait plus de son temps, au détriment du **WP2** qui pourrait être assumé entièrement par le doctorat et les membres permanents du consortium. En effet, **l'acquisition de données de bonne qualité sur l'évolution du numérique est l'impératif n°1 d'INSPIRE**.
- *Risque modéré* : Le calcul d'impacts environnementaux liés à l'extraction d'un minéral (**T1.3**) s'appuiera sur la littérature scientifique et des rapports publiés par des ONG. Ce corpus peut s'avérer peu exhaustif, néanmoins, ce critère n'est pas bloquant pour l'avancée du projet. D'autre part, la collaboration avec la communauté géoscientifique permettra d'itérer et d'améliorer le modèle au fil du gain des connaissances accessibles.

WP2 Scénariser les évolutions du numérique

M1 à M24 – 2 ans – 14 p. m. – 19 %

Parallèlement au **WP1**, ce lot proposera des scénarios d'évolution du secteur numérique, qui seront ensuite utilisés au **WP3**. Ces scénarios seront basés sur des interventions anthropiques (techniques, réglementaires ou comportementales) identifiées à partir de sources bibliographiques « blanches et grises » : académiques, techniques et citoyennes. Pour donner des exemples de leviers, on pense au fait d'héberger des sites web sur des ordinateurs reconditionnés à domicile [35], à l'optimisation de la consommation électrique et en eau des centres de données [**sampaper**], mais aussi aux nouveaux processeurs de calcul parallèles énergivores [10]... En plus de nourrir notre propre analyse, l'objectif est de renseigner des approches prospectives par scénarios existantes et réputées, notamment les 4 scénarios bas-carbone de l'ADEME [37], réactualisés début 2026, qui pourraient bénéficier d'un plus solide éclairage sur l'évolution du numérique.

Y interviendront le **post-doctorat** (25%) et le **doctorat** (22%).

T2.1 : Cadrage du périmètre de recherche de leviers d'intervention Une première tâche pour ce WP consistera à spécifier les limites de notre étude bibliographique. On souhaite typiquement catégoriser les différents types d'interventions, mais pour le moment de trop nombreux axes sont pour le moment identifiés : sobriété/intensité technique, échelle micro/meso/macro-scopique, acteur industriel/citoyen/réglementaire, solution technique/économique/sociale...

Un premier livrable sera donc produit, à l'issue d'une concertation préliminaire : **L2.1 : périmètre d'étude bibliographique de leviers d'intervention numérique**. On fera ici tout particulièrement usage du site internet du projet, en publiant un appel à contributions assorti du périmètre **L1.1**, afin d'en appeler au large public : il est en effet parfois difficile de trouver par ses propres moyens des initiatives locales qui ne manquent

pourtant pas d'avenir.

T 2.2 : Veille bibliographique La deuxième tâche de ce WP consistera à collecter parmi la bibliographie blanche et grise toute proposition d'intervention sur le système productif numérique qui rentre dans le cadre du **L2.1**. Nous espérons avoir ici de nombreuses suggestions issues du public à trier à l'issue de notre appel à contributions.

Ces références constitueront le livrable intermédiaire **L2.2 : compilation bibliographique de propositions d'intervention**, organisées par exemple par intensité technique, rapidité de mise en œuvre, intensité environnementale etc.

T 2.3 : Élaboration de scénarios prospectifs Ces propositions dûment triées, nous pourrions nous atteler à la conception de scénarios d'évolution pour le secteur numérique, appuyées par l'état de l'art et les dernières propositions issues d'un large panel d'acteurs. Pour être appropriables par un large public, ces scénarios devront être organisés selon un petit nombre de trajectoires sociétales bien explicitées, comme le sont les scénarios de l'ADEME [37] (qui vont du plus frugal au plus technologique) ou ceux du GIEC [36]. S'il serait préférable d'insérer nos scénarios directement dans de telles études prospectives, il n'est pas certain qu'elles soient pertinentes concernant l'évolution du numérique, qui reste une zone d'ombre des travaux existants. Nous avons néanmoins à cœur de lier les scénarios à leur degré d'adaptation aux impératifs environnementaux.

À l'issue de cette tâche, nous produirons un dernier livrable **L2.3 : scénarios d'évolution du système productif numérique**, que nous comptons publier à la fois dans une revue scientifique informatique ou d'analyse environnementale, et sous forme de fiches pratiques, à destination de la communauté informatique. Comme à notre habitude, nous partagerons nos avancées sur le blog du projet.

