



Juin
2026

numéro

27

1024

Bulletin

de la Société informatique
de France



COMITÉ DE RÉDACTION

DENIS PALLEZ, *université Côte d'Azur, rédacteur en chef*

SYLVIE ALAYRANGUES
Université de Poitiers

OLIVIER BAUDON
Université de Bordeaux

YVES BERTRAND
Université de Poitiers

JEAN-PAUL DELAHAYE
Université de Lille

ISABELLE DEBLED-RENNESON
Université de Lorraine

GIUSEPPE DI MOLFETTA
Université Aix-Marseille

MARIE DUFLOT-KREMER
Université de Lorraine

FRÉDÉRIC HAVET
CNRS, université Côte d'Azur

MATTHIEU LATAPY
CNRS, Sorbonne Université

BAPTISTE MÈLÈS
CNRS, université de Lorraine

BRUNO MERMET
Université du Havre

PATRICE NAUDIN
Université de Poitiers

NICOLAS PASSAT
*Université de Reims
Champagne-Ardenne*

MICHEL RAYNAL
Université de Rennes

LAURENT RÉVEILLÈRE
Université de Bordeaux

NANCY RODRIGUEZ
Université de Montpellier

FLORENCE SÈDES
Université de Toulouse

LAURENT SIGNAC
Université de Poitiers

Contact : 1024@socinfo.fr

*Sauf mention contraire, les articles sont publiés sous licence Creative Commons
« Attribution — Pas d'utilisation commerciale — Pas de modification 4.0 »*

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



SOCIÉTÉ INFORMATIQUE DE FRANCE

Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05

Prix public : 32 € (adhérents SIF : -30%)

Directrice de la publication : Isabelle Guérin Lassous

ISSN : 2270-1419

Couverture réalisée par l'agence graindecél, <https://www.bauwensceline.com>.

Composition réalisée par C&F éditions, <https://cfeditions.com>.

Dessins imaginés et crayonnés par Frédéric Havet,

<https://www-sop.inria.fr/members/Frederic.Havet>.

Sommaire

Éditorial	3
Le mot de la présidente	7

ENSEIGNEMENT

<i>NSI au lycée général : la chute</i> , La SIF	11
---	----

MÉDIATION

<i>Comment créer des missions cryptographiques ?</i>	
A. Durand, S. Fleury, P. Lafourcade, M. Mognos, M. More	21
<i>La nuit de l'info 2025</i> , Le bureau de la nuit de l'info	29

SCIENCES

<i>Optimisation coûteuse : où en sommes-nous et que faire maintenant ?</i> D. Pallez	31
<i>Research software : qui es-tu ?</i> T. Gomez-Diaz, T. Recio	53

ENJEUX ÉCOLOGIQUES

<i>Effets environnementaux de la 5G (partie 3)</i> , P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux, K. Marquet, A.-C. Orgerie	85
--	----

PRIX GILLES KAHN

<i>Apprentissage de modèles de préférence</i> , M. Hérin	131
--	-----

FEMMES & SCIENCES

<i>Le panthéon scientifique incomplet</i> , F. Sèdes	139
<i>Comités de sélection</i> A.-C. Orgerie, C. Maumet	149

LA VIE DES ASSOCIATIONS

<i>L'association Enseignement public et informatique (EPI)</i> , G.-L. Baron, J. Baudé, A. Kapur, J. Lucy	161
--	-----

HOMMAGE

<i>Éric Bruillard, informaticien et pédagogue...</i> , G.-L. Baron, F. Tort	179
---	-----

FICTION

<i>Pourquoi buvez-vous du café?</i> F. Houste	183
---	-----

RÉCRÉATION

<i>Matrices de somme positive</i> , J.-P. Delahaye	187
--	-----

<i>À chaque sorcier sa baguette</i> , c0d1ngUP team	191
---	-----

Soutiens	199
----------------	-----

Éditorial

On attribue souvent à Albert Camus la citation «*Mal nommer les choses, c'est ajouter au malheur du monde.*¹», et Éric Fottorino ajoute «*Ne pas nommer les choses, c'est nier notre humanité.*²». Alors... détourner le regard pour ne pas devoir admettre que la science n'est pas uniquement masculine, est-ce ajouter au malheur de ce monde? ou bien est-ce nier notre humanité?

Dans «Le Panthéon scientifique incomplet», Florence Sèdes nous parle du projet, en passe de s'achever, de lancer 72 femmes scientifiques à l'assaut de la tour Eiffel afin d'inscrire leurs noms en lettres d'or sur le pourtour de son premier étage, juste au dessus des noms des 72 hommes scientifiques qui y ont été écrits sous l'impulsion de Gustave Eiffel en 1889... L'autrice nous raconte l'histoire d'une invisibilisation, décrétée sciemment, jamais corrigée depuis plus d'un siècle, conséquence de biais de nos sociétés, parfaitement identifiés, eux, depuis plusieurs siècles par quelques personnes qui ont joué un rôle important dans l'évolution des idées de nos sociétés occidentales. On est en droit de se demander comment il est possible d'avoir éludé ce vide de reconnaissance pendant aussi longtemps!

Dans la veine du manque de représentation (au sens large) des femmes dans nos institutions, l'exigence légale de quotas féminins dans la constitution de différents comités, commissions ou autres instances qui gèrent notre vie, administrative, professionnelle ou citoyenne, est souvent la source d'une surcharge mentale pour les femmes qui sont sollicitées. Dans l'article «*Comités de sélection : combien d'invitations accepter?*», Anne-Cécile Orgerie et Camille Maumet font un état des lieux chiffré de cette situation dans un contexte qui touche le monde de l'enseignement supérieur et de la recherche.

1. Il semble que la phrase originale de Camus soit : «Mal nommer un objet, c'est ajouter au malheur de ce monde.»

2. Éric Fottorino. *Suite à un accident grave de voyageur*. Gallimard. 2013.

La rubrique «Médiation» de ce numéro accueille un compte rendu de l'édition 2025 de la *Nuit de l'info* établi par le groupe qui pilote cet événement. La thématique principale de cette dernière édition était l'utilisation responsable des outils numériques, un sujet qui n'est pas étranger à ceux généralement abordés dans la rubrique «Enjeux écologiques» de ce bulletin.

De leur côté, Anaïs Durand, Séverine Fleury, Pascal Lafourcade, Marianne Mognos et Malika More, dans leur article «*Comment créer des missions cryptographiques ?*», nous présentent le site *Mission crypto* conçu pour permettre la construction de défis cryptographiques dans le but d'initier des publics variés aux arcanes de la cryptographie, depuis la stéganographie jusqu'aux preuves à connaissance nulle, en passant par la machine Enigma, pour ne citer que ces exemples.

Philippe Ciblat, Jacques Combaz, Marceau Coupechoux, Kevin Marquet et Anne-Cécile Orgerie nous parlent, des «*effets environnementaux de la 5G*», troisième volet. La première partie de cette série³ permettait à des, disons candides, d'appréhender le contexte et la problématique des réseaux de téléphonie mobiles. Dans le second acte⁴ de leur trilogie, les cinq auteurs nous avaient expliqué, entre autres, pourquoi, pour avoir une couverture 5G haut-débit du territoire des USA identique à celle de la 4G, il fallait, grosso modo, installer deux à trois fois plus d'antennes relais 5G qu'il y a d'habitants dans ce pays. Après ces deux premiers opus passionnants, nous attendions avec impatience la troisième et dernière partie, promise depuis le numéro 24 de ce bulletin. Elle vient d'arriver, profitons-en !

De son côté, Margot Hérin nous propose un résumé de sa thèse, relevant du domaine de l'intelligence artificielle ; cette thèse a été récompensée par le prix de thèse Gilles Kahn 2025. Dans «*Apprentissage de modèles de préférence*», elle nous explique comment construire des systèmes intégrant la notion de préférence, et permettant alors de faciliter l'arbitrage entre différents points de vue proposés en réponse à une requête en fonction des préférences de l'opérateur.

Denis Pallez, quant à lui, dans «*Optimisation coûteuse...*», nous parle d'un autre sujet touchant à la recherche opérationnelle. Il fait un petit tour d'horizon des techniques prenant en compte le coût de la résolution des problèmes. En gros, si, pour des raisons de coût de calcul, l'on ne peut pas utiliser un processus déterministe pour résoudre exactement un problème de recherche opérationnelle, quelles sont les possibilités qui s'offrent à nous pour déterminer une solution approchée à moindre coût ?

Enfin, pour terminer cette série d'articles sur des domaines de la recherche, «*Research software : qui es-tu ?*», proposé par Teresa Gomez-Diaz et Tomas Recio nous parle d'un sujet ardu, qui concerne à peu près toute

3. DOI:10.48556/SIF.1024.23.53.

4. DOI:10.48556/SIF.1024.24.99.

activité de recherche, même si les informaticiens, qui sont les principaux concernés par ce problème, sont assez rares à s'y intéresser : quels sont les droits d'auteur des concepteurs et réalisateurs de logiciels pour la recherche ? (Droits et devoirs.) Quels aspects du logiciel produit sont protégés par ces droits d'auteurs, qui bénéficie de la propriété de cette création de l'esprit qu'est un logiciel ? Etc. Un sujet à la frontière entre l'informatique et le droit qui touche beaucoup des activités des informaticiens dans les laboratoires.

Pour nous distraire, Jean-Paul Delahaye et l'équipe Codingup nous proposent respectivement, d'un côté un petit problème matriciel — « *Matrices de somme positive* » — assez ludique, et de l'autre un problème relevant de l'étude des couplages dans un graphe, « *À chaque sorcier sa baguette* ».

Dans ce numéro 27 de 1024, et pour la première fois de son existence, notre bulletin contient « le mot de la *présidente* », un billet qui remplace celui du *président* : Isabelle Guérin Lassous succède à Yves Bertrand à la tête de la SIF, après les élections au conseil d'administration de la SIF, qui se sont déroulées lors de l'assemblée générale en février dernier.

Et c'est ensemble que les deux *présidents*⁵ ont choisi de nous gratifier d'un petit état des lieux de notre discipline, donc à deux voix — voire à quatre mains.

Ils exhibent des maux qui frappent cruellement la science informatique, encore plus maintenant qu'à sa naissance et qui, malheureusement, ne sont probablement pas des maux de jeunesse mais semblent bien plutôt consubstantiels à notre discipline, qui n'a pas encore réussi à s'extraire de la *soupe primordiale* qui lui a donné naissance.

Les déboires de la spécialité NSI, décrits dans l'article « NSI au lycée général : la chute » ne sont là encore que l'un des aspects de cette reconnaissance qui tarde à s'établir. Cette spécialité piétine et peine depuis le début à trouver sa voie, conséquence d'un grand nombre de causes, dont les différentes réformes du lycée ne sont que l'un des déclencheurs.

Incidemment, l'histoire de l'association *Enseignement public et informatique* (l'EPI), dont nous parlent Georges-Louis Baron, Jacques Baudé, Alain Kapur et Jacques Lucy, raconte avec précision certaines des étapes de l'arrivée de l'informatique dans le paysage éducatif français. Cette histoire ne fait que renforcer ce sentiment d'inachèvement concernant notre science informatique.

L'association EPI a été pendant presque 55 ans de tous les combats pour faire reconnaître l'informatique comme une discipline dont la connaissance est essentielle pour comprendre le monde, au même titre que les mathématiques, la physique ou les autres sciences.

5. Contrairement à ce que pourrait laisser penser ce qui précède — nous ne suivrons pas la tradition *républicaine* consistant à conserver le titre de « président » aux ex-présidents...

La problématique des membres de l'EPI a été autant de déterminer comment l'on devait enseigner l'informatique que de chercher comment l'informatique pouvait aider l'enseignement des autres disciplines. Cela ne vous évoque-t-il rien d'actuel ? Le parallèle est pourtant frappant ! Comment peut-on — et doit-on ? — enseigner l'intelligence artificielle... ? comment peut-on — et doit-on ? — utiliser l'intelligence artificielle pour enseigner... ? L'émergence de l'informatique et l'émergence de l'intelligence artificielle ont décidé de nombreux points communs, pourquoi serait-on plus optimiste concernant le sort de la seconde ?

Éric Bruillard était l'une de ces personnes qui ont consacré une grande partie de leur vie professionnelle à la didactique de l'informatique, à l'utilisation de l'informatique dans l'enseignement et, pour ce qui le concerne en particulier, à l'impact que pouvait avoir l'intelligence artificielle dans l'enseignement. Il vient de disparaître, Georges-Louis Baron et Françoise Tort lui rendent hommage dans ce bulletin.

Terminons sur une note plus réconfortante : nous avons le plaisir de publier de nouveau une nouvelle. Nous avons bénéficié — dans le dernier numéro — d'une supercherie à la Gary-Ajar perpétrée par une paire femme-IA, cette fois-ci, l'histoire, concotée par François Houste, trotte autour de l'appareil le plus important dans un bureau ou un laboratoire d'informatique : la machine à café. Dans «*Pourquoi buvez-vous du café ?*», nous faisons connaissance avec une machine qui ne rentre pas vraiment dans les bonnes cases... nous ne vous en disons pas plus.

Patrice Naudin & Denis Pallez
Comité de rédaction du bulletin 1024
1024@societe-informatique-de-france.fr

Les maux de la présidence

Yves Bertrand

Isabelle Guérin Lassous

La présidence de la SIF a changé le 3 février 2026. En cette période de transmission des pouvoirs, j'ai proposé à mon prédécesseur de coécrire ce « mot de la présidente », mot que nous aurions pu nommer « mot de la présidence ». Nous avons fait un choix plus radical avec « Les maux de la présidence » ! Oui, ce titre, un tantinet provocateur, est un raccourci abrupt pour « Les maux de la discipline informatique », que la présidence de la SIF se doit de prendre à bras le corps, avec le conseil d'administration, le conseil scientifique, les groupes de travail et tous les adhérents de la SIF. Les travaux et les actions menés au sein de la SIF ont permis d'en identifier trois principaux. Nous vous les soumettons ici, en esquissant des propositions qui ambitionnent de les juguler autant que les forces vives et bénévoles de notre association le permettent.

Le premier *mal* réside dans la difficulté à expliquer au grand public ce qu'est réellement l'informatique, à la fois dans sa diversité et dans son unité, et, au-delà, à l'installer comme bien culturel commun au sein de la société. Cette difficulté est aussi forte que l'est l'immixtion du numérique dans nos vies quotidiennes. L'explication relève de la vulgarisation, la transformation de l'informatique en bien commun relève de la médiation. Les organismes nationaux de recherche l'ont bien compris : le CNRS Sciences informatiques et Inria font de la médiation scientifique en informatique une valeur montante et prônent sa valorisation dans la carrière de leurs chercheurs. En 2014, le deuxième congrès de la jeune SIF posait déjà les bases de nos réflexions sur la médiation scientifique en informatique. En 2026, la SIF articule son congrès autour des « médiations informatiques », plurielles comme le sont les sciences informatiques. Ce congrès, qui a eu lieu au moment où vous lisez ces lignes, se tenait en l'honneur de Gilles Dowek,

disparu à l'été 2025. Les apports de Gilles à l'informatique sont de premier plan tant en recherche, qu'en formation ou en médiation ; comme il se doit, ils furent couronnés par plusieurs prix prestigieux. En ce début d'année 2026, nous avons appris avec une grande surprise et une émotion non moins grande que Gilles demandait, par testament, à notre association de créer un prix de médiation scientifique en informatique. Quel honneur ! Et quel devoir... Le congrès de Nancy dont le thème était déjà choisi avant la disparition de Gilles constituait dès lors l'écrin naturel où faire éclore ce prix. L'envergure scientifique de Gilles était un appel à associer à la création de ce prix les deux organismes nationaux de recherche de notre discipline. Il nous incombe de nous porter garants de la pérennité d'un prix dont nous souhaitons que la qualité soit à la hauteur de celui qui en est à l'origine, tant par le niveau que par la diversité des futurs bénéficiaires. Au-delà du congrès 2026 et du *prix de médiation scientifique Gilles Doweck*, il est indispensable de continuer à promouvoir l'informatique sous toutes ses formes, par exemple l'informatique sans ordinateur ou les activités diverses proposées à tout âge dans les centres de culture scientifique et technique ou par des associations spécialisées La SIF avec ses partenaires dont la *fondation Blaise Pascal* s'attachera à encourager et promouvoir ces actions.

Le deuxième *mal* dont souffre l'informatique consiste en l'hiatus qui se creuse entre son impact considérable dans toutes les vies, privées et professionnelles, et la pauvreté de la formation initiale de la jeunesse à cette discipline. Au collège, l'informatique n'est abordée — seulement à partir de la classe de 5^e — que comme une branche des mathématiques ou de la technologie. Elle devrait être enseignée en tant que discipline à part entière pour en donner une vision plus juste et complète aux élèves, avec des enseignants spécialistes de cette discipline. La SIF — avec d'autres partenaires, dont *Talents du numérique* en particulier — œuvre à la création d'un cursus authentiquement informatique au collège. Au lycée, la spécialité *Numérique et sciences informatiques* (NSI) est le parent pauvre (avec la spécialité *Sciences de l'ingénieur*) de la formation scientifique. À peine 4 % des élèves la suivent en terminale et, en l'absence de toute politique publique pour la développer, la tendance est à la baisse depuis deux ans. Les actions de communication ont prouvé depuis des décennies leur effet tout à fait marginal sur les choix des élèves. On ne jugule pas des biais de genre, des biais de catégories socioprofessionnelles et des biais géographiques par des harangues. Seuls des aménagements structurels du collège et du lycée en phase avec les enjeux socio-économiques et géopolitiques d'aujourd'hui et de demain permettront de conférer à l'informatique la place de bien commun en formation initiale. La SIF, avec ses partenaires des mondes académique et socio-économique, s'emploiera au long cours à tenter de convaincre les pouvoirs publics qu'il y a urgence en la matière.

Le troisième *mal* est le déséquilibre femme-homme, endémique en informatique. La proportion de femmes pourrait être de 55 % au lycée si l’informatique, bien commun, était un constituant du tronc commun ; or elle stagne à 15 %. Elle est de 10 % en classes préparatoires MP2I et MPI. Elle est de 24 % dans les carrières du monde du numérique. Et dans l’enseignement supérieur, en informatique, on ne trouve que 25 % de femmes dans le corps des maîtres de conférences, et seulement 19 % dans celui des professeurs. L’enjeu est certes économique. Mais il est avant tout sociétal : il s’agit de permettre aux femmes d’accéder, à l’instar des hommes, à des carrières dans le numérique valorisées et bien rémunérées. En politique, seuls des « quotas » ont permis d’augmenter significativement la part des femmes aux postes à responsabilité. Laura Chobard, directrice de l’*École polytechnique*, déclarait en 2024 qu’« il serait légitime d’avoir des quotas de filles dans les prépas ». Le déséquilibre femme-homme ne se résorbera jamais par incantations, mais bien avec une réforme systémique de l’enseignement scolaire évoquée précédemment — seule à même d’ouvrir les mêmes portes à toutes — et à l’aide de quelques mesures numériques coercitives¹ qui ont déjà fait leurs preuves comme l’a montré Isabelle Collet². La SIF continuera ainsi à accompagner ces réflexions pour les transformer en actions notamment avec ses partenaires de l’équipe de France du numérique.

Postscriptum – Il est un biais de genre contre lequel il sera agréable de ne pas avoir à lutter. En effet, en 2026, le conseil d’administration de la SIF compte onze femmes pour treize hommes. Un vrai biais de surreprésentation féminine par rapport aux proportions précitées, habituelles dans toutes les sphères « informatiques » de la société !

1. Le maître mot est bien sûr « quotas ».

2. *Les oubliées du numérique*, Isabelle Collet, Le passeur éditeur, 2019.