Partenariat

- **A. LUXEY-BITRI, C. QUINTON et R. ROUVOY**, de l'équipe Spirals d'Inria Lille, participeront majoritairement à ce WP en tant qu'experts en informatique, et assisteront le post-doctorat et le doctorat dans la réalisation des différents livrables.
- **S. CERF** contribuera aussi en tant qu'experte en informatique et en étude des systèmes, par ses connaissances de l'état de l'art en analyse prospective.
- **H. BREA-SOLIS**, en tant qu'expert en économie, proposera et s'assurera de la crédibilité économique et sociale des classifications de leviers, et des scénarios afférents.

Gestion des risques

- *Risque faible* : **L'étude bibliographique (T2.2) pourrait avoir des difficultés à converger vers des scénarios** si le livrable **L2.1** n'a pas réussi à fournir un cap suffisamment clair. Auquel cas, nous contacterions nos collègues de l'ADEME, qui ont déjà produit ce type d'analyse et devraient être à même de faciliter la production de résultats en partant d'un vaste objectif.

WP3 Analyse prospective du système productif numérique *M25 à M48 – 2 ans – 30 p. m. – 42 %*

Ce dernier lot de travail débutera deux ans après le début du projet (M25), à l'issue du **WP1** (qui aura fourni une base de données des impacts miniers liés à la fabrique du numérique) et du **WP2** (qui aura établi plusieurs scénarios d'évolution du système productif numérique), et s'étirera sur les deux dernières années du projet. Il s'agira ici de proposer un outil de visualisation prédictive des impacts environnementaux du numérique, en fonction des leviers d'intervention actionnés. En recourant à des outils systémiques, un enjeu majeur est de rendre apparents les effets non-linéaires qui caractérisent les systèmes complexes (typiquement visibles dans les courbes du rapport Meadows représentées en Fig. 2).

Le livrable final du projet INSPIRE sera donc un simulateur paramétrable d'impacts du numérique, avec lequel on puisse « jouer » pour sentir et comprendre les conséquences de choix techniques, réglementaires ou comportementaux qui pourraient par ailleurs sembler anodins. Nous veillerons à rendre ce simulateur appropriable par la communauté scientifique et le plus large public, en assurant sa clarté (fonctionnement,

documentation et code), son évolutivité, et en le publiant intégralement sous licence libre. Parallèlement, nous comptons publier nos résultats dans des revues et conférences scientifiques non seulement en informatique, mais aussi et surtout dans les disciplines de nos collaborateurs externes, afin de maximiser la portée des résultats de INSPIRE, et la prise de conscience des diverses disciplines de l'importance de ce sujet transdisciplinaire.

Sont concernés par ce WP le **doctorat** (67 %) dont ce lot de travail sera la principale contribution après avoir démarré au M13 sur le **WP2**, ainsi que le **stage n°2** (100 %) qui sera recruté au printemps de la troisième année (M32) pour assister le doctorat dans la réalisation du simulateur. Les **ingénieur-es** d'Inria Lille seront mis à contribution s'agissant de l'hébergement du projet logiciel.

T 3.1 : Développement d'un simulateur prédictif des impacts du numérique La première tâche du **WP3** consiste à développer le système de simulation des impacts du système productif numérique. Elle prendra surtout appui sur les résultats du **WP1** : utilisation des indicateurs d'estimation de l'évolution du numérique et calcul de leurs impacts miniers. Ce simulateur devra rendre compte des effets dynamiques que l'on observe tout particulièrement dans le secteur numérique : effets rebond et extensions à effets d'induction—ce type de modélisation d'effets indirects reste pourtant encore embryonnaire à l'heure actuelle. La tâche impliquera donc un solide effort bibliographique, de s'inspirer des simulateurs pré-existants (Meadows [17], DyMEMDS par O. VIDAL et al. [57], et GIEC [36] notamment) pour en dépasser les limites, et d'en appeler à l'aide d'experts externes en analyse climatique et systémique pour contribuer et valider nos modèles.

La tâche mènera au livrable **L3.1 : logiciel de simulation prédictive des impacts environnementaux du numérique**. Devant l'ambition du projet logiciel, nous mettrons à contribution l'expertise du porteur en constitution et animation d'une communauté de développement logiciel (Garage, logiciel produit et maintenu par Deuxfleurs, étant mondialement reconnu pour sa valeur et sa vitalité). Pour assurer la validité, la complétude et la pérennité du logiciel, il sera particulièrement pertinent de le constituer sous forme de *commun logiciel* [58], modulaire et évolutif, afin que d'autres initiatives prospectives puissent s'appuyer sur ses fondations. Le site internet du projet revêtira ici toute son importance, puisqu'il servira de vitrine au logiciel, où seront publiés documentation, points réguliers d'avancement, appels à contribution et demandes de retours critiques, sur le modèle du site de Garage.