NSI au lycée général : la chute¹

La SIF

En 2023 et 2024, la spécialité « Numérique et sciences informatiques » (NSI) du lycée général était en léger repli, après une progression au tout début de la réforme du lycée. À la rentrée 2025, le repli se mue en chute sans ambiguïté. Les spécialités scientifiques historiques se maintiennent, alors que NSI comme la spécialité « Sciences de l'ingénieur » (SI), voit ses effectifs devenir de plus en plus confidentiels, son taux d'abandon s'envoler et son taux de filles demeurer à un niveau très bas. Pourtant, des solutions existent qui permettraient de former plus d'élèves à plus de sciences et en particulier à la spécialité NSI, allant de modifications locales comme la création d'une option « Informatique complémentaire » jusqu'à des aménagements structurels significatifs de la formation de l'ensemble des élèves.

NSI en terminale, par rapport aux autres spécialités

1 élève / 25 est formé à l'informatique

1 élève / 70 est formé aux sciences de l'ingénieur

La spécialité NSI n'est plus choisie en 2025 que par 4 % des élèves (contre 4,5 % en 2024) en terminale². En première³, le taux passe de 9,7 % à 9,2 %, alors qu'il avait dépassé 10 % au début de la réforme du lycée. La spécialité SI poursuit sa décroissance, passant de 1,5 % à 1,4 % des élèves. En 2025, environ 5,5 garçons et 0,9 fille en moyenne par lycée général suivent la spécialité NSI.

1. Note de la DEPP n°26-06: *Les choix d'enseignements de spécialité et d'enseignements optionnels à la rentrée 2025*, à cette URL. Note de la DEPP n°26-05: *Résultats définitifs du baccalauréat 2025*, à cette URL. Note Flash du SIES n°26-02 : *Les effectifs en classes préparatoires aux grandes écoles à la rentrée 2025-2026*.

2. Comme chaque élève choisit deux spécialités en terminale parmi douze, une spécialité est en moyenne choisie par 16,6 % des élèves (on ne considère plus ici la spécialité « Biologie-écologie », dont les effectifs sont nuls).

3. Ces taux sont à comparer au taux moyen d'une spécialité en première : 23,1 %.

Dans le même temps, les trois spécialités historiques — «Mathématiques» (Maths), «Physique-chimie» (PC) et «Sciences de la vie et de la Terre» (SVT) — progressent, ensemble, de 100,1 % à 102,4 % (base : 200 %). L'effet balancier de retour à une situation antérieure à la réforme se poursuit donc, même si l'ensemble des sciences demeure à un niveau nettement plus bas qu'avant la réforme. L'absence totale d'une politique publique en faveur des sciences conjuguée à l'effet balancier en faveur des spécialités historiques interdit tout espoir que la spécialité NSI au lycée atteigne un jour des effectifs en phase avec les besoins économiques en matière de cybersécurité, d'intelligence artificielle et de gestion des données.

NSI en terminale : des effectifs globaux en forte baisse

NSI chute de 11,8 % en un an

NSI a 1/3 d'élèves de moins que la spécialité ISN

Les chiffres pour NSI en terminale

Alors que NSI perdait quelques centaines d'élèves depuis deux ans, elle en perd plus de 2000 cette année (cf. figure 1) : 17 061 élèves suivaient NSI en terminale en 2024, alors que seuls 15 055 élèves la suivent en 2025, soit un recul de 11,8 %, dans un contexte où le nombre d'élèves total stagne (-0,2 %). Le nombre d'élèves étudiant l'informatique a donc chuté de plus d'un tiers par rapport à ce qu'il était en 2017 pour la spécialité ISN⁴. La part des garçons ayant choisi la spécialité NSI passe de 8,6 % à 7,7 % et celle des filles de 1,2 % à 1,1 %.

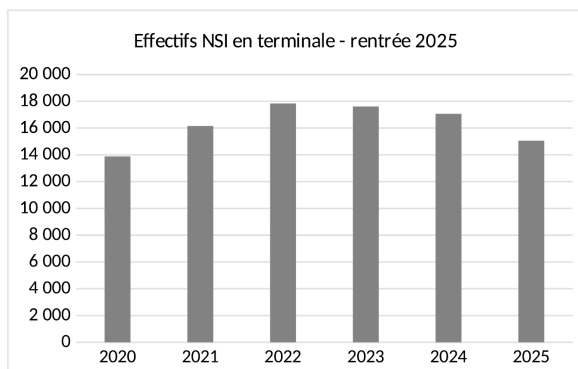


Fig. 1. Effectifs au lycée général en terminale en spécialité NSI à la rentrée 2025.

4. Informatique et sciences du numérique.

Les autres spécialités scientifiques en terminale

Après deux ans de forte augmentation (+27 391 élèves de 2021 à 2023), la spécialité Maths stagne depuis deux ans (168 112 élèves en 2025). Les spécialités PC et SVT gagnent, ensemble, 8 812 étudiants. Mieux : dans les deux cas, la proportion de filles augmente pour ces deux spécialités. La spécialité SI baisse encore cette année, comme depuis la mise en place de la réforme, pour ne représenter que 5 263 élèves en 2025.

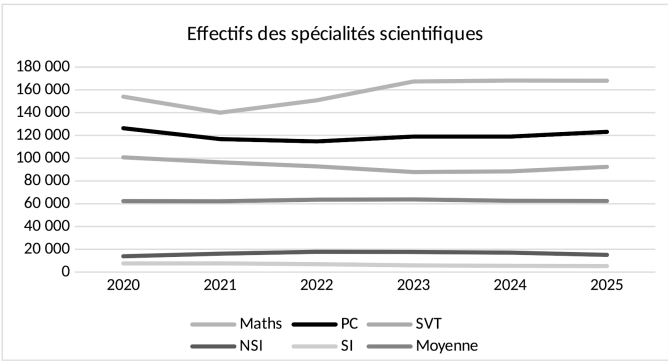


Fig. 2. Effectifs des spécialités scientifiques entre 2020 et 2025. (La ligne au niveau 60 000, en gris moyen, représente une spécialité *moyenne* : 2/12 de l'effectif total).

NSI parmi toutes les spécialités en terminale

Dans toute la communication ministérielle, incluant les notes de la DEPP, la spécialité «Arts» est divisée en sept sous-spécialités, la spécialité «Littérature, langues et cultures de l'antiquité» est scindée en *Latin* et *Grec*, et la spécialité «Biologie-écologie», ne dépendant pas du MEN et aux effectifs voisins de zéro est toujours incluse. Ce sont donc vingt spécialités qui apparaissent au lieu de douze. Revenir à une représentation en douze spécialités permet de mieux les comparer entre elles en matière d'effectifs.

La figure 3 montre que la spécialité NSI apparaît au neuvième rang et la spécialité SI, au onzième rang. À elles deux, elles représentent moins d'un tiers des effectifs de la moyenne des spécialités : 20 318 élèves. Avant la réforme, il y avait plus de 23 000 élèves en option ISN et plus de 22 000 élèves en option SI.

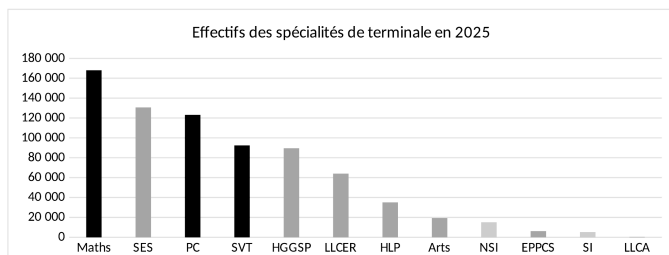


Fig. 3. Spécialités par ordre décroissant d'effectifs. (En noir : spécialités sciences autres que NSI et SI (Maths, PC et SVT) ; en gris moyen : spécialités SHS).

Élèves qui suivent NSI par rapport à ceux qui suivent PC en terminale ?

Un peu moins de 70 % des élèves (soit 10 505) qui suivent NSI en terminale suivent la spécialité Maths. Parmi eux, seuls 32,9 % suivent l'option « Mathématiques expertes » (ME). La plupart des élèves ne suivant pas la spécialité Maths ne suivent pas une autre spécialité scientifique, et pas l'option « Mathématiques complémentaire » (MC) non plus. En revanche, 97,3 % des élèves suivant la spécialité PC (soit 123 108) suivent soit la spécialité Maths (65,8 %), soit la spécialité SVT (31,4 %). 56 % des premiers suivent l'option ME et 82 % des seconds suivent l'option MC. Donc l'essentiel des élèves qui suivent PC suivent une autre spécialité scientifique et un enseignement de mathématiques. Ils sont donc bien mieux armés (et près de douze fois plus nombreux) que les élèves qui suivent NSI pour poursuivre des études scientifiques.

NSI, une spécialité de plus en plus abandonnée entre la première et la terminale

Les effectifs de 2025 sont ceux de 2020

Près de 60 % d'abandon de NSI entre première et terminale

Les effectifs pour NSI

La baisse de 2006 élèves en terminale en 2025 s'explique par la baisse de 2052 élèves observée en première en 2024. Mais en 2025, le nombre d'élèves de première baisse à nouveau de 2102 élèves ! Et cela se répercutera mécaniquement sur les effectifs de terminale de 2026. En 2025, les effectifs de première sont de 34 803 élèves. Ils sont revenus à très peu près aux effectifs de la première année de la réforme, soit 34 721 élèves (cf. figure 4).

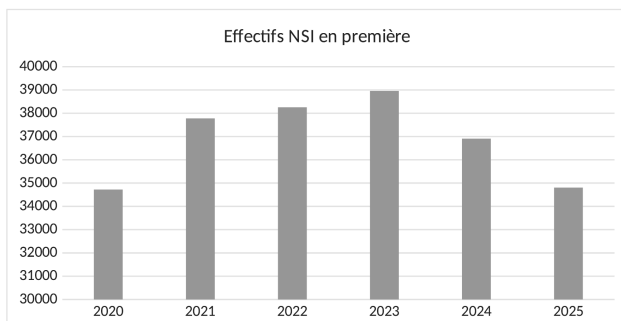


Fig. 4. Effectifs NSI en première entre 2020 et 2025.

Les taux d'abandon pour les spécialités scientifiques

Le taux d'abandon de NSI, déjà très élevé les années précédentes, poursuit sa croissance : en 2025, 59,2 % des élèves ayant choisi NSI en première l'abandonne en terminale, alors que le taux d'abandon des mathématiques se stabilise autour de 33 % (cf. figure 5). L'abandon de la spécialité SVT demeure à un peu moins de 40 % et celui de la spécialité PC à moins de 30 %. Le taux d'abandon de la spécialité SI approche 70 %.

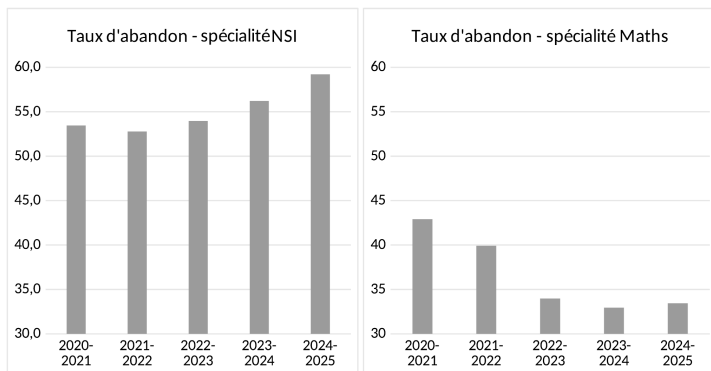


Fig. 5. Abandon des spécialités NSI et Maths entre la première et la terminale. (Taux d'abandon *moyen* : de 3 à 2 spécialités : -33%.)

La baisse importante des effectifs de première pour NSI s'ajoute à l'augmentation du taux d'abandon entre première et terminale pour conduire à une forte baisse depuis 2 ans de cette spécialité. Il en est de même pour la spécialité SI pour des effectifs environ trois fois plus faibles.

Combien de filles en spécialité NSI ?

Près de 99% des filles n'étudient pas NSI en terminale

Le nombre de filles en NSI baisse de 10% en un an

La spécialité NSI

Le nombre de filles en NSI avait baissé de 81 en 2024. Il baisse de 260 en 2025. La baisse est de 10% cette année, certes un peu moindre que celle de l'ensemble des élèves, pour arriver au niveau particulièrement bas de 2332, et ce d'autant plus que les filles représentent plus de 55% des élèves. En 2025, seules 1,1% des filles ont choisi NSI en terminale. La proportion de filles en terminale en NSI passe de 15,2% en 2024 à 15,5% en 2025. L'objectif des 30% de filles en NSI fixé par le ministère demeure inaccessible. En première, le taux de filles passe de 19,1% à 19,3% en NSI mais dans un contexte de baisse des effectifs. Enfin, alors que les filles représentent 44,8% des élèves qui suivent la spécialité Maths, elles ne sont que 12,3% pour la doublette Maths-NSI.

Les filles dans les autres spécialités scientifiques

Le taux de filles de la spécialité PC croît de 46,6% à 47,5%, et celui de la spécialité SVT de 63,3% à 64,8%. Celui de la spécialité Maths demeure à 44,8% et celui de la spécialité SI est en repli, de 14,7% à 14,2%. Le taux de filles toutes spécialités confondues repart à la hausse, de 55,3% à 55,6%, après plusieurs années de baisse. La spécialité NSI demeure, avec la spécialité SI, tout en bas du tableau, loin derrière toutes les autres spécialités, en matière de taux de filles. En première, toutes les triplettes incluant les spécialités NSI ou SI ont un taux de filles inférieur à 19%, alors que toutes les autres triplettes ont un taux de filles supérieur à 35%, avec, par exemple, un taux de filles de 59,6% (en hausse de 0,6 point) pour la triplette Maths-PC-SVT, la plus nombreuse.

NSI et les autres spécialités scientifiques

NSI ne représente que 2% des choix de spécialité

Maths, PC et SVT représentent 51% des choix de spécialité

La doublette Maths-NSI baisse de 11,7% pendant que la doublette Maths-PC progresse de 4,7%. La doublette Maths-SI perd 3,4%. Mais c'est surtout en effectifs que les évolutions sont frappantes : la doublette Maths-NSI perd 144 élèves pendant que la doublette Maths-PC en gagne 1700 ! Et la doublette PC-SVT gagne 2296 élèves. Toutes les principales doublettes scientifiques progressent, sauf celles liées à NSI et SI.

La baisse de la part de la triplette Maths-PC-NSI entamée en 2024 en passant de 5,3% à 5,1%, se poursuit en 2025 en passant à 5%. En effectifs,

elle est revenue à son niveau de 2022. En revanche, après avoir chuté très fortement au moment de la réforme, les spécialités scientifiques Maths, PC et SVT restent à un niveau de 51 % des choix de spécialités entre 2020 et 2025. NSI représente 2 % des choix (en baisse), et SI, 0,7 % (en baisse). L'effet balancier bénéficie principalement à la spécialité Maths, au détriment des spécialités SVT, NSI et SI.

Le baccalauréat 2025 en bref

Le taux de réussite au bac général en 2026 est de 96,2 % (en hausse par rapport à 2024). La doublette Maths-PC représente 21,3 % des bacheliers, la doublette PC-SVT, 9,7 %, la doublette Maths-SVT, 6 %, soit au total 37 % des bacheliers. La doublette Maths-NSI représente 3,1 % des bacheliers, et aucune doublette incluant la spécialité SI n'apparaît dans les quinze premières doublettes. La réussite des filles est de 1,5 point supérieure à celle des garçons⁵.

Pour conclure

Évolution de NSI sur six ans

Jusqu'ici, la spécialité NSI a connu trois périodes : sur les trois premières éditions, les indicateurs ont été dans l'ensemble en hausse mesurée, mais à un niveau initial très bas. Sur les deux éditions suivantes, les mêmes indicateurs ont été stables ou en légère baisse. L'édition 2025 ouvre une troisième période : celle de la forte baisse. *Les effectifs baissent*, en première comme en terminale, de près de 12 %. En outre, *le taux d'abandon, très haut depuis le début de la réforme, poursuit sa hausse*. Ces deux éléments, conjugués, entraîneront une nouvelle baisse significative a minima en terminale à la rentrée 2026. En outre, *le taux de filles demeure à un niveau particulièrement bas* et n'évolue ni en première, ni en terminale. Enfin, *seuls 23 % des élèves suivant NSI choisissent l'option « Mathématiques expertes »*, pourtant décisive pour réussir, par exemple, en classes préparatoires scientifiques.

Pourquoi NSI n'évoluera plus à la hausse

La démographie actuelle du lycée et celle des années à venir sont à la baisse de près de 7000 élèves depuis 2023 (dont plus de 4000 filles). Six ans après la réforme, les équilibres entre spécialités se stabilisent. Depuis quatre ans, une douzième spécialité, « Éducation physique, pratiques et culture sportives », a été créée et est en forte croissance. Enfin, près de 99 % des filles ne

5. En CPGE scientifiques, le nombre de femmes baisse de -0,1 % (redoublantes : +5,2 %) et le nombre d'hommes augmente de 2,2 % (redoublants : +1,1 %). Le taux de femmes demeure inférieur à 30 %.

suivent pas la spécialité NSI en terminale, et ce depuis le début de la réforme. Impossible, dans un tel contexte, que la spécialité NSI puisse se développer.

Par ailleurs, l'ensemble des spécialités scientifiques plus nombreuses qu'avant la réforme puisqu'il inclut NSI, concerne bien moins d'élèves qu'avant la réforme, et chaque élève n'étudie, en terminale que deux spécialités, contre trois en terminale S. L'enjeu n'est donc pas strictement d'augmenter le nombre d'élèves qui choisissent NSI, mais plus largement d'augmenter le nombre d'élèves qui étudient des sciences, et le nombre de sciences étudiées par chaque élève, dont NSI. De plus, alors que le nombre de lycées proposant la spécialité NSI augmentait chaque année, il est maintenant à la baisse : quasiment plus aucun lycée n'ouvre la spécialité alors que certains la ferment.

Et le plan « Filles et maths » ?

Dans cet état d'esprit, le plan « Filles et maths » a été mis en place en 2024 par É. Borne. L'objectif principal : +5000 filles par an en maths jusqu'à 2030, avec l'espoir implicite que cela augmenterait le nombre de filles en sciences et donc le nombre de filles se destinant à des études et des métiers scientifiques. Pourquoi cet objectif de +30 000 filles en 6 ans ? Parce qu'avant la réforme, 100 000 filles étudiaient les mathématiques, et qu'elles sont 70 000 actuellement. Il est vrai qu'elles avaient augmenté de près de 14 000 entre 2021 et 2023, mais en partant d'un effectif anormalement faible pendant la pandémie. Entre 2024 et 2025 le nombre de filles aurait donc dû augmenter de 5000. En réalité, il est passé de 70 260 à 70 312 filles, soit une augmentation de... 52 filles seulement ! L'effet d'entraînement souhaité n'a pas eu lieu.

Vers une réforme de la réforme ?

L'aménagement de la structure du lycée général n'est pas à l'ordre du jour. Il ne le sera sans doute pas avant les prochaines échéances électorales nationales. Proposons donc, indépendamment des calendriers politiques, des pistes d'amélioration, non pas de la situation spécifique de la spécialité NSI, mais plus largement de la formation des élèves qui se destinent à des études et des métiers en informatique :

- *le maintien de trois spécialités en terminale*, pour que les élèves n'hésitent plus entre trois mauvais choix en terminale : abandonner les mathématiques, abandonner toute spécialité scientifique autre que les spécialités Maths et NSI, et... abandonner NSI ;
- *le rééquilibrage entre sciences et sciences humaines*. Actuellement, un élève peut suivre entre 50 % et 90 % d'enseignement en sciences humaines, mais il ne peut suivre qu'entre 10 % et 50 % de sciences, au regard du tronc

commun qui constitue 55 % des enseignements, principalement en sciences humaines ;

- la mise en place d'une option « *Informatique complémentaire* » en terminale, de 3 heures, par analogie à l'option Mathématiques complémentaires ;
- l'évolution de l'enseignement Sciences numériques et technologie en un réel enseignement d'informatique, en lien direct avec la spécialité NSI de première.

Les deux premières possibilités sont structurelles, profondes, et n'auront un effet qu'à long terme. Mais elles sont à la hauteur des enjeux socio-économiques et géopolitiques actuels. Une réforme du lycée, même forte et positive, n'a d'effet sur l'emploi qu'au plus tôt huit ans après. Or le dérèglement climatique, les crises de l'énergie et les conflits armés mondiaux n'attendent pas. Et l'informatique joue un rôle clé dans la plupart des métiers de cadre, rôle renforcé brutalement par les bouleversements amenés par l'intelligence artificielle. Les deux dernières possibilités sont plus conjoncturelles, d'effet plus limité, mais aisées à mettre en place sans rien changer à la structure du lycée. Convient-il de privilégier ces aménagements modestes à court terme ? Ou bien travaille-t-on exclusivement dans une perspective à long terme d'un amendement significatif de la réforme du lycée ? L'urgence socio-économique d'une part, et les effets majeurs d'une réforme structurelle d'autre part suggèrent qu'il est pertinent de suivre les deux pistes simultanément.

2025 : si mon lycée m'était compté...

(en 1024 caractères, blancs inclus)

Première NSI

34 803 élèves

Baisse en 1 an : 2102 élèves (-6%)

9,2% des élèves en NSI :

– garçons : 16,8% ; filles : 3,2%

4,7 garçons et 0,9 fille en moyenne par lycée

Taux de filles : 15,5%

Terminale NSI

15 055 élèves

Baisse en 1 an : 2006 élèves (-11,8%)

4% des élèves en NSI :

– garçons : 7,7% ; filles : 1,1%

10,4 garçons et 2,5 filles en moyenne par lycée

Taux de filles : 19,3%

Rang de NSI

9^e sur 12 spécialités

En Informatique et Sciences du numérique en terminale avant la réforme

– 50% d'élèves en plus en 2017 qu'en NSI

– Taux de filles : 23%

Taux d'abandon

59,2% des élèves en NSI en première l'abandonnent en terminale

Autres spécialités en terminale

Variation en élèves en 1 an :

– Maths : -115 ; PC +4123 ; SVT : +3989

70% des élèves suivant NSI suivent Maths

– 32,9% d'eux suivent l'option Maths expertes

65,8% des élèves suivant PC suivent Maths

– 56% d'eux suivent l'option Maths expertes

31,4% des élèves suivant PC suivent SVT

– 82% d'eux suivent l'option Maths comp.

Taux de filles :

– Maths : 44,8% ; PC : 47,5% ; SVT : 64,8%

Comment créer des missions cryptographiques ?

Anaïs Durand

IREM de Clermont-Ferrand, LIMOS, université Clermont Auvergne

Séverine Fleury

IREM de Clermont-Ferrand

Pascal Lafourcade

IREM de Clermont-Ferrand, LIMOS, université Clermont Auvergne

Marianne Mognos

IREM de Clermont-Ferrand

Malika More

IREM de Clermont-Ferrand, LIMOS, université Clermont Auvergne

Cet article propose de découvrir un site permettant de créer des énigmes cryptographiques pour construire une activité collaborative à réaliser dans un cadre scolaire, universitaire ou grand public. Plus d'une cinquantaine de concepts cryptographiques, dans une version débranchée, sont proposés au choix de l'enseignante ou de l'animateur. Les énigmes sont conçues pour être utilisées du cycle 3 à la fin du lycée, et au-delà. Grâce à ce site, il est possible de générer une mission cryptographique personnalisée avec tous les fichiers (et les corrections) pour la mettre en œuvre.

Introduction

Depuis les révélations d'Edward Snowden en 2013, le grand public a pris conscience que la sécurité informatique et la cryptographie sont des disciplines à part entière et qu'elles concernent tout le monde. Ces domaines sont ainsi devenus des incontournables de l'éducation au numérique. Cependant,

les concepts mathématiques mis en jeu sont souvent complexes et peuvent demander un niveau licence ou master pour être abordés [1, 2, 3]. À première vue, il semble donc que cette science soit hors de portée d'écoliers, de collégiens ou de lycéens.

Les *missions cryptographiques* permettent d'illustrer des mécanismes cryptographiques aussi bien historiques que modernes et de les faire vivre concrètement aux participantes et aux participants. Cela peut paraître ambitieux, mais des expérimentations dans des classes de tous niveaux depuis plusieurs années ont montré qu'en s'amusant en groupe et en autonomie, les élèves, et même les adultes, sont capables de comprendre et de résoudre de nombreux défis.

Dans l'objectif de permettre au plus grand nombre de collègues de mettre en œuvre cette activité, cet article présente le site *Mission crypto*¹ permettant de créer des missions cryptographiques personnalisées, en choisissant en quelques clics le nombre, le type et la difficulté des énigmes qui les constituent². La figure 1 présente la page d'accueil du site.

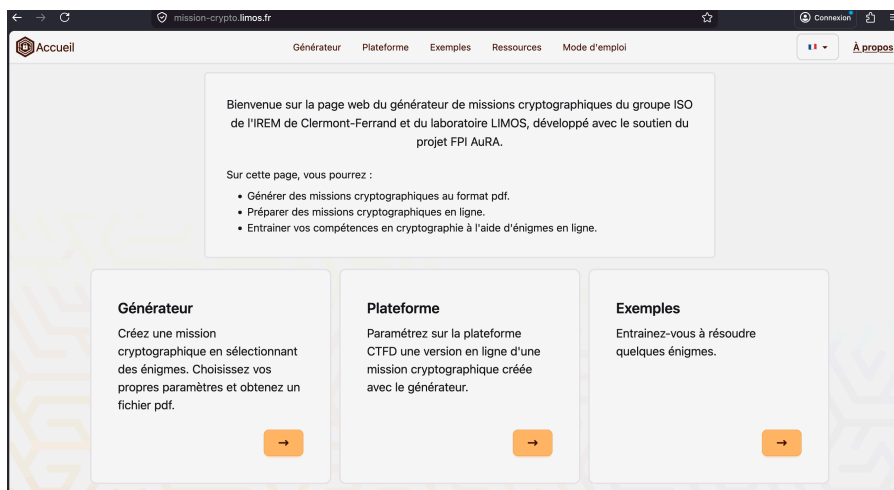


Fig. 1. Page d'accueil.

1. <https://mission-crypto.limos.fr>.

2. Cette action a été cofinancée par le projet FPI AuRA, une opération soutenue par l'État dans le cadre de l'AMI « Compétences et métiers d'avenir » du programme France 2030, opéré par la Caisse des dépôts (la Banque des territoires).

L'informatique sans ordinateur

Nous sommes convaincus que certains concepts fondamentaux de la science informatique peuvent être enseignés en partie grâce à des activités sans ordinateur, permettant découverte, réflexion et prise de recul, d'une manière complémentaire de celles qui se déroulent sur des machines. Cette drôle d'idée a été popularisée par le néo-zélandais Tim Bell [4] dans les années 1990. Dans cette démarche, les activités donnent l'occasion aux élèves de se concentrer sur les concepts informatiques, sans être distraits par les facilités et les difficultés liées à l'utilisation des objets numériques. Dans cet esprit, toutes les énigmes de cryptographie proposées sont réalisables à l'aide d'un papier, d'un crayon (parfois aussi d'une règle et de ciseaux), et surtout d'une bonne dose de curiosité et de réflexion.

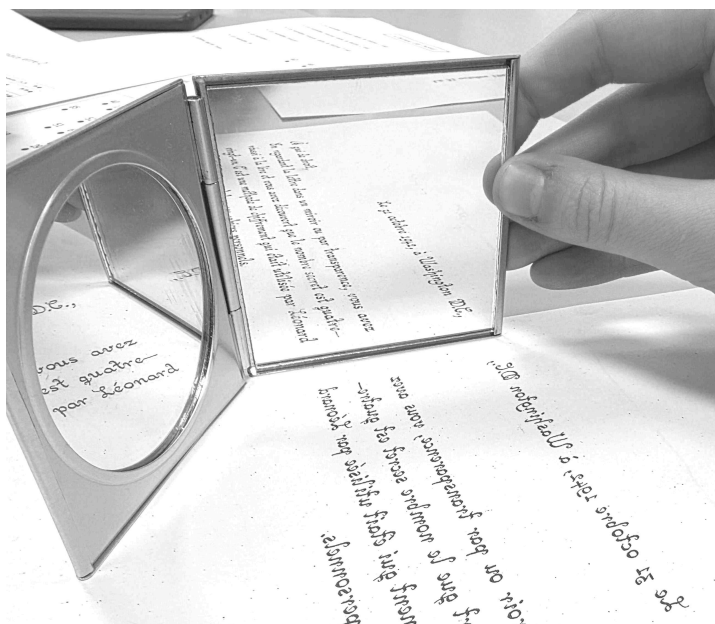


Fig. 2. De l'autre côté du miroir.

Quelques exemples d'énigmes

Le site propose plus d'une cinquantaine d'énigmes, qui s'inspirent de chiffrements classiques, mais aussi de concepts cryptographiques modernes.

Parmi les chiffrements classiques, il y a bien sûr le chiffre de César et celui de Vigenère mais aussi le chiffre du parc à cochons (*pig pen*) des francs-maçons, et celui des hommes dansants de Sherlock Holmes. Certaines énigmes s'inspirent de machines cryptographiques historiques, comme la machine Sphinx, le cylindre de Jefferson, la scytale grecque ou la célèbre machine Enigma. Comme la notion de chiffrement par substitution est très proche de celle de codage, le code Braille, le code Morse, le code des drapeaux maritimes, etc. ont été inclus.

Certaines énigmes permettent également d'aborder des notions plus avancées ou plus modernes : les attaques par canal caché, les preuves sans divulgation de connaissance, le renseignement d'origine sources ouvertes, la cryptographie visuelle, la stéganographie, la sécurité des mots de passe, etc.

De nombreuses autres énigmes sont encore en projet (comme celles présentées dans les ouvrages [5] et [6]), sur la *blockchain*, sur les chiffrements homomorphes, sur la cryptographie postquantique, etc. Le site continue d'être alimenté pour qu'il s'étoffe au fil des créations et découvertes des auteurs³.

Construire une mission cryptographique

Le site *Mission crypto*¹ a été conçu de manière à pouvoir générer des missions adaptées à différents publics et pour différentes occasions. Il a été utilisé pour préparer des séances dans des classes du cycle 3 au supérieur, mais aussi pour des animations de type fête de la Science, Semaine des mathématiques, stage MathC2+, liaison École-Collège, Journée portes ouvertes, festival Les nuées ardentes (avec plus de 3000 participants chaque année).

Qu'est-ce-qu'une mission cryptographique ?

Il s'agit d'une série de lettres permettant d'accéder à un secret en résolvant des énigmes cryptographiques :

- la lettre d'introduction présente la mission et son but ;
- le corps de la mission est constitué par un nombre variable de lettres, proposant chacune une énigme cryptographique, et dont la solution est un nombre ;
- la lettre de conclusion présente une dernière énigme, utilisant tous les nombres trouvés dans les lettres précédentes, et dont la solution est un dernier nombre. Lors des séances animées par les auteurs, ce dernier nombre permet d'ouvrir le cadenas d'un coffre contenant généralement des bonbons.

3. Les propositions d'énigmes de la part des lecteurs de 1024 sont les bienvenues.

La figure 3 présente la page de création d’une mission composée de cinq énigmes. La première porte sur la cryptanalyse de la machine Sphinx, commercialisée vers 1930 par la Société des codes télégraphiques de Georges Lugagne à Marseille, la seconde énigme utilise les fameux hommes dansants de Sherlok Holmes, la troisième propose un codage musical, la quatrième est une initiation à la rétro-ingénierie d’un programme et enfin, la dernière énigme illustre le concept de preuve à divulgation nulle de connaissance (zero knowledge proof, ZKP). Ensuite l’utilisateur du site va pouvoir choisir le début et la fin de la mission, effectuer le réglage de divers paramètres et configurer le secret de chaque énigme.

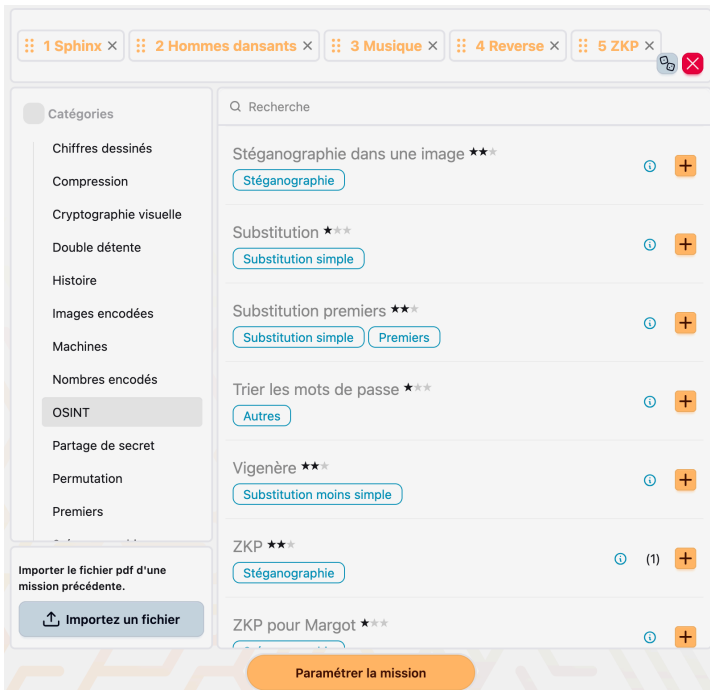


Fig. 3. Page de création d’une mission.

Que fait le site ?

Le site *Mission crypto*¹ permet de créer sur mesure une mission de façon à l’adapter au temps disponible et au public visé :

- le nombre de lettres du corps de la mission est paramétrable ;
- plus d’une cinquantaine d’énigmes différentes sont proposées ;

- l'ordre des lettres du corps de la mission est modifiable ;
- il est possible d'utiliser plusieurs fois la même énigme, avec des solutions différentes et, chaque fois que cela s'y prête, une clé de chiffrement différente ;
- le type de l'énigme de la lettre de conclusion est à choisir parmi plusieurs possibilités de difficultés différentes ;
- la date et la signature des lettres sont personnalisables, de même que les textes des énigmes ;
- les nombres constituant les solutions des énigmes peuvent être choisis aléatoirement par le site ou fournis par l'utilisateur. Dans tous les cas, le site vérifie que les nombres sont cohérents avec les contraintes de la lettre de conclusion, selon le type choisi.

Une fois ce paramétrage effectué, le site génère l'ensemble des fichiers nécessaires aux formats Latex et PDF : l'introduction, les énigmes, la conclusion et un carnet de bord pour noter les réponses. Bien entendu, les solutions sont aussi fournies pour que le maître du jeu puisse aider les participantes et les participants et vérifier leurs réponses.

Cerise sur le gâteau, il est possible de créer une version en ligne, totalement dématérialisée, de la mission. Cette fonctionnalité est utile pour éviter d'imprimer lorsque des ordinateurs connectés sont disponibles. En effet, le site permet en un clic de créer une instance de CTFd, une plateforme *open source* de gestion de CTF (*capture the flag*⁴). Les comptes des personnes participant à la mission sont créés et elles accèdent aux énigmes au format PDF et suivent leur progression sur le tableau de bord de la plateforme. Lors d'un challenge en 2025, cette solution a permis à 200 personnes regroupées en équipes de 5 de s'affronter pendant deux heures.

Conception des énigmes

Chaque énigme a été élaborée dans le but d'illustrer un concept important en matière de cryptographie ou de sécurité informatique. La « mise en énigme » en est parfois simple et évidente, mais peut parfois aussi demander une longue réflexion et de nombreux essais. Ensuite, il faut donner assez d'indices pour que les personnes puissent avancer en autonomie en faisant appel à leur sens de l'observation, leur créativité et leur esprit de déduction. Pour finir, les énigmes sont testées plusieurs fois car une erreur ou une formulation ambiguë risquent de démotiver totalement les participantes et participants, voire rendre l'énigme impossible à résoudre.

4. *Capture the flag* est un jeu utilisé en cybersécurité pour simuler des attaques au cours desquelles l'on doit, par exemple, trouver un fichier caché dans un environnement informatique réputé confidentiel et sûr.

Conseils pour générer et animer une mission

Il est important d'adapter les énigmes et leurs énoncés au public visé (âge, compétences, temps imparti, nombre de personnes par groupe), pour proposer un défi de difficulté raisonnable et progressive, assurant la motivation du public.

Si la résolution des énigmes ne requiert pas de matériel particulier, il est préférable que tout le monde dispose d'une copie de l'énoncé. L'animateur ou l'animatrice peut choisir de distribuer les lettres une par une, deux par deux, etc., ou même toutes à la fois. Il est souhaitable de faire travailler les personnes par groupes de 3 à 5, cela fait partie de ce qu'elles disent souvent avoir beaucoup apprécié.

Les énigmes sont conçues pour un travail autonome. C'est pourquoi il semble préférable que le rôle de l'adulte qui supervise l'activité se limite à accompagner les participantes et les participants dans leurs recherches : n'intervenir que si nécessaire, pour les guider avec parcimonie, les empêcher de partir trop loin et de chercher des choses trop complexes, et donner, si besoin, quelques indices supplémentaires.

En revanche, il est conseillé de reprendre la main, une fois la mission terminée, pour expliciter ce qui a été découvert : cela permet de formaliser les découvertes avec les mots et les concepts correspondants, de faire décrire les méthodes de résolution utilisées, ce qui était difficile et comment ces défis ont été surmontés. Pour une séance d'une heure, il est recommandé de réserver au moins dix minutes pour cette étape de prise de recul et de mise en commun.

Conclusion

Le site *Mission crypto*¹ permet de créer des missions cryptographiques personnalisées. Elles constituent une manière ludique d'initier les élèves, les étudiants et le grand public à des concepts fondamentaux de cryptographie et de sécurité informatique. Les collègues sont encouragés à s'en saisir, pour adapter leurs énigmes préférées à leur public, au temps disponible et à la forme qu'ils souhaitent donner à «leur» mission cryptographique. Cela constitue une bonne initiation à la cryptographie moderne. Ces énigmes sont également utilisées dans des cours, TD, TP ou examens dans le supérieur.

Remerciements

L'auteur et les autrices tiennent à remercier Cédric Lauradoux pour son inspiration et son aide dans la création de cette activité, ainsi que les nombreux enseignants et enseignantes, élèves, étudiantes et étudiants qui ont testé leurs diverses énigmes expérimentales depuis des années.

Références

- [1] J.-G. Dumas, J.-L. Roch, S. Varette & É. Tannier. 2018. *Théorie des codes — Compression, cryptage, correction*. Dunod.
- [2] J. Katz & Y. Lindell. 2020. *Introduction to Modern Cryptography*. Chapman and Hall/CRC.
- [3] P-A. Fouque, P. Lafourcade, L. Perret. 2026. *Cryptographie post-quantique*. Dunod.
- [4] T. Bell, I. H. Witten, M. Fellows. 1998. *Computer Science Unplugged... offline activities and games for all ages*.
- [5] P. Lafourcade, M. More. 2024. *25 énigmes ludiques pour s'initier à la cryptographie*. 2nd ed. Dunod.
- [6] P. Lafourcade, C. Onete. *20 énigmes ludiques pour se perfectionner en cryptographie*. Dunod.