T 3.2 : Intégration des scénarios dans le simulateur Proportionnellement plus aisée, la deuxième tâche du **WP3** consistera à insérer au sein du simulateur les différents scénarios d'évolution du numérique produits au **WP2**. Cette première application du logiciel permettra d'en éprouver et d'en raffiner le fonctionnement, en s'assurant qu'il est aisé de définir un scénario en son sein. Ce sera l'occasion de parfaire la section « Contribuer » de la documentation, puisqu'un guide devra nécessairement être rédigé pour permettre à notre équipe (et au public) de produire des scénarios à l'envi. Première exécution du simulateur, le *crash test* est toujours d'une grande importance dans le développement logiciel. C'est à ce moment-là que l'on s'aperçoit qu'il est impossible avec la version actuelle de comprendre les résultats obtenus, la mécanique interne, et qu'on découvre évidemment l'existence de bugs ; ce qui ramène invariablement à la table de travail pour au moins une autre version *beta*. C'est un moment important pour susciter l'intérêt de la communauté du développement logiciel : les premières itérations d'un logiciel étant plus faciles à appréhender, et les contributions, souvent durables, plus gratifiantes.

Outre l'animation du collectif de développement logiciel naissant, les 2 livrables de cette tâche seront donc

L3.2.1 : guide de définition d'un scénario prospectif et **L3.2.2 : code logiciel définissant les scénarios prospectifs du WP2**.

T 3.3 : Synthèse de la viabilité environnementale des trajectoires étudiées Une fois créé le simulateur et insérés les scénarios proposés, il ne restera « plus qu'à » le faire tourner. Nous devons ici faire valider en-dehors du logiciel tous les résultats produits, assurer l'explicabilité de tous les graphiques et données générées, et enfin, comparer les différents scénarios en terme des impacts miniers qu'ils généreraient d'après notre analyse prospective. Tout le consortium devra ici être mis à contribution, pour leurs compétences en informatique (développement et théorie), en théorie du contrôle, en économie et en géosciences. Nous ferons par ailleurs appel à des aides externes, en particulier de l'ADEME et de l'ISTerre (qui développe

DyMEMDS [57]), pour valider la cohérence des simulations. Enfin, nous analyserons les résultats obtenus en terme d'impacts environnementaux des scénarios proposés.

Le livrable **L3.3 : comparaison des impacts environnementaux de diverses trajectoires du numérique** constituera l'ultime réalisation d'INSPIRE, et sera publié dans des revues ou conférences disciplinaires des spécialités représentées dans le consortium, ainsi que sur le site internet du projet. Un effort tout particulier sera apporté à la large diffusion des résultats du projets, en contactant représentant-es institutionnel-es et journaux, pour faire connaître nos résultats a

Partenariat

- **A. LUXEY-BITRI, C. QUINTON et R. ROUVOY** de l'équipe Spirals (Lille) assureront le suivi quotidien du doctorat et du stagiaire. Par ailleurs, leur expertise sur le système productif numérique, mais surtout en développement logiciel (s'agissant de constituer une communauté de logiciel libre autour d'un commun numérique), seront particulièrement mises à profit.
- **A. LUXEY-BITRI** fera en particulier appel à l'assistance des bénévoles de Deuxfleurs et à leur réseau, pour constituer et animer le commun numérique naissant, et diffuser les résultats du projet. Leur intérêt pour cette tâche est relativement certaine, la sobriété numérique étant au cœur de leurs préoccupations : cet écosystème technique associatif constituera une première base d'utilisateur-es en demande de validation de la cohérence environnementale de leurs actions.
- **S. CERF** contribuera largement son expertise en théorie du contrôle pour la conception du moteur de simulation. Elle validera aussi rétrospectivement le bon déroulement des simulations, participant à l'élaboration itérative du simulateur.
- **H. BREA-SOLIS** proposera son expertise économétrique à l'analyse des résultats de simulation, pour assurer la cohérence des évolutions du système avec la théorie macroéconomique. Il raffinerait en cas de besoin les scénarios qu'il aura contribué à proposer au **WP2**. Son réseau pourrait être mobilisé pour disposer d'un plus large éventail de critiques, diffuser le logiciel et les résultats du projet.
- **O. VIDAL et C. TRUFFERT**, de la même manière, valideront les observations sur l'empreinte matière et leurs impacts environnementaux afférents, qu'ils auront contribué au **WP1**. Ils partageront nos résultats à leur communauté, dans la même optique de générer intérêt pour la question scientifique, critiques expertes et contribution au logiciel de simulation.