On clique, on consomme, on pollue

La nuit de l'info 2025 casse les codes du numérique !

Le bureau de la nuit de l'info

La 19^e édition de *La nuit de l'info* s'est tenue dans la nuit du 4 au 5 décembre 2025. Cet événement, désormais incontournable, a rassemblé environ 6650 participants – soit une augmentation de 30% par rapport à 2024 – répartis sur 78 sites en France, mais aussi en Tunisie, en Mauritanie, au Cameroun et dans d'autres pays.

Pour rappel, *La nuit de l'info* est une compétition nationale qui réunit chaque année des étudiants (de bac à bac + 8), des enseignants et des entreprises. Le principe est simple : les participants ont une nuit pour développer une application en réponse à un sujet national, tout en relevant des défis proposés par des entreprises partenaires. Cette année, plusieurs lycées ont également pris part à l'aventure.

Un sujet engagé : le numérique responsable

Le thème de cette édition a été proposé par le ministère de l'Éducation nationale, dans le cadre de la démarche NIRD (numérique inclusif, responsable et durable). Cette initiative encourage les établissements scolaires à développer des projets numériques utiles, pédagogiques et responsables. L'objectif ? Ne pas se contenter d'utiliser le numérique, mais le comprendre, le créer et le rendre plus vertueux.

Grâce à la démarche NIRD, les enseignants peuvent mener des projets motivants autour du numérique, transformant les élèves en acteurs et créateurs plutôt qu'en simples utilisateurs. Adhérer à cette démarche renforce aussi l'image d'un lycée dynamique, innovant, maître de son budget et de son indépendance numérique.

Un défi centré sur la communauté

Pour cette 19^e édition, le défi consistait à créer une application web aidant les élèves, enseignants, familles et collectivités à comprendre comment un établissement peut réduire ses dépendances numériques et s'engager dans la démarche NIRD. Les solutions proposées ont été variées :

- des outils interactifs pour évaluer les bénéfices de la démarche ;
- des mini-sites narratifs ;
- des tableaux de simulation ;
- des interfaces ludiques ;
- des jeux, etc.

Contrairement aux éditions précédentes, le sujet n'était pas axé uniquement sur la technologie, mais sur la *collaboration* et la *communauté*. Cela a permis aux participants venant d'horizons moins techniques de proposer des idées originales, sans avoir à démontrer des compétences purement technologiques. Certains « technophiles » ont dû adapter leurs solutions pour privilégier l'engagement des visiteurs plutôt que la simple démonstration de savoir-faire.

Des résultats créatifs et inspirants

Plus de 900 projets ont été soumis, et environ 90 ont été présélectionnés. Trois lauréats ont finalement remporté les trophées de *La nuit de l'info*, grâce à des solutions collaboratives, informatives, ludiques et communautaires, incitant les visiteurs à s'investir dans la démarche NIRD.

Forte du succès obtenu cette année, l'équipe de *La nuit de l'info* prépare déjà la 20^e édition – un anniversaire spécial !

Rendez-vous les 3 et 4 décembre 2026 pour une nuit encore plus mémorable.

Références

[1] Site de la démarche NIRD, <https://nird.forge.apps.education.fr/>.

[2] Site de *La nuit de l'info*, <https://www.nuitdelinfo.com/>.

Le bureau de *La nuit de l'info* :

Céline Auzias, Carole Blanc, Maxime Devanne, Stéphane Isnard,
Stéphane Ribas, David Roumanet et Rémi Synave.¹

1. Les personnes ayant créé cet événement, *La nuit de l'info*, sont Pierre-Alain Muller, Sébastien Mosser et Mireille Blay-Fornarino.

Optimisation coûteuse¹ : où en sommes-nous et que faire maintenant ?

Denis Pallez

Université Côte d'Azur, CNRS, I3S

Introduction à l'optimisation

Optimiser un problème fait partie du domaine de la recherche opérationnelle² qui se définit comme la mise en œuvre de méthodes scientifiques permettant d'identifier les meilleures solutions x^* parmi un ensemble Ω de solutions possibles x , également dénommées *échantillons* dans la suite de cet article. Ω est appelé *espace de recherche*. Pour savoir si un échantillon est le meilleur, les méthodes se fondent sur une fonction f qui définit la qualité des décisions, dénommée fonction objectif. Identifier le meilleur échantillon consiste à optimiser (minimiser ou maximiser) cette fonction et se formalise à l'aide de l'expression (1) pour la minimisation.

$$x^* = \arg \min_{x \in \Omega} f(x) = \{f_1(x), \dots, f_n(x)\}$$

$$\text{avec } \begin{cases} g_i(x) \leq 0, & i = 0, \dots, p & p \geq 0 \\ h_j(x) = 0, & j = 0, \dots, q & q \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Dans l'espace de recherche, il est possible qu'un certain nombre d'échantillons ne soient pas « réalisables ». Cette faisabilité s'exprime sous forme de contraintes à l'aide d'égalités h_j ou d'inégalités g_i sur x pour inclure ou exclure une partie de Ω . Pour faciliter la résolution, les contraintes d'égalités sont

1. Cet article est une adaptation française de l'article *Expensive Evolutionary Computation: Where Are We, and What's Next?* https://doi.org/10.1007/978-3-032-23607-4_18.

2. Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision (ROADEF), <https://roadeff.org>.

souvent transformées en contraintes d'inégalités ($|h_j(x)| - \varepsilon \leq 0$ pour une valeur positive de ε « très » petite, par exemple $\varepsilon \approx 10^{-4}$).

La qualité d'un échantillon s'exprime souvent à l'aide d'une seule valeur réelle ($n = 1$) et dans ce cas, on parle d'optimisation mono-objectif ($f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, ou $f : \Omega \rightarrow [0, 1]$ pour une version normalisée) mais il est possible de devoir gérer plusieurs critères ($n > 1$) et dans ce cas, on parle d'optimisation multiobjectif ($f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$) ou *many-objective* ($n > 3$). Par exemple, identifier le plus court chemin entre deux villes peut être le résultat de la minimisation simultanée du temps de déplacement et de la distance parcourue, auxquels il est possible d'ajouter un critère de coût du transport. Souvent, cette optimisation simultanée est réduite à une optimisation mono-objectif quand une préférence est connue sur les objectifs en transformant le problème en une combinaison linéaire sur les critères affectés de leur poids (scalarisation). Dans le cas contraire, quand les critères doivent être considérés indépendamment l'un de l'autre comme le temps et la distance, la notion d'optimalité est redéfinie grâce au concept d'efficacité où aucun objectif n'est plus important qu'un autre et est formalisé par la relation de dominance ($\prec$) introduite par Pareto [37]. Dans ce cas, plusieurs solutions optimales sont possibles, au moins une pour chaque objectif, correspondant aux meilleurs compromis possibles entre les différents critères. Indépendamment du nombre de critères, quand plusieurs solutions optimales existent ($|x^*| > 1$), on parle d'optimisation multimodale [40].

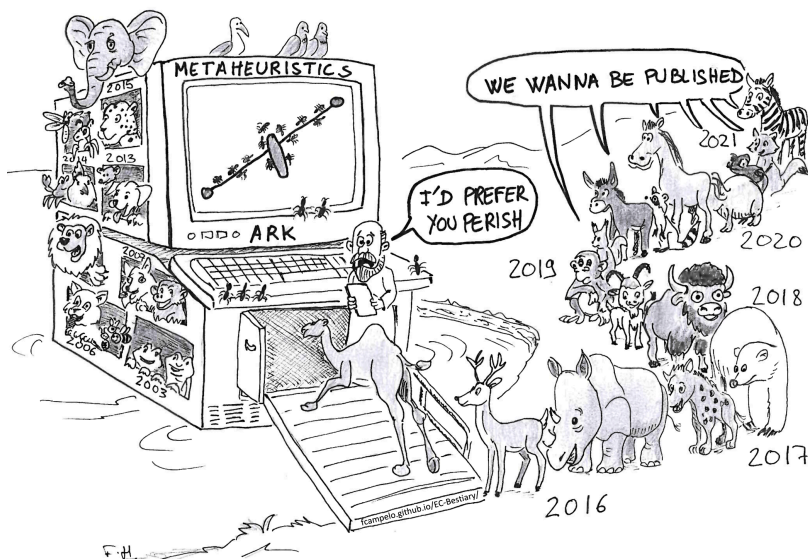
Un échantillon x est souvent caractérisé par plusieurs paramètres $x = (x_1, \dots, x_m)$. Si tous les paramètres x_i sont réels ($\Omega \subseteq \mathbb{R}^m$) alors on parle d'optimisation continue, s'ils sont entiers ($\Omega \subseteq \mathbb{Z}^m$), on parle d'optimisation discrète. S'ils représentent un ensemble de possibilités sans relation entre elles comme des villes par exemple, on parle d'optimisation combinatoire, et enfin d'optimisation mixte s'il y a une disparité des domaines de définition des paramètres (i.e. $\Omega \subseteq \mathbb{Z}^d \times \mathbb{R}^c$ avec $c, d > 0$).

Évolution artificielle

De nombreuses méthodes ont vu le jour pour résoudre les différents problèmes d'optimisation précédents et sont souvent classées en deux grandes catégories : les méthodes déterministes (ou exactes) et les méthodes non-déterministes (ou stochastiques). Les techniques déterministes (programmation linéaire et non-linéaire, programmation dynamique...) fournissent toujours la même solution même si elles sont exécutées à plusieurs reprises et assurent souvent l'optimalité globale de la solution. Toutefois, elles nécessitent souvent des informations sur la dérivée de la fonction objectif ou des contraintes, ainsi qu'un point initial approprié de Ω ; ce qui les rend inapplicables quand, par exemple, la fonction f n'est pas dérivable, pas

continue ou quand elle est fondée sur des simulations numériques (optimisation boîte noire). À l'inverse, les méthodes stochastiques, basées sur des heuristiques, n'utilisent pas d'information sur la dérivée mais échantillonnent itérativement la fonction objectif pour converger vers la solution optimale ou une solution relativement proche (sous-optimale) sans pour autant être capables d'assurer l'optimalité de la solution.

Lorsque l'heuristique utilisée n'est pas spécifique à un problème en particulier, on parle de métaheuristique. Ces méthodes ont la capacité de s'échapper d'optima locaux mais fournissent souvent des décisions différentes d'une exécution à l'autre. Elles sont connues pour être capables de traiter des problèmes NP-difficiles, ce qui implique que l'on ne connaît pas d'algorithme de décision fonctionnant en temps polynomial pour traiter ces problèmes. De nombreuses métaheuristiques ont été proposées. À partir de techniques classiques comme les algorithmes génétiques (*Genetic Algorithm* – GA) s'inspirant de la théorie de l'évolution de Darwin ou des colonies de fourmis (*Ant Colony Optimization* – ACO) reproduisant artificiellement le comportement des insectes, en passant par exemple par des techniques combinant méthode exacte et recherche globale (*memetic algorithm* [12]), ces vingt dernières années ont été marquées par une explosion de métaheuristiques basées sur des métaphores d'un processus naturel (comportement des poissons, abeilles, oiseaux...) voire surnaturel (algorithme des zombies ou de réincarnation) [8] à tel point que la communauté s'est insurgée contre cette pratique [7], [49] qui n'était qu'une conséquence malsaine du *publish or perish*.



La figure 1 représente le principe général de ces métaheuristiques faisant évoluer artificiellement une population d'échantillons de l'espace de recherche Ω (évolution artificielle) en combinant ces échantillons pour en produire de nouveaux dans l'espoir d'aboutir à une solution optimale ou sous-optimale dans un temps raisonnable fixé *a priori*. Même si ces techniques sont employées pour résoudre des problèmes NP-difficiles, [57] considère qu'elles font face à des problèmes de plus en plus difficiles que les auteurs définissent comme les défis des 5M (multidimension, multichangement, multioptimum, multicontrainte et multicoût) que l'on retrouve dans de nombreux contextes industriels ou réels.

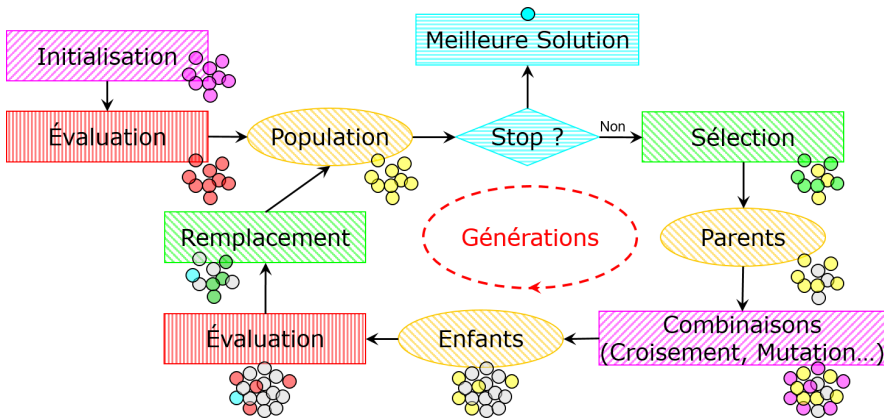


Fig. 1. Schéma général de l'évolution artificielle inspiré de la librairie logicielle *Evolving Object*.

Ces défis peuvent être caractérisés par de nombreux paramètres ($m \approx 1\,000$ à $10\,000$ par exemple), par une fonction objectif dynamique qui peut changer pendant le processus d'optimisation, par une fonction multimodale ayant de nombreux optima ($|x^*| \approx 8000$, *many-modal* [30]), par un problème défini par beaucoup de contraintes ($p + q$ relativement grand dans l'expression (1)) ou encore par une fonction dite coûteuse, que nous caractérisons dans la section suivante. Plusieurs conférences internationales sont dédiées à ces techniques comme *GECCO*³, *CEC*⁴, *PPSN*⁵, *Evo**⁶ ou encore *EA*⁷.

3. <https://dl.acm.org/conference/gecco>.

4. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/1000284/all-proceedings>.

5. <https://ppsn2026.disi.unitn.it>.

6. <https://link.springer.com/conference/evoapplications>.

7. <https://link.springer.com/conference/ae>.

Optimisation coûteuse

La frontière entre une optimisation coûteuse et non coûteuse n'est pas clairement établie et la définir correctement n'est pas chose aisée. De prime abord, ce qui caractérise le mieux une optimisation coûteuse est le nombre très limité de fois où la fonction objectif peut être utilisée. Il est difficile de donner un chiffre précis car cela dépend étroitement du problème à résoudre et des ressources disponibles. À notre connaissance, [24] est le premier à avoir formalisé un tel coût :

$$\text{Coût} = \frac{\mathcal{O}(\text{Algorithme}) \times \mathcal{O}(\text{Évaluation})}{|\text{Processeurs}|} \quad (2)$$

où $\mathcal{O}(\text{Évaluation})$ représente le coût moyen en temps de chaque évaluation de la fonction objectif, $\mathcal{O}(\text{Algorithme})$ le coût moyen en temps de la méthode d'optimisation qui, elle aussi, peut être coûteuse, si, par exemple, elle est basée sur la construction de modèles d'approximation (*Surrogate-assisted evolutionary algorithm*). Il est naturel d'envisager le calcul intensif pour réduire le coût temporel en augmentant le nombre de processeurs ; toutefois, cela peut ne pas suffire pour faire en sorte que le problème ne soit plus coûteux. Et même si cette augmentation peut réduire le coût temporel (seul coût majoritairement considéré jusqu'à récemment), cela aura pour effet d'augmenter de manière non négligeable le coût financier ou énergétique. Alors que nous entrons dans une ère de sobriété, cela n'est pas souhaitable et devrait également être pris en considération.

L'optimisation coûteuse peut être induite par une fonction objectif basée sur un grand jeu de données (*data-driven optimization* [19]), ou par le fait que l'espace de recherche est bien trop vaste et qu'identifier un optimum prend du temps (*large-scale optimization* [32]). Certains considèrent également que l'optimisation multicritère (*multi-objective* ou *many-objective*) peut également être coûteuse car elle peut nécessiter beaucoup d'évaluations pour bien caractériser l'ensemble des compromis optimaux entre les différents critères (front de Pareto) [44]. C'est peut-être parce que ces types de problèmes (multiobjectif, à grandes dimensions, dynamiques, basés sur un grand volume de données...) sont assez bien formalisés et qu'ils peuvent être à l'origine d'une optimisation coûteuse que cette dernière n'est pas identifiée comme un axe de recherche significatif dans la communauté des métaheuristiques. En témoigne l'état de l'art de [9] et sa cartographie des différents domaines et sous-domaines de l'évolution artificielle où l'optimisation coûteuse est malheureusement absente.

Pourtant, grâce à Scopus⁸, nous avons calculé le pourcentage d'articles de recherche dont le résumé, le titre ou les mots clés utilisent les termes d'évolution

8. <https://www.scopus.com>, données récoltées en décembre 2023.

artificielle coûteuse entre 2000 et 2023 (*expensive + evolutionary + optimization*) parmi l'ensemble des articles du domaine (*evolutionary + optimization*). On peut constater que le pourcentage ne cesse d'augmenter (figure 2), ce qui montre que l'optimisation coûteuse est bien une thématique émergente qui prend de l'ampleur.

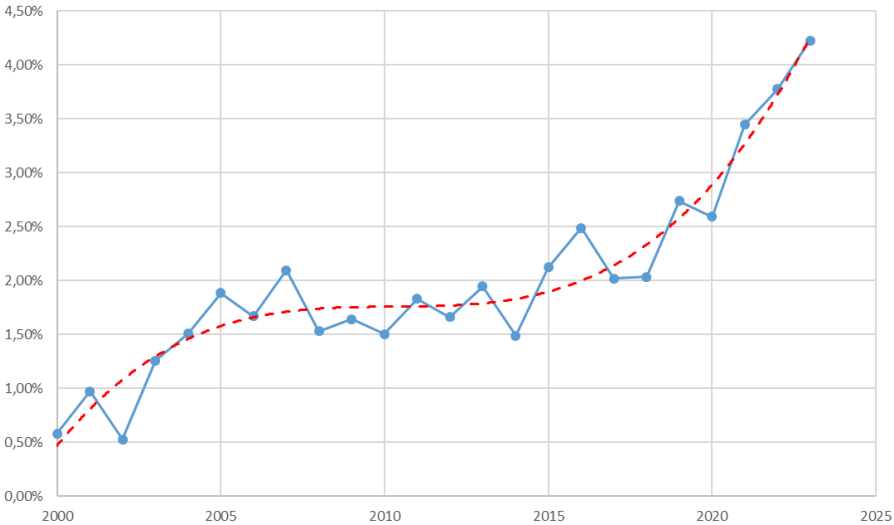


Fig. 2. Évolution du pourcentage d'articles (ligne brisée) traitant d'évolution artificielle coûteuse *Expensive Evolutionary Optimization*) et courbe de tendance (courbe en pointillés) sur les 25 dernières années.

Certains auteurs tentent même d'identifier les caractéristiques des problèmes d'optimisation réels *via* une enquête [6]. Sur 45 réponses, 42 % des problèmes mettent de plus d'une minute à plusieurs jours pour évaluer les fonctions objectif et sur les 34 problèmes possédant des contraintes, 30 % mettent un temps similaire pour évaluer le respect des contraintes ; ce qui n'est pas négligeable. Dit autrement, sur 45 problèmes, 27 % d'entre eux ne peuvent recourir qu'entre 10^2 et 10^3 fois à la fonction objectif ; ce qui caractérise assez bien un problème coûteux. Même si le nombre de réponses de l'enquête est assez limité et n'est pas suffisamment représentatif de tous les problèmes d'optimisation auxquels font face les ingénieurs ou chercheurs, il apparait clairement que les fonctions de test (*benchmarks*) construites par la communauté scientifique pour comparer les algorithmes présentent des lacunes. Dans [5], on propose une bibliothèque publique contenant quatre problèmes d'optimisation coûteux provenant de différentes applications

réelles afin de pouvoir comparer les algorithmes dédiés à la résolution de ce type de problème.

En considérant la formule (2) et comme le soulignent [24], [57], il existe trois grandes pistes pour améliorer la résolution d'un problème coûteux :

- minimiser le coût de la fonction objectif;
- minimiser le coût de l'algorithme d'optimisation et faire en sorte qu'il converge plus rapidement que d'habitude;
- augmenter les ressources affectées aux différents calculs en augmentant la part de calculs parallèles et distribués compte tenu du fait que les méta-heuristiques à base de population sont naturellement parallélisables.

Les sections suivantes présentent le point de vue de l'auteur sur chacune des catégories d'améliorations ci-dessus, en ajoutant quelques travaux et observations plus récents par rapport aux publications existantes sur le sujet. Le discours se poursuit ensuite par une conclusion et une section plus prospective qui présente plusieurs pistes de recherche.

Minimiser le coût de la fonction objectif

Les auteurs de [24] proposent une taxonomie contenant trois stratégies principales pour réduire le coût de l'évaluation des fonctions objectif et de respect des contraintes : la *simplification* du problème à optimiser, la *substitution multifidélité* et l'*approximation* des fonctions. La hiérarchie des stratégies abordées est illustrée dans la figure 3.

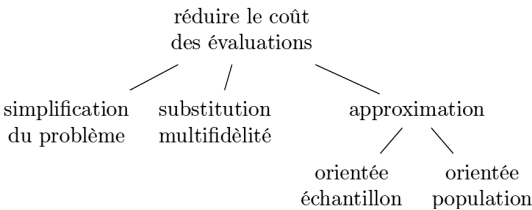


Fig. 3. Hiérarchie des stratégies pour réduire le coût d'évaluation des fonctions objectif et de la violation des contraintes.

L'objectif de la simplification du problème est de transformer un problème coûteux en une optimisation numérique du problème, par exemple en la basant sur de la simulation numérique, allégeant ainsi la charge de calcul du problème réel initial. Un exemple concret de ce type de stratégie est l'optimisation de structures aérodynamiques, pour laquelle les essais en soufflerie sont remplacés par des simulations numériques de mécanique des fluides en 2D ou 3D beaucoup moins coûteuses à réaliser [18]. Le principal inconvénient

de cette stratégie est qu'elle dépend de la nature du problème. Il n'est pas toujours possible de simplifier le problème initial afin d'en créer un moins coûteux. De plus, les auteurs omettent de mentionner la perte potentielle de précision qui peut survenir au cours du processus de simplification.

En revanche, la stratégie dite de *substitution multifidélité* prend en compte cette précision. Elle repose sur l'hypothèse forte que les évaluations sont basées sur des paramètres qui peuvent réduire le coût de l'évaluation au détriment de la précision du résultat. Le principe consiste à réaliser des simulations moins coûteuses ayant un niveau de précision assez faible afin d'explorer plus rapidement une zone intéressante de l'espace de recherche. Dans cette zone, des simulations plus précises peuvent être réalisées mais avec un coût d'évaluation plus important. Les évaluations coûteuses d'origine sont alors remplacées par un modèle multifidélité qui trouve un compromis entre des évaluations de différents niveaux de fidélité, par exemple avec une fidélité croissante au fil du temps. Des recherches récentes dans ce sous-domaine ont montré une préférence pour la combinaison de plusieurs modèles multifidélité [22]. Cependant, cette stratégie n'est pas applicable à tous les problèmes coûteux, même si elle est très prometteuse.

À l'inverse, la stratégie d'*approximation* s'applique à la fois aux évaluations coûteuses des objectifs et aux évaluations du respect des contraintes. Cette approche consiste à créer des modèles d'approximation qui tirent les leçons des évaluations coûteuses précédentes afin de prédire l'évaluation de nouveaux échantillons à moindre coût. Elle est largement adoptée dans la littérature [16] car elle peut être appliquée à de nombreux domaines sans hypothèse forte. Cependant, une question clé consiste à déterminer quels échantillons sont évalués à l'aide d'une évaluation coûteuse et lesquels sont approximés à l'aide d'un modèle d'approximation.

C'était également le cas pour son ancêtre, l'*héritage des évaluations* [48], qui déduit la valeur de la fonction objectif d'un échantillon à partir des valeurs de ses parents. [17] explique qu'il existe deux méthodes pour combiner les évaluations coûteuses (appelées *contrôlées* dans ce contexte) et les évaluations approximatives. La première consiste à diviser la population en deux parties, une petite partie étant contrôlée et l'autre approximée (contrôle de l'évolution basé sur les *échantillons*). L'autre méthode consiste à contrôler ou à approximer l'ensemble de la population (contrôle basé sur la *population*). Dans les deux cas, il est nécessaire de déterminer le pourcentage d'individus contrôlés ou le nombre de générations approximées entre deux évaluations contrôlées. À notre connaissance, aucune valeur particulière ne se démarque au sein de la communauté, sauf pour les problèmes simples ou les fonctions de référence. Comme pour l'approche multifidélité, la combinaison de plusieurs modèles de substitution a donné de meilleurs résultats que l'utilisation d'un seul modèle. Récemment, les modèles d'approximation ont également été

adaptés à l'optimisation multiobjectif afin de prédire la dominance de Pareto des échantillons [29].

De nombreux travaux ont proposé de combiner des modèles multifidélité et d'approximation. Cependant, ils ont été critiqués pour avoir basé leurs comparaisons avec d'autres uniquement sur la qualité des échantillons obtenus ou le nombre d'évaluations coûteuses effectuées. Ils négligent de vérifier si le coût temporel des modèles d'approximation est inférieur à celui du modèle coûteux initial. Le plus souvent, le goulot d'étranglement est déplacé des évaluations coûteuses vers l'algorithme d'apprentissage lui-même. De plus, les techniques omettent également de rapporter cette information. Cela est dû à l'hypothèse sous-jacente selon laquelle les évaluations coûteuses des objectifs ou des violations de contraintes constituent le goulot d'étranglement. Et ignorer complètement le temps de calcul des modèles d'approximation peut conduire au développement de techniques trop lentes pour être utilisées dans la pratique. Pour combler ce manque, [5] propose une bibliothèque contenant quatre problèmes d'optimisation coûteux issus de différentes applications réelles afin de comparer les nombreuses stratégies basées sur des modèles d'approximation au sein de la communauté. Étant donné que la complexité de ces modèles augmente à chaque nouvelle évaluation de fonction, [54] conseille d'indiquer quand il est préférable d'utiliser une technique basée sur l'approximation plutôt que la fonction objectif coûteuse initiale.

Accélérer la convergence

Le concept d'amélioration de la convergence d'un algorithme n'est pas nouveau et n'est pas spécifique à l'optimisation coûteuse. Cependant, cet aspect nécessite beaucoup plus d'attention dans ce cas. Comme indiqué dans [38], les stratégies d'amélioration peuvent être mises en œuvre à n'importe quelle étape de l'évolution artificielle et sont résumées dans la figure 4.

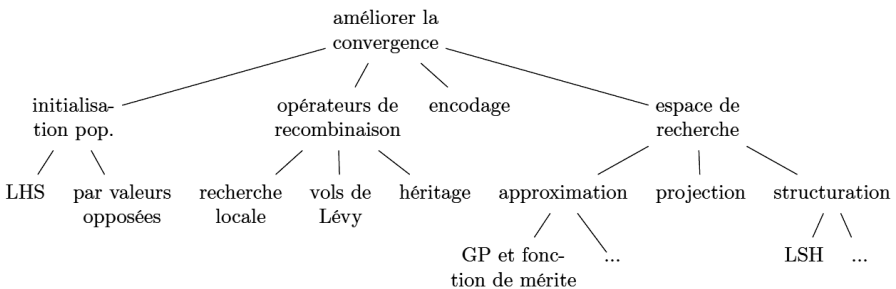


Fig. 4. Hiérarchie des stratégies pour améliorer la convergence.

Tout d’abord, la manière dont les individus sont codés (*encodage*) peut influencer la convergence, mais cela dépend entièrement du problème. À l’inverse, la construction de la *population initiale*, qui est indépendante du problème, a également été étudiée par le passé [21], [52]. Des techniques telles que l’échantillonnage par hypercube latin (*Latin hypercube sampling* – LHS), l’*initialisation par valeurs opposées* [31] et bien d’autres encore peuvent contribuer à garantir un certain degré de diversité lors de l’initialisation de la population, et ainsi favoriser une convergence plus rapide vers un optima. Des opérateurs de variation tels que la mutation et le croisement sont également utilisés pour améliorer la convergence, comme le conseil [57] en utilisant la recherche locale comme opérateur de mutation. Cependant, elle peut nécessiter de nombreuses évaluations, en particulier lorsque le voisinage de l’échantillon est très large. Cela peut poser problème dans un contexte d’optimisation coûteuse. Par conséquent, il est essentiel d’équilibrer correctement les évaluations classiques et celles dédiées à la recherche locale. Au lieu d’évaluer tous les voisins d’un échantillon et de garder le meilleur, il serait plus avantageux d’utiliser les vols de Lévy [47]. Il s’agit d’un mécanisme de marche aléatoire caractérisé par sa capacité à effectuer de grands sauts à des emplacements locaux avec une probabilité élevée. Cela permettrait d’obtenir des voisins plus diversifiées tout en réduisant le nombre d’évaluations.

La convergence de l’opérateur de croisement a également été étudiée par le passé, notamment grâce à l’héritage des évaluations (*fitness inheritance*) [42]. Cette technique est clairement identifiée comme une stratégie permettant de réduire le coût [24], [57]. La stratégie d’approximation discutée dans la section précédente diffère de l’héritage des évaluations car elle n’est liée à aucun opérateur génétique. Alors que l’approximation ne nécessite que le génotype d’un seul échantillon et le modèle appris pour prédire l’évaluation de l’objectif ou du respect des contraintes, la même prédiction dans le cas de l’héritage nécessite les génotypes et les évaluations de tous les parents utilisés par l’opérateur. Comme précédemment, les vols de Lévy ont également été utilisés dans les opérateurs de croisement mais aussi pour initialiser la population [23].

Comme mentionné dans [38], les opérateurs génétiques n’utilisent pas directement les informations sur l’espace de recherche. Pour remédier à cela, les auteurs ont proposé trois stratégies visant à accélérer la convergence. La première consiste à *approximer*, une fois encore, l’espace de recherche en une forme plus simple afin d’identifier plus facilement les optima dans le nouvel espace. Cette approximation a été réalisée grâce aux processus gaussiens (GP, *Gaussian process* [4]). L’avantage d’utiliser les GP réside dans leur capacité à prédire la valeur de la fonction objectif $\hat{y}$ d’un échantillon x' tout en disposant d’un intervalle de confiance $\hat{s}(x')$ correspondant à cette prédiction (figure 5).

pour structurer l'espace de recherche en cellules appelées *buckets* pouvant contenir plusieurs échantillons. Ces fonctions doivent être sélectionnées de manière à ce que les échantillons proches les uns des autres dans l'espace de recherche d'origine aient une probabilité forte d'être dans la même *bucket*. Cette approche est particulièrement utile lorsque l'espace de recherche est défini en extension, comme c'est souvent le cas dans l'optimisation basée sur des données. [20] a travaillé sur la définition d'opérateurs de variation dans de tels espaces de recherche. Le principal inconvénient de cette approche est l'identification des fonctions qui dépendent du problème. Ces fonctions pourraient toutefois être optimisées a priori avant le début du processus d'optimisation. Un autre avantage de cette technique est la possibilité de choisir la taille du nouvel espace de recherche car il s'agit d'un hyperparamètre de LSH. De plus, cette technique peut être utilisée pour approximer les individus dans la même cellule que ceux déjà évalués. C'est le principe utilisé par [53], mais uniquement pour une approximation locale de l'espace de recherche à l'aide d'un maillage de Voronoï au lieu de LSH. Les auteurs parviennent à réduire le coût d'évaluation à seulement cinq fois la taille du problème, mais uniquement sur des fonctions de tests et dans des espaces de dimension assez faible (entre 5 et 30). D'autres études ont également proposé de structurer l'espace de manière hiérarchique [55], [56].

La troisième stratégie, telle que décrite dans [38], était plus théorique et prospective. L'idée était de conserver à la fois l'espace de recherche initial et l'espace de recherche projeté, en appliquant l'évolution à un espace de recherche afin d'obtenir des informations pouvant être utilisées pour rechercher dans l'autre espace via un mapping et alterner entre les deux. Pour nous, cela ressemble à un transfert de connaissances d'un problème d'optimisation à un autre, un concept plus récemment connu sous le nom d'*apprentissage par transfert*, que nous aborderons dans la section suivante.

Augmenter les ressources

La dernière catégorie permettant de réduire le coût d'un problème d'optimisation est l'augmentation des ressources disponibles. Il en existe de deux types : les nœuds de calculs et les problèmes d'optimisation. S'il est logique d'envisager le premier type, réduire le coût de l'optimisation d'un problème en ajoutant au moins un autre problème à cette optimisation est une stratégie beaucoup moins évidente.

Les métaheuristiques à base de population sont intrinsèquement parallèles car elles manipulent un ensemble d'échantillons représentés par un ensemble de paramètres. De nombreux travaux ont déjà étudié et proposé plusieurs stratégies de distribution pour déployer ces échantillons et leurs paramètres sur des nœuds de calcul. [14] a proposé une hiérarchie d'algorithmes d'évolution

artificielle distribués (illustrée dans la figure 6 contenant deux méthodes principales pour répartir une population d'échantillons sur plusieurs nœuds de calcul. Soit un échantillon ou un groupe d'échantillons est affecté à un nœud (distribution orientée *population*), soit les échantillons sont divisés en plusieurs groupes de sous-échantillons en fonction de leurs paramètres ($x_1, \dots, x_m$) pour former plusieurs sous-populations ($x^1 = (x_1, \dots, x_{kbnh})$, $x^2 = (x_{k+1}, \dots, x_l)$, $x^3 = \dots$), chacune étant affectée à un nœud de calcul (distribution orientée *dimension*).

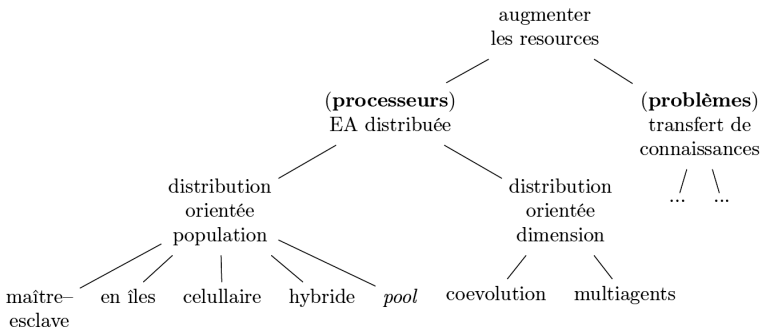


Fig. 6. Modification de la hiérarchie proposée par [14] en ajoutant d'autres problèmes à optimiser.

Il existe un certain nombre de stratégies disponibles pour chaque méthode de distribution, notamment la distribution *maître-esclave*, en *îles*, *cellulaire*, la *coévolution*, etc. Une présentation détaillée de chaque stratégie dépasse le cadre du présent article mais elle est particulièrement bien détaillée dans [14], et ces stratégies sont comparées entre elles sur plusieurs critères. Il est important de noter que réduire le temps d'exécution en augmentant le nombre de nœuds peut entraîner d'autres coûts. Des études ont montré que la stratégie maître-esclave peut être très efficace, à condition que le temps d'évaluation d'un échantillon soit nettement supérieur au temps de transmission des informations entre les nœuds. La raison en est le coût relativement élevé de la communication : le maître communique en effet en permanence avec les esclaves, leur envoyant les échantillons à évaluer et recevant en retour les valeurs de leurs fonctions objectif. De plus, le nombre d'esclaves ne peut pas être augmenté de manière excessive, car cela risquerait de saturer le maître. De plus, la plupart des stratégies maître-esclave sont synchrones, ce qui signifie que le maître attend que tous les esclaves aient terminé leurs évaluations respectives. Dans les implémentations où le temps d'évaluation varie considérablement d'un échantillon à

l'autre (par exemple dans la stratégie multifidélité), un temps d'inactivité important peut être introduit, réduisant ainsi l'avantage de cette distribution. Dans ce cas, il est nécessaire de transformer la technique d'évolution artificielle en sa variante asynchrone [46]. Le coût de la communication pourrait également être un facteur important dans la stratégie de distribution cellulaire, en particulier lorsque la taille de la population et le nombre de voisins associés à chaque échantillon sont élevés. Il en va de même pour la *coévolution* qui nécessite de nombreuses collaborations entre sous-populations (impliquant l'échange de nombreuses informations) pour l'évaluation.

Les auteurs de [24] notent que la plupart des recherches récentes utilisent le calcul haute performance pour résoudre des problèmes concrets mais qu'il n'existe que peu d'études théoriques, probablement parce que les fonctions de référence disponibles n'incluent pas la notion d'optimisation coûteuse. Cependant, même si les ordinateurs sont de plus en plus puissants, le simple fait d'ajouter plus de processeurs au processus d'optimisation ne suffit pas à résoudre tous les problèmes coûteux auxquels nous sommes confrontés. Premièrement, cela peut être dû au fait que le facteur de gain n'est pas suffisant. Deuxièmement, le fait d'avoir plus de processeurs entraîne d'autres coûts, tels que le coût de la communication entre les processus ou le temps d'inactivité. Cela peut affecter l'efficacité de la stratégie.

Comme indiqué précédemment, il semble logique d'augmenter le nombre de processeurs afin de réduire le temps d'exécution. Cependant, il est plus difficile de concevoir la réduction du coût en optimisant au moins un autre problème afin de l'exploiter. On parle alors d'optimisation *multitâche*, qui pourrait correspondre à un sixième M dans le défi 5M de [57]. Dans ce contexte, une stratégie potentielle pourrait consister à optimiser un problème moins coûteux en même temps que l'optimisation d'un problème plus coûteux, ou à optimiser deux problèmes coûteux différents. [15] sont les premiers à proposer l'optimisation simultanée de plusieurs problèmes avec la même population d'échantillons. Les encodages des individus pour chaque tâche sont regroupés en un encodage unifié pour toutes les tâches. La taille de cet encodage correspond à la plus grande taille des encodages de toutes les tâches. Par conséquent, certains paramètres d'un échantillon unifié peuvent ne pas être utilisés pour une ou plusieurs tâches. Les échantillons unifiés sont ensuite divisés en groupes au sein d'une même population selon le même principe que la *coévolution* à population unique proposée par [43], de sorte que chaque groupe se concentre sur une tâche spécifique. Sur cette base, le transfert de connaissances entre les groupes est réalisé à l'aide d'opérateurs génétiques spécifiques. L'optimisation multitâche s'est avérée plus efficace que l'optimisation monotâche en termes de vitesse de convergence sur une série de problèmes pratiques (problème du voyageur de commerce, problème de planification d'atelier, problème de routage de véhicules à capacité limitée,

etc.) et son efficacité a été analysée théoriquement par [26]. L'article [59] fournit un aperçu de l'état de l'art dans ce domaine de recherche récent. Certaines études, telles que [11], utilisent la transformation des espaces de recherche de tâches pour les unifier et ainsi pouvoir localiser les optima des tâches les moins coûteuses et transférer ces informations vers les tâches les plus coûteuses afin d'améliorer la convergence de l'algorithme. D'autres, comme dans [27], utilisent plusieurs modèles d'apprentissage (*ensemble learning*), mais une seule tâche pour approximer l'ensemble de l'espace de recherche combiné à une autre tâche pour approximer un espace de recherche plus local. Chaque solution optimale pour chaque tâche est évaluée à l'aide d'une évaluation coûteuse, puis utilisée pour mettre à jour les deux modèles d'approximation. Cette technique permet d'améliorer la convergence de l'algorithme. Comme mentionné dans la section précédente, le coût de la construction de modèles d'approximation visant à réduire le coût global de l'optimisation n'est toujours pas suffisamment pris en compte, comme le souligne [54], qui ne considère que le temps d'optimisation. Il serait utile de proposer un point précis à partir duquel le modèle de distribution devient une option viable, qu'il soit basé sur le nombre de processeurs ou sur des sous-populations.