Gestion des risques

- *Risque modéré* : **Incapacité à constituer une communauté pour animer le développement du simulateur sous forme de commun numérique** [58]. Si l'engouement pour notre projet logiciel était moins important que prévu, nous poursuivrions son développement sous l'égide unique de l'équipe Spirals (à la manière des logiciels PowerAPI et AmIUnique), en faisant appel aux ingénieur-es d'Inria et/ou à des financements tiers (e. g. régionaux).
- *Risque faible* : **Dépassement du calendrier pour le développement logiciel**. Similairement, si le logiciel de simulation devait prendre plus de temps que prévu pour être finalisé, nous serions contraints de ne publier que des résultats intermédiaires dans le cadre du projet ANR, et d'en finaliser les synthèses et comparaison par le biais d'un financement additionnel.
- *Risque faible* : **Manque de cohérence ou de validité scientifique aux résultats affichés**. Il est enfin possible que les résultats publiés soient vertement critiqués par la communauté scientifique, décisionnaire ou technique. Ce risque est considéré faible, bien que ses conséquences puissent être fatales, car nous comptons faire évaluer par diverses somités les résultats du simulateur avant sa large publication.

2 Organisation & réalisation du projet

2.1 Coordinateur scientifique et son consortium

Coordinateur : Adrien LUXEY-BITRI est maître de conférence en informatique depuis 2022 au sein de la Faculté des Sciences et technologies (FST) de l'Université de Lille, et membre de l'équipe-projet Spirals, conjointe à l'Inria et à l'UMR CRISTAL de l'Univ Lille. Docteur en systèmes informatiques répartis, il s'intéresse à l'architecture matérielle du numérique depuis son doctorat où il fonda avec ses camarades une association, Deuxfleurs, dont l'objet est de fournir des services numériques au public en usant d'une infra-

structure répartie d'ordinateurs de bureau reconditionnés, localisés au domicile de certains membres. Cette appétence s'est renforcée en rejoignant Spirals, où il coordonne les travaux sur les impacts environnementaux du numérique [14, 15] (outre les impacts énergétiques, qui pré-existaient à son arrivée). Son activité soutenue de médiation (voir l'exposition « Le numérique en eaux troubles ») l'amènent à constituer un groupe de travail transdisciplinaire sur les externalités négatives du numérique, en particulier en lien avec la mine.

Le projet INSPIRE constitue la première contractualisation de ce consortium, pour lequel il dédiera 75 % de son temps de recherche à approfondir la compréhension académique du système productif numérique et de ses impacts miniers, par la conception d'un logiciel de simulation prospectif. **Il participe par ailleurs au projet ANR PRC ObsoMobile (2025-29), à hauteur de 15 % de son temps de recherche.**

Romain Rouvoy est professeur d'informatique, également au sein de la FST de l'Univ Lille et de l'équipe-projet Spirals. Ses recherches se concentrent à l'intersection du génie logiciel et des systèmes répartis, abordant des questions telles que le développement de logiciels durables et le respect de la vie privée.

Clément Quinton est maître de conférences (HDR) depuis 2017, également au sein de l'Univ Lille et de l'équipe-projet Spirals. Son expertise est dans la gestion de la variabilité dans les systèmes logiciels géo-distribués large échelle, avec une attention particulière à la modélisation de la variabilité et à l'évolution pour permettre l'auto-adaptation.

Olivier Vidal (h-index 55) est directeur de recherche au CNRS (Institut des Sciences de la Terre), et coordinateur du PEPR « Sous-sol bien commun », un programme national transdisciplinaire qui regroupe environ 200 chercheuses et chercheurs appartenant à plus de 30 laboratoires de recherche (géologues, ingénieurs, sociologues, juristes, économistes et expert-es en environnement). Olivier montre notamment un solide ancrage en modélisation des systèmes dynamiques et du nexus ressource-énergie.

Catherine Truffert est docteure en géosciences (géodynamique), et navigue entre les disciplines géologie et géophysique. Elle dirige aujourd'hui la filiale du BRGM nommée IRIS Instruments—entreprise de rayonnement mondial, spécialisée dans la conception d'équipements de géophysiques innovants pour l'environnement, la recherche en eau souterraine et l'exploration minière. Pour ce qui concerne l'exploration minière, elle est très active notamment au Moyen-Orient et en Europe centrale où se concentrent des projets d'exploration de substances telles que le cuivre, l'or, l'argent, le cobalt et d'autres minéraux dont la criticité est avérée dans de nombreuses régions du monde en particulier pour les transitions énergétique et numérique.

Humberto Brea-Solis est maître de conférences à l'Université de Lille et membre du laboratoire Lille Economie Management UMR 9221. Il est spécialisé dans l'analyse de la productivité. Ses travaux portent sur l'évaluation de la performance ainsi que sur les implications stratégiques des modèles organisationnels.

Sophie Cerf est chercheuse à l'Université Grenoble Alpes/Inria. Son expertise se situe à l'intersection de la théorie du contrôle et des systèmes distribués. Elle s'intéresse à la gestion dynamique des systèmes de calcul pour les contraindre aux limites planétaires.

2.2 Moyens mis en œuvre et demandés pour atteindre les objectifs

Partenaire 1 : Université de Lille, Adrien LUXEY-BITRI

Frais de personnel : 242,4 k€ Pour mener à bien ce projet, nous aurons besoin d'un **post-doctorat** (24 mois, **104 k€**), d'un **doctorat** (3 ans, **130 k€**) et de **deux stagiaires** (6 mois chacun, **2×4,2 k€**).

Comme détaillé Fig. 5 : le post-doctorat d'une durée de 2 ans, recruté dès le début du projet, interviendra à 75 % au **WP1** pour modéliser le système productif numérique et ses impacts miniers, ainsi qu'au **WP2** (25 %) pour élaborer des scénarios d'évolution dudit système. Le doctorat, recruté au mois 13, dédiera 11 % de son temps au **WP1**, 22 % au **WP2**, mais sa contribution principale (67 %) sera la réalisation d'une étude comparative des impacts des différentes trajectoires du numérique proposées. Le stage n°1 interviendra au mois 8 (printemps 2027) sur le **WP1** pour constituer une base de données d'indicateurs d'évolution du numérique. Le stage n°2, recruté au mois 32 (printemps 2029) participera au développement

Nature des frais	Montant
Personnel	242 400 €
Matériel	4 000 €
Missions	20 000 €
Préciputs	35 964 €
Total demandé	302 364 €

Synthèse des moyens demandés

logiciel du **WP3**.

Coûts des instruments et du matériel : 4 k€ Deux ordinateurs portables (2×2 k€) seront achetés pour le personnel recruté (post-doctorat & doctorat).

Frais généraux et d'exploitation additionnels : 55 964 € Restent à ajouter au budget les **frais de mission (20 k€)**, pour 6 déplacements par an (en France pour participer aux colloques nationaux et organiser des réunions de travail, et en Europe pour les conférences internationales) sur les 4 ans du projet. À 833 € en moyenne par mission, on arrive à 4 (ans) × 6 (missions) × 833 € = 20 000 €. Ce qui porte l'enveloppe avant préciput de gestion de la tutelle et du laboratoire à 266,4 k€. Les **préciput de gestion de la tutelle** sont de 10,5 % (27 972 €), et **préciput du laboratoire** de 3,0 % (7 992 €).

3 Impacts et retombées du projet

Dissémination centrée autour du site d'INSPIRE Toutes les connaissances produites par INSPIRE ont non seulement vocation à être publiées, mais aussi activement promues auprès de la communauté scientifique, technique et du public. Pour ce faire, le **site internet** du projet (qui sera hébergé par Deuxfleurs) sera publié dès son acceptation et régulièrement mis à jour et étendu. Dans un premier temps, une culture de la transparence sera entretenue avec la publication des points d'avancement réguliers sous forme de billets de blog. Chaque livrable qui présente un intérêt public sera ensuite partagé par ce biais. Au **WP1**, il apparaît capital pour déverrouiller l'opacité du secteur numérique, de publier la méthodologie d'estimation de l'évolution du secteur numérique (L1.1), le calcul de ses impacts miniers (L1.3) et les données ainsi produites (L1.2 & L1.3). Au **WP2**, nous appellerons aux contributions du public pour découvrir des leviers d'intervention sur le numérique (L2.2) que nous repartagerons, pour ensuite publier les scénarios ainsi établis (L2.3). Enfin, au **WP3**, nous étendrons le site de la documentation technique du simulateur, et utiliserons le site pour fédérer un commun logiciel autour du projet. Le simulateur (L3.1), les scénarios intégrés à sa configuration (L3.2), et surtout la synthèse de nos résultats (L3.3) y seront partagés.

Publications scientifiques Nous rédigerons plusieurs publications scientifiques (L1.2, L1.3, L2.3 et L3.3) tout au long du projet, et produirons des bases de données à destination de plusieurs disciplines scientifiques : informatique, sciences de l'environnement, économie, géosciences. Ces productions seront partagées en archive ouverte. Au **WP1**, les livrables L1.2 et L1.3 donneront lieu à des articles méthodologiques et des bases de données en informatique et géosciences. Au **WP2**, ce sera au tour des scénarios d'évolution du numérique (L2.3) d'être publiés en analyse environnementale et informatique. Enfin, le **WP3** parachèvera le projet avec la publication de notre comparatif des impacts environnementaux des différents scénarios d'évolution du numérique, qui pourra donner lieu à des publications dans chacun des champs représentés.