Conclusion & Perspectives

Dans cet article d'opinion, nous caractérisons tout d'abord ce qu'est l'optimisation coûteuse à l'aide de la formule donnée dans [24] et tentons de fournir une définition qui n'est pas si naturelle. Nous montrons ensuite que la proportion d'articles scientifiques consacrés à l'optimisation coûteuse a considérablement augmenté au sein de la communauté. Nous résumons et commentons ensuite les différentes stratégies proposées dans la littérature, en les regroupant en trois catégories selon la formule susmentionnée : réduire le coût d'évaluation des objectifs et des contraintes, accélérer la convergence de l'algorithme d'optimisation et augmenter les ressources disponibles. Cependant, nous montrons au cours de cet article que la communauté se concentre principalement sur la réduction du temps d'exécution, alors que les stratégies proposées entraînent souvent d'autres types de coûts qui ne sont pas pris en compte lors de la comparaison des stratégies. Sur la base de ces considérations, nous présentons dans les paragraphes suivants plusieurs axes de recherche qui, selon nous, devraient contribuer à améliorer l'optimisation coûteuse, résumés dans la figure 7.

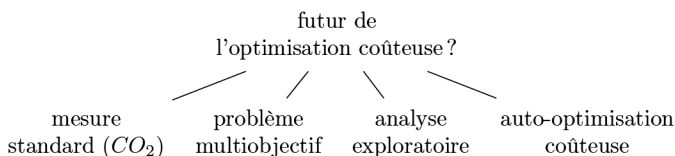


Fig. 7. Que pourrait être le futur de l'optimisation coûteuse ?

Une mesure standard pour le coût.

Le premier axe de recherche que nous suggérons consiste à se concentrer sur la caractérisation ou la normalisation des différents coûts induits par les stratégies utilisées dans l'optimisation coûteuse. Nous pensons qu'il est important de prendre en compte ces coûts dans la formule (2). Par exemple, [53] compare les stratégies de résolution d'un problème coûteux en termes de nombre d'évaluations en fonction de la dimension. Les auteurs proposent une stratégie qui permet de résoudre des fonctions de test en utilisant un nombre d'évaluations égal à seulement cinq fois la dimension du problème, alors que les meilleures stratégies précédentes en nécessitaient onze fois plus. Une fois encore, seul le temps de calcul est pris en compte. Tout comme il est possible de mesurer la qualité d'un problème d'optimisation multiobjectif à l'aide de l'hypervolume, ou la qualité d'un problème d'optimisation multimodale à l'aide de la proportion d'optima identifiés, il serait intéressant de proposer une ou plusieurs mesures de qualité pour un problème d'évolution artificielle combinant la qualité des résultats et les différents types de coûts impliqués (temps, communications, temps d'inactivité, etc.). Cela faciliterait la comparaison des stratégies existantes. À cet égard, nous pensons que les travaux menés par [35] en 2011 allaient dans la bonne direction. Ils ont proposé une technique d'optimisation biobjectif visant à réduire à la fois le temps de planification et la consommation d'énergie. Le principe consistait à ajuster dynamiquement la tension d'alimentation des processeurs au détriment de la fréquence d'horloge. Malheureusement, même aujourd'hui, peu d'études prennent en compte cet aspect énergétique lorsqu'elles comparent différentes techniques. Une façon de remédier à cela consiste à utiliser la quantité d'émissions de CO₂ comme indicateur, comme le propose [45].

Transformer le coûteux en multiobjectif ?

Comme indiqué précédemment, la résolution d'un problème d'optimisation par adaptation de différentes stratégies peut entraîner des coûts supplémentaires. Par conséquent, afin de minimiser les coûts, il serait avantageux de réduire le temps d'exécution, le nombre de communications, la consommation d'énergie et le temps d'apprentissage ou l'utilisation des données des modèles

d'approximation, tout en maximisant le nombre de cœurs de calcul et de populations utilisés, et éventuellement d'autres critères. Cependant, il est difficile de classer ces quantités car il n'existe pas d'ordre naturel entre elles tant qu'un système de mesure unifié n'a pas été établi pour les problèmes d'optimisation. Suivant l'approche décrite dans [35], cela implique de traiter un problème d'optimisation comme un problème multicritère, où les critères sont a priori antagonistes, ce qui donne lieu à un problème multiobjectif. Selon cette idée, un problème de minimisation dans lequel f est l'objectif coûteux serait converti en un problème multiobjectif auquel des objectifs supplémentaires seraient ajoutés, en fonction des stratégies employées pour réduire le coût de f . Cela pourrait être formalisé comme suit :

$$\arg \min_x \left\{ f(x), CO_2(f(x)), \frac{1}{\text{processeurs}}, \frac{1}{\text{populations}}, \dots \right\} \quad (3)$$

Dans [3], les auteurs proposent l'algorithme SMS-EMOA, qui est dédié à la résolution de problèmes multiobjectif en intégrant la maximisation de l'hypervolume dans l'opérateur de sélection. Pourrions-nous construire un nouvel algorithme dédié à l'optimisation coûteuse basé sur le principe proposé par ces auteurs, en combinant l'objectif initial coûteux avec les différents coûts impliqués dans l'optimisation du problème et les stratégies déployées? Alternativement, pourrions-nous simplement utiliser cet algorithme en caractérisant tous les coûts impliqués dans les stratégies adoptées et en calculant l'hypervolume de ces coûts?

Analyse de l'espace de recherche.

Une deuxième piste de recherche que nous jugeons prometteuse consisterait à développer une expertise sur les stratégies de réduction des coûts afin de choisir la stratégie ou la combinaison de stratégies la mieux adaptée au problème à résoudre. En d'autres termes, l'algorithme décrit dans le paragraphe précédent peut-il adapter ses stratégies en fonction des types de coûts mesurés afin d'améliorer ses performances? Pour ce faire, dans le cas de problèmes classiques, [34] propose de sélectionner la technique d'optimisation la mieux adaptée à la résolution d'un problème donné, en extrayant des propriétés spécifiques à faible coût et en identifiant l'algorithme le plus efficace pour cette combinaison de propriétés. Ce processus est connu sous le nom d'*analyse exploratoire* de l'espace de recherche. Les propriétés identifiées sont assez générales et ne tiennent pas compte de la notion de coût. Ce n'est que dans [50] que cette notion est incluse dans les directives de choix mais uniquement pour savoir si le problème est coûteux ou pas, et en proposant uniquement la stratégie d'approximation, la plus répandue. [33] améliore l'approche exploratoire en extrayant automatiquement du problème des propriétés de bas niveau, et en les reliant aux propriétés de plus haut niveau

discutées précédemment. Le principal inconvénient est que le calcul de ces propriétés nécessite l'évaluation d'un grand nombre d'échantillons, ce qui est coûteux dans notre cas. De plus, [51] montre que certaines de ces propriétés sont trop coûteuses même pour guider la résolution de problèmes de grande taille. Pour ce type d'optimisation, une petite proportion du budget est réservée à la séparation des paramètres en différents groupes, afin que le reste du budget soit ensuite alloué à l'optimisation. Est ce que ce mécanisme peut aussi être adopté dans le cas coûteux? Tenter de répondre à ces questions nous semble être un domaine de recherche prometteur qui n'a pas encore été exploré dans le contexte de l'optimisation coûteuse.

Auto-hybridation des stratégies.

De nombreuses stratégies ont été proposées pour traiter l'optimisation coûteuse, depuis le processus d'initialisation jusqu'à la condition d'arrêt, même si cette dernière n'a pas été suffisamment étudiée selon [38]. Pour la dernière orientation de recherche, nous recommandons d'étudier la combinaison automatique de toutes les stratégies précédentes exactement comme l'automatisation de l'apprentissage automatique (AutoML) s'est développé dans le domaine de l'apprentissage machine [2], [25]. Pourquoi ne pas envisager un processus d'automatisation de l'optimisation coûteuse capable d'optimiser des problèmes coûteux en tenant compte de tous les coûts induits par cette optimisation et les stratégies adoptées, et cela sans assistance humaine?

Références

- [1] A. Andoni & P. Indyk. 2008. Near-optimal hashing algorithms for approximate nearest neighbor in high dimensions. *Commun. ACM*. <https://doi.org/10.1145/1327452.1327494>.
- [2] M. Baratchi, C. Wang, S. Limmer et al. 2024. Automated Machine Learning: Past, Present and Future. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10726-1>.
- [3] N. Beume, B. Naujoks & M. Emmerich. 2007. SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.008>.
- [4] M. Binois & N. Wycoff. 2022. A Survey on High-dimensional Gaussian Process Modeling with Application to Bayesian Optimization. *ACM Trans. Evol. Learn. Optim.* <https://doi.org/10.1145/3545611>.
- [5] L. Bliek, A. Guijt, R. Karlsson et al. 2023. Benchmarking surrogate-based optimisation algorithms on expensive black-box functions. *Applied Soft Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110744>.
- [6] K. van der Blom, T. M. Deist, V. Volz et al. 2021. Identifying Properties of Real-World Optimisation Problems through a Questionnaire. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05547>.

- [7] F. Campelo & C. Aranha. 2023. Lessons from the Evolutionary Computation Bestiary. *Artificial Life*. https://doi.org/10.1162/artl_a_00402.
- [8] F. Campelo & C. Aranha. 2023. EC Bestiary: A bestiary of evolutionary, swarm and other metaphor-based algorithms. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1293352>.
- [9] J. Del Ser, E. Osaba, D. Molina et al. 2019. Bio-inspired computation: Where we stand and what's next. *Swarm and Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.04.008>.
- [10] J. E. Dennis & V. Torczon. 1995. Managing approximation models in optimization. *Multidisciplinary Design Optimization: State-of-the-Art*.
- [11] J. Ding, C. Yang, Y. Jin & T. Chai. 2019. Generalized Multitasking for Evolutionary Optimization of Expensive Problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2017.2785351>.
- [12] A. E. Eiben & J. E. Smith. 2015. Hybridisation with Other Techniques: Memetic Algorithms. In *Introduction to Evolutionary Computing*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44874-8_10.
- [13] M. T. M. Emmerich, K. C. Giannakoglou & B. Naujoks. 2006. Single- and multiobjective evolutionary optimization assisted by Gaussian random field metamodels. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2005.859463>.
- [14] Y.-J. Gong, W.-N. Chen, Z.-H. Zhan et al. 2015. Distributed evolutionary algorithms and their models: A survey of the state-of-the-art. *Applied Soft Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.04.061>.
- [15] A. Gupta, Y.-S. Ong & L. Feng. 2016. Multifactorial Evolution: Toward Evolutionary Multitasking. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2015.2458037>.
- [16] C. He, Y. Zhang, D. Gong & X. Ji. 2023. A review of surrogate-assisted evolutionary algorithms for expensive optimization problems. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119495>.
- [17] Y. Jin, M. Olhofer & B. Sendhoff. 2001. Managing approximate models in evolutionary aerodynamic design optimization. In (CEC). <https://doi.org/10.1109/CEC.2001.934445>.
- [18] Y. Jin & B. Sendhoff. 2009. A systems approach to evolutionary multiobjective structural optimization and beyond. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MCI.2009.933094>.
- [19] Y. Jin, H. Wang, T. Chugh et al. 2019. Data-Driven Evolutionary Optimization: An Overview and Case Studies. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2018.2869001>.
- [20] C. G. Johnson. 2012. Search-based evolutionary operators for extensionally-defined search spaces: Applications to image search. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/CEC.2012.6256551>.
- [21] B. Kazimipour, X. Li & A. K. Qin. 2014. A review of population initialization techniques for evolutionary algorithms. In (CEC). <https://doi.org/10.1109/CEC.2014.6900618>.
- [22] G. Li, Q. Zhang, Q. Lin & W. Gao. 2022. A Three-Level Radial Basis Function Method for Expensive Optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3061420>.
- [23] J. Li, Q. An, H. Lei et al. 2022. Survey of Lévy Flight-Based Metaheuristics for Optimization. *Mathematics*. <https://doi.org/10.3390/math10152785>.
- [24] J. Li, Z. Zhan & J. Zhang. 2022. Evolutionary Computation for Expensive Optimization: A Survey. *Machine Intelligence Research*. <https://doi.org/10.1007/s11633-022-1317-4>.

- [25] N. Li, L. Ma, T. Xing et al. 2023. Automatic design of machine learning via evolutionary computation: A survey. *Applied Soft Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110412>.
- [26] Y. Lian, Z. Huang, Y. Zhou & Z. Chen. 2019. Improve Theoretical Upper Bound of Jumpk Function by Evolutionary Multitasking. In *Proceedings of the 2019 3rd High Performance Computing and Cluster Technologies Conference*. <https://doi.org/10.1145/3341069.3342982>.
- [27] P. Liao, C. Sun, G. Zhang & Y. Jin. 2020. Multi-surrogate multi-tasking optimization of expensive problems. *Knowledge-Based Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106262>.
- [28] B. Liu, Q. Zhang & G. G. E. Gielen. 2014. A Gaussian Process Surrogate Model Assisted Evolutionary Algorithm for Medium Scale Expensive Optimization Problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2248012>.
- [29] Y. Lu, B. Li & A. Zhou. 2024. Are you concerned about limited function evaluations: data-augmented pareto set learning for expensive multi-objective optimization. In (AAAI'24/IAAI'24/EAAI'24). <https://doi.org/10.1609/aaai.v38i13.29331>.
- [30] W. Luo, Y. Qiao, X. Lin et al. 2019. Many-Modal Optimization by Difficulty-Based Cooperative Co-evolution. In *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. <https://doi.org/10.1109/SSCI44817.2019.9003005>.
- [31] S. Mahdavi, S. Rahnamayan & K. Deb. 2018. Opposition based learning: A literature review. *Swarm and Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.09.010>.
- [32] S. Mahdavi, M. Shiri & S. Rahnamayan. 2015. Metaheuristics in large-scale global continues optimization: A survey. *Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.10.042>.
- [33] O. Mersmann, B. Bischl, H. Trautmann et al. 2011. Exploratory Landscape Analysis. In (GECCO). <https://doi.org/10.1145/2001576.2001690>.
- [34] O. Mersmann, M. Preuss & H. Trautmann. 2010. Benchmarking Evolutionary Algorithms: Towards Exploratory Landscape Analysis. In (PPSN). https://doi.org/10.1007/978-3-642-15844-5_8.
- [35] M. Mezma, N. Melab, Y. Kessaci et al. 2011. A parallel bi-objective hybrid metaheuristic for energy-aware scheduling for cloud computing systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2011.04.007>.
- [36] D. Pallez, J. Gardès & C. Pasquier. 2017. Prediction of miRNA-disease Associations using an Evolutionary Tuned Latent Semantic Analysis. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10065-y>.
- [37] V. Pareto. 1964. *Cours d'économie politique. Œuvres complètes publiées sous la direction de Giovanni Busino. Tomes 1 et 2 en un volume*. <https://doi.org/10.3917/droz.paret.1964.01>.
- [38] Y. Pei & H. Takagi. 2011. A survey on accelerating evolutionary computation approaches. In *International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR)*. <https://doi.org/10.1109/SoCPaR.2011.6089140>.
- [39] R. Pighetti, D. Pallez & F. Precioso. 2015. Improving SVM Training Sample Selection Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm and LSH. In (SSCI). <https://doi.org/10.1109/SSCI.2015.197>.
- [40] M. Preuss. 2015. *Multimodal Optimization by Means of Evolutionary Algorithms*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07407-8>.
- [41] S. Puechmorel & D. Delahaye. 2014. Order Statistics and Region-Based Evolutionary Computation. *Journal of Global Optimization*. <https://doi.org/10.1007>

- [42] M. Reyes-Sierra & C. A. C. Coello. 2005. A study of fitness inheritance and approximation techniques for multi-objective particle swarm optimization. In (CEC). <https://doi.org/10.1109/CEC.2005.1554668>.
- [43] E. Sanchez, G. Squillero & A. Tonda. 2011. Group evolution: Emerging synergy through a coordinated effort. In (CEC). <https://doi.org/10.1109/CEC.2011.5949951>.
- [44] L. V. Santana-Quintero, A. A. Montaña & C. A. C. Coello. 2010. A Review of Techniques for Handling Expensive Functions in Evolutionary Multi-Objective Optimization. In *Computational Intelligence in Expensive Optimization Problems*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10701-6_2.
- [45] G. Saraiva, M. Vasconcelos, S. Mazzini Bruschi et al. 2025. Estimating CO₂ emissions of distributed applications and platforms with SimGrid/Batsim. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.13693>.
- [46] E. O. Scott & K. A. De Jong. 2015. Understanding Simple Asynchronous Evolutionary Algorithms. In *Proceedings of the 2015 ACM Conference on Foundations of Genetic Algorithms XIII (FOGA '15)*. <https://doi.org/10.1145/2725494.2725509>.
- [47] H. Sharma, S. S. Jadon, J. C. Bansal & K. V. Arya. 2013. Lévy Flight Based Local Search in Differential Evolution. In *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03753-0_23.
- [48] R. E. Smith, B. A. Dike & S. A. Stegmann. 1995. Fitness inheritance in genetic algorithms. In *Symposium on Applied Computing*. <https://doi.org/10.1145/315891.316014>.
- [49] K. Sörensen. 2015. Metaheuristics – the metaphor exposed. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/itor.12001>.
- [50] J. Stork, A. E. Eiben & T. Bartz-Beielstein. 2022. A New Taxonomy of Global Optimization Algorithms. *Natural Computing: An International Journal*. <https://doi.org/10.1007/s11047-020-09820-4>.
- [51] R. Tanabe. 2021. Towards Exploratory Landscape Analysis for Large-Scale Optimization: A Dimensionality Reduction Framework. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*. <https://doi.org/10.1145/3449639.3459300>.
- [52] A. Tharwat & W. Schenck. 2021. Population initialization techniques for evolutionary algorithms for single-objective constrained optimization problems: Deterministic vs. stochastic techniques. *Swarm and Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100952>.
- [53] H. Tong, C. Huang, J. Liu & X. Yao. 2019. Voronoi-based Efficient Surrogate-assisted Evolutionary Algorithm for Very Expensive Problems. In (CEC). <https://doi.org/10.1109/CEC.2019.8789910>.
- [54] V. Volz & B. Naujoks. 2019. On Benchmarking Surrogate-Assisted Evolutionary Algorithms. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. <https://doi.org/10.1145/3319619.3326866>.
- [55] L. Wang, R. Fonseca & Y. Tian. 2020. Learning Search Space Partition for Black-Box Optimization Using Monte Carlo Tree Search. In *Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'20)*. <https://doi.org/10.5555/3495724.3497361>.
- [56] H. Xia, C. Li, S. Zeng et al. 2022. Learning to Search Promising Regions by a Monte-Carlo Tree Model. In (CEC). <https://doi.org/10.1109/CEC55065.2022.9870281>.