Bénéfices sociétaux et économiques Les leviers d'intervention identifiés seront partagés sous forme de fiches pratique à la communauté informatique (L2.3). Au delà de l'évaluation des impacts environnementaux liés au système numérique productif, le projet sera en capacité d'accéder à la consommation en minéraux du système. Cette information va devenir de plus en plus capitale pour les États qui font face à des difficultés d'accès à la ressource. Relier l'intensité matière (minérale) aux dimensions du système productif numérique sera une grande avancée. Ainsi, un logiciel de simulation prédictive des impacts environnementaux du numérique (L3.1) sera disponible pour permettre aux décideur-euses de piloter la demande en matière et de limiter les impacts environnementaux, même si ces derniers ne se situent pas forcément sur leur territoire. Des acteurs nationaux tel que l'ADEME seront friands des résultats du projet, dont les scénarios prospectifs qui viendront parfaire les travaux qu'ils ont commencés à initier sur le sujet. Enfin, le public pourra être informé de l'impact environnemental de l'usage du système numérique comme il l'est aujourd'hui de ses émissions de gaz à effet de serre exprimées en équivalent en tonnes de CO₂.

4 Bibliographie

[1] J. ROCKSTRÖM et al. « A Safe Operating Space for Humanity ». *À : Nature* 461.7263 (sept. 2009), p. 472-475. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/461472a. URL : <https://www.nature.com/articles/461472a> (visité le 22/03/2026).

[2] N. KITZMANN et al. « Planetary Health Check 2025 : A Scientific Assessment of the State of the Planet ». *À : (sept. 2025)*. DOI : 10.48485/pik.2025.017. URL : <https://planetaryhealthcheck.org/> (visité le 22/03/2026).

- [3] C. FREITAG et al. « The Real Climate and Transformative Impact of ICT : A Critique of Estimates, Trends, and Regulations ». *À : Patterns* 2.9 (2021). DOI : 10.1016/j.patter.2021.100340.
- [4] T. BRILLAND et al. *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France*. Rapport final. ADEME, jan. 2025. URL : <https://ecoresponsable.numerique.gouv.fr/docs/2024/etude-ademe-impacts-environnementaux-numerique.pdf> (visité le 10/10/2025).
- [5] THE SHIFT PROJECT. *IA, Données, Calcul : Quelles Infrastructures Dans Un Monde Décarboné ?* Rpport Final. The Shift Project, oct. 2025. URL : <https://theshiftproject.org/app/uploads/2025/09/RF-PIA-1.pdf> (visité le 20/03/2026).
- [6] M. REINBIGLER et R. MARTIN. « Toward a Metal Usage Effectiveness Metric in Data Centers : A Study ». *À : 2024 10th International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*. Stockholm, Sweden : IEEE, 2024. ISBN : 979-8-3315-0528-8.
- [7] SYSTEXT. *Des métaux dans mon smartphone*. Avr. 2017. URL : <https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmmp/> (visité le 07/10/2024).
- [8] G. ROUSSILHE et al. *Purer than Pure : How Purity Reshapes the Upstream Materiality of the Semiconductor Industry*. Sept. 2025. DOI : 10.48550/arXiv.2509.18768.
- [9] D. T. BUECHLER et al. « Comprehensive Elemental Analysis of Consumer Electronic Devices : Rare Earth, Precious, and Critical Elements ». *À : Waste Management* 103 (fév. 2020), p. 67-75. ISSN : 0956053X. DOI : 10.1016/j.wasman.2019.12.014.
- [10] S. FALK et al. *More than Carbon : Cradle-to-Grave Environmental Impacts of GenAI Training on the Nvidia A100 GPU*. Archive ouverte. Août 2025. DOI : 10.48550/arXiv.2509.00093.
- [11] O. VIDAL et al. « Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World ». *À : MDPI Sustainability* (déc. 2021). DOI : 10.3390/su14010011.
- [12] D. RAABE. « The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys ». *À : Chemical Reviews* 123.5 (mars 2023), p. 2436-2608. ISSN : 0009-2665. DOI : 10.1021/acs.chemrev.2c00799. URL : <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799> (visité le 22/12/2024).
- [13] SYSTEXT. *Controverses minières – Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales – Mine secondaire et recyclage*. Rapport d'étude Volet 2 – Tome 3. 2024. URL : https://www.systext.org/sites/all/documents/RP_SystExt_Controverses-Mine_VOLET-2_Tome-3_Avril2024.pdf (visité le 21/03/2026).
- [14] S. CERF, A. LUXEY-BITRI et al. *Untangling the Critical Minerals Knot : When ICT Hits the Energy Transitions*. Déc. 2023. URL : <https://inria.hal.science/hal-04709741> (visité le 03/09/2025).
- [15] A. LUXEY-BITRI et C. TRUFFERT. « L'appétit insoutenable de nos sociétés en métaux, et comment lui survivre ». *À : The Conversation* (sept. 2025). DOI : 10.64628/AAK.aenprj9ju.
- [16] SYSTEXT. *Controverses minières – Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales*. Rapport d'étude Volet 1. 2021. URL : https://www.systext.org/sites/all/documents/RP_SystExt_Controverses-Mine_VOLET-1_Nov2021_vf.pdf (visité le 18/06/2024).
- [17] D. H. MEADOWS et al. *The Limits to Growth*. New York : Universe Books, 1972. ISBN : 0-87663-165-0.
- [18] F. PALLEZ et al. « L'élaboration d'une politique publique environnementale, le Bilan Carbone ». *À : Annales des Mines - Gérer et comprendre* N° 129 (sept. 2017). ISSN : 0295-4397. DOI : 10.3917/geco1.129.0013.
- [19] EUROPEAN PARLIAMENT. *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 Establishing the Framework for Achieving Climate Neutrality and Amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')*. Juin 2021. URL : <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj> (visité le 21/03/2026).
- [20] W. MALENBAUM. « World Resources for the Year 2000 ». *À : The Annals of the American Academy of Political and Social Science* 408 (1973), p. 30-46. ISSN : 0002-7162. JSTOR : 1039384. URL : <https://www.jstor.org/stable/1039384> (visité le 07/10/2025).
- [21] D. EKCHAJZER et al. « Decision-Making under Environmental Complexity : The Need for Moving from Avoided Impacts of ICT Solutions to Systems Thinking Approaches ». *À : ICT4S* (2024). DOI : 10.1145/3643834.3661618.
- [22] B. VENDITTI. *Visualizing the Critical Minerals Powering the AI Boom*. Visual Capitalist. 16 fév. 2026. URL : <https://www.visualcapitalist.com/the-critical-minerals-powering-the-ai-boom/> (visité le 26/03/2026).
- [23] EPLCA. *Life Cycle Assessment (LCA)*. 2021. URL : <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html> (visité le 26/11/2025).
- [24] ARCEP et ARCOM. *Référentiel général de l'écoconception des services numériques*. Rapp. tech. Mai 2024. URL : <https://ecoresponsable.numerique.gouv.fr/publications/referentiel-general-ecoconception/> (visité le 18/10/2024).
- [25] L. VAN OERS et J. GUINÉE. « The Abiotic Depletion Potential : Background, Updates, and Future ». *À : Resources* 5.1 (mars 2016), p. 16. ISSN : 2079-9276. DOI : 10.3390/resources5010016. URL : <https://www.mdpi.com/2079-9276/5/1/16> (visité le 11/09/2025).
- [26] R. N. MANKAA et al. « A New Life Cycle Impact Assessment Methodology for Assessing the Impact of Abiotic Resource Use on Future Resource Accessibility ». *À : The International Journal of Life Cycle Assessment* 29.1 (1^{er} jan. 2024). ISSN : 1614-7502. DOI : 10.1007/s11367-023-02229-y.
- [27] A. FERNANDA SOARES et al. « Projection of Global Copper Demand in the Context of Energy Transition ». *À : Resources Policy* 103 (1^{er} avr. 2025). ISSN : 0301-4207. DOI : 10.1016/j.resourpol.2025.105567.
- [28] S&P GLOBAL. « 'Substantial Shortfall' in Copper Supply Widens as the Race for AI and Growing Defense Spending Add to Accelerating Demand ». *À : (8 jan. 2026)*. URL : <https://press.spglobal.com/2026-01-08-Substantial-Shortfall-in-Copper-Supply-Widens-as-the-Race-for-AI-and-Growing-Defense-Spending-Add-to-Accelerating-Demand,-New-S-P-Global-Study-Finds> (visité le 26/03/2026).
- [29] THINKSTEP. *Life Cycle Assessment of Dell R740*. Life Cycle Assessment. 2019. URL : https://www.delltechnologies.com/assets/en-us/products/servers/technical-support/Full_LCA_Dell_R740.pdf (visité le 16/03/2023).
- [30] D. SÁNCHEZ et al. *Life Cycle Assessment of the Fairphone 4*. Rapp. tech. Berlin : Fraunhofer IZM, mars 2022.