- [57] Z. Zhan, L. Shi, K. Chen Tan & J. Zhang. 2022. A survey on evolutionary computation for complex continuous optimization. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10042-y>.
- [58] Y.-H. Zhang, Y.-J. Gong, H.-X. Zhang et al. 2017. Toward Fast Niching Evolutionary Algorithms: A Locality Sensitive Hashing-Based Approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2016.2604362>.
- [59] H. Zhao, X. Ning, X. Liu et al. 2023. What makes evolutionary multi-task optimization better: A comprehensive survey. *Applied Soft Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110545>.

Research software : qui es-tu ?

Une conversation scientifique et juridique
sur les logiciels de la recherche

Teresa Gomez-Diaz

Université Gustave Eiffel-LIGM-CNRS

Tomas Recio

Université Antonio de Nebrija, Madrid, Espagne

Les logiciels de la recherche sont désormais reconnus comme l'un des piliers de la science ouverte, intégrés, par exemple, dans le *Deuxième plan national pour la science ouverte* en France et dans la *Recommandation de l'UNESCO sur une science ouverte*. Plusieurs équipes ont proposé des définitions de *logiciel de la recherche*, néanmoins ce concept a encore besoin d'être analysé comme le recommande un rapport récent de Science Europe¹.

La méthodologie. Ce travail sélectionne trois des formulations proposées récemment dans trois contextes différents et établit un cadre de comparaison qui aidera à clarifier ce concept et à consolider une formulation pour sa définition. Ces trois formulations incluent la définition proposée par les auteurs de ce texte, définition développée dans le cadre de la construction des protocoles CDUR (citation, dissemination, use, research) d'évaluation des logiciels de la recherche.

Les résultats. Il est vérifié que le cadre comparatif peut être correctement appliqué à ces trois définitions et que les critères utilisés dans ledit cadre permettent d'analyser avec précision les trois formulations sélectionnées.

Cette étude confirme la définition que nous avons proposée et consolide notre compréhension, acquise dans des travaux précédemment publiés, de

1. <https://scienceeurope.org>.

cet objet complexe, le *logiciel de la recherche*, en vue des analyses effectuées ici. Ceci contribue à mieux répondre aux défis qu'il soulève dans le contexte de la science ouverte et à faciliter la conception, la mise en place et l'adoption des politiques scientifiques dont il relève.

Introduction

La recherche a pour objet de produire et de diffuser des connaissances nouvelles dans tous les domaines dans lesquels la méthode scientifique est applicable. Pour produire ces nouvelles connaissances, il est souvent nécessaire de collecter, manipuler et analyser des ensembles de données, qui seront ensuite étudiés et manipulés avec des logiciels. Les articles, les présentations dans des conférences, et les publications en général sont les moyens le plus couramment utilisés pour diffuser ces connaissances nouvelles. Dans la plupart de nos laboratoires, trois objets sont les plus importants dans la production et la diffusion des nouvelles connaissances, et cela dans presque toutes les matières scientifiques : les articles (ou publications en général), les données et les logiciels.

Ces logiciels sont souvent produits par des équipes de recherche dans un contexte précis d'analyse d'un ensemble de données, ou bien de façon tout à fait indépendante, hors de ce contexte d'étude. La diffusion de ces données et de ces logiciels facilite la transmission de ces nouvelles connaissances, la transparence dans les processus de la recherche, la reproductibilité et la validation des nouveaux résultats scientifiques obtenus avec ces objets. Selon l'encyclopédie en ligne Wikipédia² :

un logiciel est un ensemble de séquences d'instructions interprétables par une machine et d'un jeu de données nécessaires à ces opérations. Le logiciel détermine donc les tâches qui peuvent être effectuées par la machine, ordonne son fonctionnement et lui procure ainsi son utilité fonctionnelle. Les séquences d'instructions, appelées programmes, ainsi que les données du logiciel sont ordinairement structurées en fichiers.

«Logiciel» est la traduction de *software*, ce qui a été officialisé par un arrêté en 1974 et confirmé en 1981 [68] (voir la section 3).

Le manuscrit présenté ici continue les études existantes sur la définition de *logiciel de la recherche*, en sélectionnant et analysant trois des définitions récemment proposées dans des contextes différents [39], [42], [51], [66], [71]. Parmi ces trois formulations nous avons inclus celle que nous avons développée dans le cadre de la construction des protocoles CDUR d'évaluation des logiciels de la recherche [39], [42]. Il est important de bien comprendre cet objet puisque les logiciels de la recherche sont désormais reconnus comme

2. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Logiciel>.

l'un des piliers de la science ouverte [12], [40], [65], [78], et les universités et autres organismes de recherche ont besoin de préciser ce qui relève du champ d'application de leurs politiques scientifiques dans ce contexte [6], [40], [47], [76].

Les sections suivantes seront consacrées à l'examen de ces trois définitions en développant les avantages et les inconvénients de chacune. Pour cela nous avons construit un cadre de comparaison qui fournira la méthode d'analyse utilisée pour étudier le contexte d'élaboration de la définition et la qualité de la formulation proposée. Il sera également analysé si la définition reflète une compréhension correcte des logiciels de la recherche en tant que production scientifique, numérique ou en tant qu'objet juridique, ce qui sera complété avec deux points supplémentaires relatifs aux *conundrum challenges*³ [9], [46] et la comparaison avec une autre production scientifique importante, les données de la recherche [41], [42].

Voici les trois définitions qui seront analysées en suivant les critères proposés :

D1-COSO

Définition proposée par le collège Codes sources et logiciels du Comité pour la science ouverte (COSO) en 2022 [66], [71].

D2-RDA

Définition proposée par le groupe de réflexion FAIR for Research Software (FAIR4RS) WG de la Research Data Alliance (RDA) en 2021 [51].

D3-CDUR

Définition que nous avons proposée en 2019 dans le cadre de la construction des protocoles CDUR d'évaluation des logiciels de la recherche [39], [42].

Comme indiqué dans [11] en relation avec les données de la recherche :

*A clear conceptualization is essential for proper data management, dissemination, and reuse. Yet, ambiguity surrounding the term continues to generate inconsistencies in how research results are reported and how data policies are implemented*⁴.

3. Quel est le logiciel à partager? par qui? avec qui? dans quelles conditions? pourquoi et avec quels effets?

4. Dans toute la suite, nous associons systématiquement une traduction en français à chaque citation donnée dans son anglais d'origine. Nous ne le signalons explicitement que pour cette première citation en anglais, toutes les autres seront traitées de la même façon. « Une conceptualisation claire est essentielle pour une gestion, une diffusion et une réutilisation adéquates des données. Pourtant, l'ambiguïté qui entoure ce terme continue de générer des incohérences dans la manière dont les résultats de la recherche sont présentés et dont les politiques relatives aux données sont mises en œuvre ».

De manière analogue, la gestion des logiciels de la recherche doit se faire correctement, et cela en considérant les logiciels de plusieurs points de vue : en tant que productions scientifiques, en tant qu'objets juridiques, et sans négliger les aspects techniques qui sont importants pour définir les infrastructures et les services qui sont ou qui seront utilisés pour leur diffusion et leur réutilisation, ce qui montre le besoin de l'analyse approfondie présentée ici, et motive les critères sélectionnés pour réaliser les comparaisons.

Ainsi, les analyses effectuées seront sans doute utiles afin de détecter les défis qui se présentent pour fixer une définition et contribuer à mieux comprendre cette production scientifique dans le cadre de la science ouverte. Ils faciliteront, entre autres, la conception, la mise en place et l'adoption des politiques scientifiques qui sont pertinentes pour les logiciels de la recherche.

Le plan de ce texte est le suivant. Nous expliquerons en premier lieu le cadre de comparaison et les critères qui le composent. Ensuite, pour élaborer nos analyses de ces critères appliqués aux trois définitions sélectionnées, nous avons inclus deux sections dédiées au regroupement des informations sur les logiciels en tant que productions scientifiques et en tant qu'objets juridiques, suivies d'une section dédiée à la question de l'usage comme critère à retenir pour la formulation d'une définition. Ces sections sont suivies de l'analyse des trois définitions mentionnées ci-dessus et d'une discussion finale.

1. Le cadre de comparaison

Cette section est dédiée à expliquer le cadre de comparaison que nous allons utiliser pour analyser ces trois définitions de logiciel de la recherche, qui ont été proposées dans des contextes différents : D1-COSO [66], [71], D2-RDA [51], D3-CDUR [39], [42]. Il doit donc inclure, entre autres points, l'étude des contextes dans lesquels elles sont proposées, et doit montrer que cet objet complexe est bien compris dans les diverses dimensions qui le composent. Après avoir énuméré les points de ce cadre nous les détaillons et argumentons.

Voici donc les critères qui composent le cadre de comparaison que nous allons utiliser :

- cadre d'élaboration de la formulation, bibliographie consultée ;
- qualité de la formulation : s'agit-il d'une définition précise ?
- compréhension de l'objet en tant que production numérique ;
- compréhension de l'objet en tant que production scientifique ;
- positionnement de l'objet dans un contexte de droits d'auteur et de propriété intellectuelle ;
- capacité de répondre aux questions du *conundrum challenges* ;
- cadre de comparaison avec le concept de données de la recherche.

Les deux premiers points sont relatifs à la formulation de la définition et à la qualité de cette formulation : le cadre dans lequel elle est proposée, au sein de quelle équipe, et quels sont les travaux consultés.

En relation avec la qualité de la formulation d'une définition nous avons consulté [18], dont le chapitre 6 est dédié aux définitions et explique les caractéristiques d'une *bonne définition*. L'utilité d'une définition est de préciser ce qui est inclus ou non dans la définition d'un terme, c'est-à-dire de délimiter correctement une partie d'un ensemble : une bonne définition du terme X doit éviter toute imprécision et toute obscurité. L'objectif d'une définition est la clarté ; il ne devrait pas être plus difficile pour le public cible de comprendre la définition de X que de comprendre le mot X lui-même. Une bonne définition doit comporter plusieurs caractéristiques importantes. Par ailleurs, comme argumenté dans [18], il existe un lien étroit entre définition et classification, mais la classification ne fait pas partie de la formulation de la définition⁵.

Pour déterminer les caractéristiques les plus importantes, la formulation d'une définition doit aussi montrer que l'objet défini est bien compris dans les multiples dimensions qui le constituent. Dans notre cas de logiciel de la recherche, la première de ces dimensions correspond, évidemment, à l'objet numérique *logiciel*, c'est-à-dire, *comme l'ensemble de séquences d'instructions interprétables par une machine qui sont incluses dans un ensemble de fichiers*.

Du fait de l'importance de bien identifier ces fichiers, nous souhaitons pointer ici les règles de nommage de fichiers⁶, mais nous ne traiterons pas certaines questions relatives aux aspects de cette dimension numérique [1] comme le cycle de vie, l'organisation de l'équipe de développement, la gestion des différentes versions, les bonnes pratiques de test, de procédures d'installation, de diffusion, de sauvegarde et d'archivage, et beaucoup d'autres sujets qui échappent à l'objectif principal de ce texte, l'étude de trois définitions et la méthodologie construite pour réaliser les comparaisons entre ces définitions. Ces différents points relèvent de la prise de décision au sein de l'équipe de développement, ce qui peut être facilité, par exemple, avec les plans de gestion des logiciels [48], [50], [63].

L'utilisation de ces aides à la planification de la vie d'un logiciel montre combien il est important de bien identifier les logiciels avec des métadonnées

5. Par exemple, une définition de l'objet *chaise* n'inclut pas le fait qu'il y a des chaises vertes et de chaises roses...

6. Voir, par exemple, la ressource *Stockage et archivage : Comment bien nommer ses fichiers ?* de DoRANum (https://doranum.fr/stockage-archivage/comment-nommer-fichiers_10_13143_wgqw-aa59/) ou la ressource *File Naming Conventions* de Harvard (<https://datamanagement.hms.harvard.edu/plan-design/file-naming-conventions>).

au moment de leur diffusion, de favoriser des pratiques de citation⁷ [3], [35], [39]. Elle montre également que l'utilisation d'une forge peut faciliter la gestion des versions, le développement collaboratif ou la diffusion d'un logiciel. À noter que la mise en œuvre de ces différentes bonnes pratiques peut être évaluée avec les étapes (C) citation, (D) dissémination et (U) use du protocole CDUR pour les logiciels de la recherche [39].

D'autres dimensions importantes des logiciels de la recherche comprennent une vision en tant que production scientifique et aussi en tant qu'objet juridique. Nous analysons dans les deux sections suivantes (section 2 et section 3) les questions relatives à ces deux dimensions, avec des descriptions détaillées des caractéristiques de ces types d'objets. La question de l'usage comme critère à retenir dans les caractéristiques d'une bonne définition est soulevée régulièrement, et la section 4 est dédiée à l'étude de ce point en détail. Même s'il s'agit d'un point qui doit être compris correctement, il n'est pas inclus dans notre cadre de comparaison, puisque les trois formulations sélectionnées le mentionnent de façon assez similaire.

Pour continuer avec la description du cadre de comparaison, la compréhension correcte de ces différentes dimensions peut être confirmée avec la facilité et la précision avec lesquelles ces trois formulations vont fournir des réponses aux questions du *conundrum challenges* [9], [46], ou par la clarté qu'elles apportent dans un contexte de comparaison entre logiciels et données de la recherche [42].

En relation avec les questions du *conundrum challenges*, rappelons ici qu'elles ont été initialement soulevées par C. Borgman dans le cadre des données de la recherche [9] :

*Data sharing is thus a conundrum. [...] The challenges are to understand which data might be shared, by whom, with whom, under what conditions, why, and to what effects. Answers will inform data policy and practice*⁸.

Les publications de C. Borgman sont bien connues et très consultées dans le domaine des données de la recherche, dans plusieurs domaines scientifiques et en relation avec la science ouverte⁹. Nous étudions dans les sections qui suivent si les définitions analysées apportent des réponses à ces questions.

7. En utilisant, par exemple, les CITATION.cff files proposés dans <https://citation-file-format.github.io/> ou avec des dépôts dans HAL (<https://doc.hal.science/deposer/deposer-le-code-source/>), dans Software Heritage (<https://www.softwareheritage.org/>), ou dans Zenodo (<https://zenodo.org/>).

8. *Le partage des données est une énigme. [...] Les défis consistent à comprendre quelles données peuvent être partagées, par qui, avec qui, dans quelles conditions, pourquoi et à quels effets. Les réponses éclaireront la politique et la pratique des données.*

9. Voir, par exemple, la liste des résultats de la recherche de "Christine L. Borgman" avec le rôle d'*author* dans la plateforme OpenAlex (<https://openalex.org/>) : <https://openalex.org/works?page=1&filter=authorships.author.id:a5015900970>.

Finalement, depuis le début de nos travaux sur les logiciels de la recherche [35], [39], nous avons trouvé nécessaire et utile de réaliser des comparaisons entre ces différents objets : articles, données, logiciels, ce qui nous a permis de mieux comprendre les questions que ces productions soulèvent et d'être en mesure d'apporter certaines réponses. En particulier, nous souhaitons compléter le cadre de comparaison proposé ici avec l'étude de l'adaptation des définitions proposées aux données de la recherche, ce qui permet d'exhiber, selon nous, des critères sur la qualité des trois formulations.

Tel est le cadre complet de comparaison qui fournit la méthodologie que nous allons utiliser pour analyser les trois définitions de logiciels de la recherche, ce qui sera fait après les trois sections suivantes dédiées aux questions relatives aux productions scientifiques, au contexte juridique des logiciels de la recherche, et à la question du critère de l'usage.

2. Logiciel de la recherche, une production scientifique

Logiciel de recherche? Code logiciel de la recherche? Logiciel dans la recherche? Code scientifique? Logiciel d'un laboratoire de recherche? Logiciels issus de la recherche? Codes sources produits par la recherche? Logiciels académiques? La terminologie utilisée en anglais, *research software*, semble désormais bien fixée dans la littérature [3], [5], [6], [7], [21], [34], [39], [44], [46], [47], [51], [52], [53], [54], [56], [62], [63], [76] (et les références qui s'y trouvent) et c'est ce terme que nous adoptons ici, traduit en français comme «logiciel de la recherche¹⁰».

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction, un logiciel est un ensemble d'instructions utilisé sur une machine pour gérer un ensemble de données. Ainsi, il peut réaliser un ensemble d'opérations, de calculs ou de simulations. Désormais, cet ensemble d'instructions et de codes sources peut être écrit par des outils d'intelligence artificielle [72], [74]. Cela soulève des interrogations sur l'utilisation de ces outils, sur l'accès exclusif de certains acteurs aux codes sources des logiciels qui sont, à leur tour, source des outils de l'intelligence artificielle, et sur la possibilité d'exploitation des résultats obtenus avec ces outils, sans connaître qui a produit ces nouveaux codes, dans quel contexte, avec quel objectif, avec quels outils, avec quelles sources... Les questions juridiques, éthiques et de natures diverses qui se posent dans ce cadre sont en cours d'étude (voir, par exemple, [15], [17], [49], [55], [58], [64]), en conséquence nous ne prenons pas en compte ce cas dans ce texte. Les travaux rapportés ici sont donc dédiés aux logiciels produits par

10. Nous observons ici la différence entre les termes *search software*, traduit comme logiciel de recherche, et *research software*, traduit comme logiciel de la recherche. Cette question se pose également pour les données : *search data* ou données de recherche n'a pas la même signification que *research data* ou données de la recherche. À noter que cette problématique ne semble pas se poser pour les termes laboratoire de recherche ou article ou publication de recherche.

des personnes, membres d'une équipe de recherche. La production, notamment la diffusion de cet objet, un logiciel de la recherche, soulève des questions juridiques et de politique scientifique [35], questions que nous avons étudiées dans les années 2006–2013, au sein du laboratoire d'informatique Gaspard-Monge¹¹, au sein du projet national CNRS PLUME (2007–2013) [31], [36], [37], [38], et, depuis 2018, dans plusieurs publications [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47].

Le premier point traité dans [35], et l'un des plus importants, est celui de la définition du point de vue juridique et de celui de la politique scientifique en tant que production d'un laboratoire, que nous traiterons dans les sections suivantes, et qui est le sujet d'étude principal de ce document. D'autre part, la première partie de [35] étudie les questions juridiques, qui font ici l'objet de la section 3. La deuxième partie est dédiée à l'étude des décisions qui interviennent dans la diffusion de ces logiciels. Elles relèvent de niveaux décisionnaires différents, qui vont de la personne qui participe à un projet logiciel (chercheurs et chercheuses, ingénieurs et ingénieures, membres d'un laboratoire, responsables, ou bien, simplement membres d'une équipe avec un projet logiciel) aux responsables des tutelles et du financement des logiciels, en passant par la direction du laboratoire.

Dans [35], [39] et [40], nous avons tenu compte également d'un niveau de décision qui dépasse les laboratoires et les institutions, celui de *la communauté scientifique internationale*, au sens large, ce qui comprend, entre autres, la politique scientifique européenne ou les politiques des revues scientifiques. Il inclut également les communautés scientifiques associées à un domaine scientifique spécifique, puisqu'il peut y avoir des pratiques propres à chaque communauté, comme, par exemple, le traitement de la signature des articles [13], [73].

Ce niveau peut interférer, parfois de façon surprenante, sur les pratiques de publication et de diffusion des nouvelles connaissances, comme la renommée d'une revue où l'on souhaite faire publier ses articles et les contrats qui sont signés avec les éditeurs (*publishers*) responsables de ces revues [25] :

... contracts concluded by publishers based on such rights are not disclosed, since they are subject to the exemption provided by the European directive 93/37/CEE.^{12 13}

11. <https://ligm.univ-eiffel.fr/>.