- [31] F. LOPEZ et C. DIGUET. *Sous le feu numérique*. vuesDen-semble. MétisPresses, avr. 2023. ISBN : 978-2-940711-26-0. URL : <https://www.metispresses.ch/fr/sous-le-feu-numerique> (visité le 24/03/2026).
- [32] L. SCHWARTZ. « Amateur Open-Source Researchers Went Viral Unpacking the War in Ukraine ». *À : Rest of World* (mars 2022). URL : <https://restofworld.org/2022/osint-viral-ukraine/> (visité le 23/03/2026).
- [33] H. BECKLER et al. « Data Centers' Environmental Impact Is Hard to Quantify. Here's How We Did It. » *À : Business Insider* (juin 2025). URL : <https://www.businessinsider.com/how-calculate-data-center-cost-environmental-impact-methodology-2025-6> (visité le 16/03/2026).
- [34] H. van Ess. *They Droned Back*. Digital Digging. Déc. 2025. URL : <https://www.digitaldigging.org/p/they-droned-back> (visité le 11/03/2026).
- [35] GOLDOIN, TOM. *Nos nouveaux vieux ordinateurs*. Blog **Deux-fleurs**. 2022. URL : <https://blog.deuxfleurs.fr/2022-vieux-se-rveurs/> (visité le 24/03/2026).
- [36] K. CALVIN et al. *Climate Change 2023*. Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), juill. 2023. DOI : 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [37] ADEME. *Transition(s) 2050*. Rapp. tech. 2021. URL : <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios/> (visité le 10/10/2025).
- [38] A. BEIGNON et al. *Imposing AI : Deceptive Design Patterns against Sustainability*. Août 2025. DOI : 10.48550/arXiv.2508.08672. arXiv : 2508.08672 [cs].
- [39] S. LANGE et al. « The Induction Effect : Why the Rebound Effect Is Only Half the Story of Technology's Failure to Achieve Sustainability ». *À : Frontiers in Sustainability* 4 (2023). DOI : 10.3389/frsus.2023.1178089.
- [40] L. A. GREENING et al. « Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey ». *À : Energy Policy* 28 (2000). DOI : 10.1016/S0301-4215(00)00021-5.
- [41] C. L. MAGEE et T. C. DEVEZAS. « A Simple Extension of Dematerialization Theory : Incorporation of Technical Progress and the Rebound Effect ». *À : Technological Forecasting and Social Change* 117 (2017). DOI : 10.1016/j.techfore.2016.12.001.
- [42] J. D. STERMAN. *Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston, MA : McGraw-Hill, 2000.
- [43] D. H. MEADOWS. *Thinking in Systems : A Primer*. Chelsea Green, 2008. ISBN : 978-1-60358-055-7.
- [44] M. GODET. *Manuel de prospective stratégique*. 2^e éd. Paris : Dunod, 2001.
- [45] M. LEHNER. « A Systematic Literature Review of Time-Use Effects from Increased ICT Adoption and Its Consequences for Lifestyle Climate Implications ». *À : Sustainability Science* 20.6 (2025), p. 2217-2227. DOI : 10.1007/s11625-025-01720-9.
- [46] C. PAUL et al. « Rebound Effects in Agricultural Land and Soil Management : Review and Analytical Framework ». *À : Journal of Cleaner Production* 227 (2019). DOI : 10.1016/j.jclepro.2019.04.115.
- [47] F. CHARPENTIER et al. « Estimating the Carbon Footprint of ICT Using Input-Output Analysis : Dealing With Overcounting and Other Challenges ». *À : ICT4S*. Juin 2023. DOI : 10.109/ICT4S58814.2023.00024.
- [48] J. W. FORRESTER. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA : MIT Press, 1961.
- [49] P. CHECKLAND. *Systems Thinking, Systems Practice*. Chichester : John Wiley & Sons, 1981.
- [50] P. M. SENGE. *The Fifth Discipline : The Art and Practice of the Learning Organization*. New York, NY : Doubleday, 1990.
- [51] E. BONABEAU. « Agent-based modeling : Methods and techniques for simulating human systems ». *À : Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (2002). DOI : 10.1073/pnas.082080899.
- [52] J. A. M. VENNIX. *Group Model Building : Facilitating Team Learning Using System Dynamics*. Chichester : John Wiley & Sons, 1996.
- [53] B. SHNEIDERMAN. « The Eyes Have It : A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations ». *À : Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages*. IEEE, 1996, p. 336-343.
- [54] L. BORNES et al. « Systemic Sustainable HCI : Integrating Collaborative Modeling into a Design Process to Address Rebound Effects ». *À : DIS Conference*. ACM, juill. 2024. DOI : 10.1145/3643834.3661618.
- [55] W. S. JEVONS. *The Coal Question : An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*. London : Macmillan, 1865.
- [56] S. OĞUZ. *Charted : Major Copper Discoveries Since 1900*. Visual Capitalist. 21 nov. 2024. URL : <https://www.visualcapitalist.com/sp/charted-major-copper-discoveries-since-1900/> (visité le 26/03/2026).
- [57] H. LE BOULZEC et al. « Dynamic Modeling of Global Fossil Fuel Infrastructure and Materials Needs : Overcoming a Lack of Available Data ». *À : Applied Energy* 326 (nov. 2022). DOI : 10.1016/j.apenergy.2022.119871.
- [58] É. JOURDAIN. *Les Communs*. Que Sais-Je ? Presses Universitaires de France, 8 déc. 2021. ISBN : 978-2-7154-0528-8.