12. ... les contrats conclus par les éditeurs sur la base de ces droits ne sont pas divulgués, car ils sont soumis à l'exemption prévue par la directive européenne 93/37/CEE.

13. Cette directive a évolué depuis 1993. La Directive 93/37/CEE du Conseil du 14 juin 1993 portant coordination des procédures de passation des marchés publics de travaux est abrogée par la *Directive 2004/18/CE du Parlement européen et du Conseil relative à la coordination des procédures de passation des marchés publics de travaux, de fournitures et de services*, remplacée également par la *directive 2014/24/UE du Parlement européen et du Conseil sur la passation des marchés publics*, et qui a une dernière version datée 01/01/2026.

À la différence des questions juridiques de base que nous avons traitées dans [35], et qui sont liées principalement au droit d’auteur et à l’utilisation des licences des logiciels libres ou *open source* (FLOSS : *free/libre/open source software*), les points de réflexion soulevés dans la deuxième partie de [35] trouvent, depuis 2015, des avancées considérables, tant en France qu’ailleurs. Ces points de réflexion sont les suivants : définition, signature, références, liste des œuvres d’un laboratoire, libre accès, validation, qualité et évaluation, motivation, objet.

Nous souhaitons mentionner ici le deuxième plan national pour la science ouverte [65] publié en juillet 2021, dont le quatrième axe inclut l’ouverture et la promotion des codes sources produits par la recherche ainsi que la création du Collège codes sources et logiciels¹⁴ au sein du Comité pour la science ouverte (COSO)¹⁵. Les travaux en cours au COSO¹⁶ (et ailleurs, de façon plus générale) placent sur la table de discussion tous ces points de réflexion et d’autres comme la proposition des procédures de diffusion [33], [34], [56], [77] et d’évaluation [39] de ces productions scientifiques, et la question des plans de gestion de logiciels [48], [50], [63], les *conundrum challenges* [9], [46], les *FAIR principles* [5], [42], [43], [79].

Ces dernières références nous montrent le long chemin parcouru par les logiciels de la recherche, entre le fait d’être intégrés dans un plan national pour la science ouverte du ministère de la Recherche [65] en 2021 et une vision de *savoir tacite* en 1994 [69, p. 508] qui pouvait peut-être générer des retombées positives :

*What is alluded to here is that there may be important positive spillovers across projects in the form of ‘learning effects’. [...] which often remain in the region of tacit knowledge [...] including the development of generic computer software for performing data processing, storage, retrieval and network transmission*¹⁷.

L’analyse d’un point important dans toute production scientifique correspond à celui de l’équipe de production. En effet, il est très courant que les logiciels de ce type soient écrits, documentés et diffusés par une unique personne, mais l’équipe de production peut s’avérer complexe, et inclure des membres avec des statuts divers, qui peuvent contribuer à un logiciel avec des rôles très différents [39], [45]. Du point de vue du droit d’auteur, il est important de distinguer les auteurs et autrices du code, qui génèrent des

14. <https://www.ouvrirlascience.fr/college-codes-sources-et-logiciels/>.

15. <https://www.ouvrirlascience.fr/accueil/>.

16. Voir les productions du collège Codes sources et logiciels sur <https://www.ouvrirlascience.fr/college-codes-sources-et-logiciels/?menu=3>.

17. Il est ici sous-entendu qu’il peut y avoir d’importantes retombées positives entre les projets, sous forme d’effets d’apprentissage’. [...] qui restent souvent dans le domaine du savoir tacite [...] y compris le développement de logiciels génériques pour le traitement, le stockage, la récupération et la transmission de données en réseau.

droits d’auteur, des contributions mineures. Mais dans le contexte académique il arrive très régulièrement que les responsables du projet ne participent pas de façon importante à l’écriture du code. Par contre, ce rôle de responsable est à souligner en tant qu’activité, et souvent responsabilité académique. C’est pour cela que dans [39] nous avons sélectionné les trois rôles suivants pour présenter les trois types de contributions les plus importantes à un logiciel de la recherche, tout en sachant qu’une seule personne peut cumuler ces trois rôles, ou bien que les limites peuvent rester très floues :

- responsabilité de l’équipe ou du projet «logiciel de la recherche» ;
- contributions importantes (liées à l’écriture du code) ;
- contributions mineures (liées à des petites contributions à l’écriture du code ou à d’autres participations, comme la conception, la documentation, les tests...).

Comme expliqué dans [45], ces trois rôles peuvent être également mis en lumière pour la production des publications ou des données de la recherche, ce qui peut participer à faciliter la gestion des informations de *authorship* et *contributorship* du système CRediT, adopté par beaucoup de publications scientifiques [61].

Un autre point qui peut s’avérer important dans la compréhension de ces productions scientifiques correspond à la réalisation des catalogues de logiciels d’un laboratoire, comme ceux élaborés entre 2008 et 2018 au laboratoire d’informatique Gaspard-Monge (LIGM) par la première autrice de ce texte, dans le cadre des évaluations HCERES en 2013 et en 2019, [37], [38] (où nous avons utilisé les études [31], [33], [35]). Lorsque les documents du laboratoire sont préparés pour ces évaluations, il est relativement facile de lister les membres du laboratoire pour la période évaluée, en éliminant les personnels qui ne font plus partie du laboratoire, et de répertorier les publications de ces personnels associées aux dates de la période évaluée. Mais comment faire pour réaliser le catalogue des logiciels? Nous rappelons ici que les logiciels ne disposent pas d’une procédure de publication comme celle des articles scientifiques, qui associe, de façon précise, une référence, avec un titre, des auteurs et autrices, des dates, un lieu de publication, etc. à ces articles.

Pour illustrer ces difficultés, nous reprenons ici l’exemple du catalogue de logiciels LIGM, dont la première version (2008–2013) a été réalisée en utilisant les fiches RELIER [36] sur le serveur du projet CNRS PLUME¹⁸. La question se pose alors de déterminer les logiciels de ce premier catalogue à inclure dans le catalogue suivant pour la période 2013–2018. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé le concept de *logiciel actif* dans les textes de préparation de l’HCERES 2019, défini comme suit.

18. Le serveur du projet PLUME a été arrêté en 2022. Une trace du catalogue de logiciels LIGM avant 2013 est archivée sur Zenodo : <https://doi.org/10.5281/zenodo.7063170>.

Depuis 2013, un logiciel est considéré comme «*actif*» s'il vérifie au moins une des conditions suivantes :

- une partie du développement est réalisée depuis 2013 par un membre du laboratoire ;
- il existe des publications associées au logiciel, qui présentent des résultats obtenus avec ce logiciel, datées depuis janvier 2013, ou bien qui sont en préparation, ce qui veut dire que le logiciel est utilisé, revu, corrigé... et il est possible d'y associer des exemples d'utilisation ;
- il existe des activités de maintenance : corrections de bugs, échanges avec les utilisateurs...

Ceci reflète la durée de vie du logiciel, dont la fin arrive lorsque le développement et la maintenance du logiciel s'arrêtent, sans savoir, souvent, si ces activités vont reprendre ou pas dans un futur proche ou distant. Elle est différente de celle des articles et autres publications : en général on arrête de s'occuper d'un article lorsqu'il est publié, mais quand arrête-t-on de s'occuper d'un logiciel ?

Finalement, nous souhaitons mentionner les documents suivants [3], [5], [6], [7], [8], [16], [21], [40], [47], [52], [57], [65], [66], [67], [76], [77] pour d'autres questions de politique scientifique qui sont liées aux logiciels, ce qui complète cette section.

3. Logiciel, objet juridique

Cette section est dédiée aux bases juridiques de l'objet logiciel, liées principalement au droit d'auteur et à l'utilisation des licences des logiciels FLOSS [2], [4], [14], [30], [34], [35]. Le Code de la propriété intellectuelle [30] indique que le logiciel est une œuvre de l'esprit protégée par le droit d'auteur, et l'arrêté du ministère de l'Industrie du 22 décembre 1981 relatif à l'enrichissement du vocabulaire de l'informatique [68] donne la définition suivante.

Logiciel : ensemble des programmes, procédés et règles, et éventuellement de la documentation, relatifs au fonctionnement d'un ensemble de traitement de données (en anglais : software).

En tant qu'œuvre de l'esprit, il s'agit d'une œuvre écrite, et ce qui est écrit sont les programmes, ou le *code source* du logiciel. Nous parlerons ici de cet objet logiciel d'une manière globale, comme un ensemble (de fichiers) qui contient son code source et qui peut contenir d'autres objets comme le code compilé (s'il y en a), une documentation (ou plusieurs : documentation pour les utilisateurs, pour les possibles contributeurs, des exemples d'utilisation...), et peut-être aussi d'autres objets comme des tests, des procédures d'installation, des données... C'est en général un objet qui évolue dans le

temps et qui peut avoir plusieurs versions selon les nouvelles informations, fonctionnalités ou composantes qui y sont ajoutées, il peut y avoir une maintenance faite par l'équipe (ou l'entreprise¹⁹) responsable du logiciel qui se charge de la correction de bugs, de la maintenance et des nouveaux développements.

Comme indiqué dans la section précédente, un logiciel a une certaine durée de vie, dont la fin arrive lorsque le développement et la maintenance du logiciel s'arrêtent. Il peut être repris par la même équipe des années plus tard, ou bien par des nouvelles équipes, ce qui est favorisé par la diffusion de ces logiciels avec des licences de logiciels FLOSS.

Comme pour toute œuvre écrite, il est difficile d'éviter l'expression de la personnalité de ses auteurs ou autrices. Mais la question de l'originalité de cette œuvre a été révisée (réduite) par l'arrêt Pachot [10], du 7 mars 1986, selon le terme de «apport intellectuel» pour faire preuve :

[d'un] effort personnalisé allant au-delà de la simple mise en œuvre d'une logique automatique et contraignante.

Il y a eu plusieurs débats récents sur cette question de l'originalité d'un logiciel, notamment ceux organisés par la Compagnie nationale des experts de justice en informatique et techniques associées (CNEJITA) [23], [24], mais les travaux de P. Depaz [19], [20], [60] et de F. Pellegrini [70] montrent que l'originalité d'un logiciel n'est plus l'objet de l'arrêt Pachot.

Comme nous l'avons mentionné dans la section 2, le contexte juridique de base étudié dans [35] a peu évolué depuis 2015, mais nous souhaitons mentionner ici les points suivants qui vont compléter cette étude juridique, dont le premier fait référence aux droits patrimoniaux dans le cas des stages dans les établissements de recherche qui participent à des projets logiciels.

L'article 2 de l'ordonnance n° 2021-1658 du 15 décembre 2021 relative à la dévolution des droits de propriété intellectuelle sur les actifs obtenus par des auteurs de logiciels ou inventeurs non salariés ni agents publics accueillis par une personne morale réalisant de la recherche [29], [75] indique :

Art. L. 113-9-1. Sauf stipulations contraires, lorsque des personnes qui ne relèvent pas de l'article L. 113-9 et qui sont accueillies dans le cadre d'une convention par une personne morale de droit privé ou de droit public réalisant de la recherche créent des logiciels dans l'exercice de leurs missions ou d'après les instructions de la structure d'accueil, leurs droits patrimoniaux sur ces logiciels et leur documentation sont dévolus à cette structure d'accueil, seule habilitée à les exercer, si elles se trouvent à l'égard de cette structure dans une situation où elles perçoivent une

19. Ce document ne prend pas en compte le cas des entreprises ou des start-ups, y compris si elles ont une origine académique.

contrepartie et où elles sont placées sous l'autorité d'un responsable de ladite structure.

Par ailleurs, les logiciels issus de la recherche menée au sein des établissements publics dont les statuts prévoient une mission de recherche font l'objet de la section II de l'article 163 de la loi n° 2022-217 du 21 février 2022 relative à la différenciation, la décentralisation, la déconcentration, et portant diverses mesures de simplification de l'action publique locale [27] :

Le Gouvernement remet au Parlement, dans un délai de dix-huit mois à compter de la promulgation de la présente loi, un rapport sur la production et la valorisation des logiciels libres et propriétaires issus de la recherche menée au sein des établissements publics d'enseignement supérieur, des établissements publics à caractère scientifique et technologique, des établissements publics à caractère industriel et commercial et des autres établissements publics à caractère administratif dont les statuts prévoient une mission de recherche.

Ils font également l'objet de l'article 2 du décret n° 2021-1572 du 3 décembre 2021 relatif au respect des exigences de l'intégrité scientifique par les établissements publics contribuant au service public de la recherche [28] :

Les établissements publics et fondations reconnues d'utilité publique mentionnés au troisième alinéa de l'article L. 211-2 du code de la recherche : [...] 3° Promeuvent la diffusion des publications en accès ouvert et la mise à disposition des méthodes et protocoles, des données et des codes sources associés aux résultats de la recherche afin d'en garantir la traçabilité et la reproductibilité.

À noter que le seul accès aux codes sources sans avoir accès aux autres composantes du logiciel, comme par exemple la documentation, peut empêcher la reproductibilité qui est au centre des intérêts de cet article 2.

En ce qui concerne les licences de réutilisation, la loi de la République numérique [26] a prévu la création d'une liste de licences qui peuvent être utilisées par les administrations pour la réutilisation à titre gratuit de leurs informations publiques, liste qui contient des licences de logiciels FLOSS, et qui a été fixée par deux décrets : le décret n° 2017-638 du 27 avril 2017 et le décret n° 2021-1559 du 1^{er} décembre 2021 (voir la plateforme des données publiques françaises qui publie cette liste²⁰).

20. <https://www.data.gouv.fr/pages/legal/licences/>.

4. La question de l'usage ou « usage *vs* production »

Comme il est mentionné dans l'introduction, la question de l'*usage* se pose régulièrement au milieu des réflexions et des discussions qui ont conduit aux formulations des différentes définitions, et cette section est consacrée à analyser plus en détail ce sujet.

Par exemple, dans [51], les discussions intègrent un spectre qui va d'une définition inclusive, où l'usage de tout type de logiciel dans une activité de recherche lui donne une caractéristique de logiciel de la recherche, à une définition exclusive, qui fera partie de la formulation finale retenue (voir la section 6).

Ceci est également pris en considération dans [71], qui mentionne la caractéristique *production de la recherche* comme un premier critère pour soutenir la définition qui y est proposée, mais qui est déclaré comme non pertinent puisque de nombreux logiciels couramment utilisés, s'ils sont bien issus de travaux de recherche ne sont pas (ou plus) considérés comme des logiciels de la recherche. Le deuxième critère pour soutenir ladite définition pourrait être l'utilisation du logiciel au sein d'un environnement de recherche, critère qui soulève également des questions.

Nous souhaitons donc, ici, bien faire la distinction entre la production et l'usage, et les actions qui peuvent en dériver, puisque faire cette distinction nous semble essentiel pour mieux comprendre notre objet d'étude.

Comme il a été vu dans la section 3, la production d'un logiciel en milieu de recherche génère des droits d'auteur [30], [35] et donc un patrimoine immatériel auquel il est possible d'associer des actions de valorisation et de protection [8], [14], [57], [77]. Il nous semble plutôt difficile, voire impossible, d'associer des actions de valorisation au fait d'utiliser un logiciel, dans le milieu scientifique ou autre.

Par ailleurs, et comme argumenté dans [71], la question de l'usage peut soulever des questions. Mais, à notre avis, le fait d'utiliser un logiciel n'a pas d'incidence sur sa qualité en tant que logiciel de la recherche.

De nombreux logiciels sont utilisés, de façon consciente ou pas, à partir du moment où un chercheur ou une chercheuse se sert d'un ordinateur ou d'un téléphone portable pour ses activités quotidiennes de recherche ; ces logiciels font partie des niveaux mentionnés dans [53].

Quelle est la différence entre utiliser un logiciel comme Tex²¹ pour l'édition d'un texte (scientifique), dont la provenance du milieu académique ne pose pas de question mais dont les multiples successeurs et produits dérivés sont difficilement classés comme logiciels de la recherche, avec l'utilisation des logiciels de calcul scientifique comme Maple²², qui, de façon similaire, a une

21. <https://fr.wikipedia.org/wiki/TeX>.

22. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Maple>.

origine académique dans l'université de Waterloo, mais qui est devenu un produit propriétaire, dont la production et la maintenance dépassent largement le milieu scientifique initial ? À notre avis, l'usage de ces deux logiciels, l'un pour l'écriture d'un texte scientifique, l'autre pour faire des calculs scientifiques, ne permet pas de distinguer la nature scientifique de leur jeunesse — que nous pouvons qualifier en tant que logiciel de la recherche — ni de distinguer les arguments pour ou contre la qualification de logiciel de la recherche de la vie actuelle des multiples produits dérivés. Un autre exemple évoqué en [71] correspond aux logiciels de cryptographie garantissant la sécurité des échanges numériques, avec également une provenance du milieu scientifique et dont l'usage dépasse largement les milieux académiques.

D'un autre côté, il serait difficile de demander de rendre au Parlement des rapports sur l'usage des logiciels (de la recherche ou autres) afin d'éclairer le législateur sur les pratiques relatives au logiciel en vue de valoriser un certain patrimoine. Il pourrait être également compliqué de demander aux établissements publics de prendre des mesures pour la diffusion en accès ouvert des logiciels utilisés dans les activités de recherche et qui ne sont pas produits par les équipes hébergées dans ces établissements.

Pour compléter cette vision sur l'usage en milieu de recherche, nous reprenons ici la méthodologie de comparaison exploitée dans [35] : pour mieux comprendre les logiciels produits dans les laboratoires de recherche, faisons la comparaison entre la production des articles et des logiciels.

Il nous semble raisonnable d'affirmer que, en général, dans les milieux scientifiques, le concept de publication scientifique, la nature d'un article de recherche, ne soulève pas de question.

La science se construit en se tenant debout sur les épaules de géants²³... Que veut dire utiliser des articles pour produire des nouvelles connaissances présentées dans un nouvel article ? En général, les scientifiques étudient une bibliographie pour traiter un sujet d'étude, et ces travaux sont mentionnés dans le nouveau texte en forme de références et de citations. Mais les scientifiques ne réduisent pas les matériels à étudier, et à utiliser, aux seuls textes scientifiques. Prenons l'exemple des romans de Victor Hugo, qui ont été et sont toujours analysés dans des domaines scientifiques divers (sociologie, histoire, linguistique, littérature...), mais leur étude et leur utilisation dans ces contextes scientifiques ne leur font pas perdre leur nature initiale de roman, et ne peuvent les doter d'une nature de texte scientifique.

Nous pouvons également affirmer que les publications réalisées par des journalistes dans les journaux quotidiens ou hebdomadaires ne sont pas facilement classifiées comme des publications scientifiques, mais, néanmoins,

23. Isaac Newton, dans sa lettre à Robert Hooke le 5 février 1675, note cet aphorisme devenu célèbre : *Si j'ai vu plus loin, c'est en me tenant debout sur les épaules de géants...*

ceci n'est jamais un obstacle pour leur utilisation par des scientifiques de différents domaines comme source d'information.

Pour continuer avec notre méthodologie de comparaison, cette fois-ci entre logiciels et données de la recherche, nous souhaitons mentionner la définition de données de la recherche proposée dans [41], où la question du contexte de production scientifique rigoureux a été également soulevée. Comme pour les articles et les logiciels, ce contexte n'exclut en aucun cas l'utilisation des données d'origines diverses dans un contexte scientifique. Nous soulignons simplement l'importance de bien montrer l'origine des divers ensembles de données qui ont été utilisés dans un projet ou dans une étude, et d'expliquer, par exemple, si ces ensembles ont été modifiés pour la réalisation des travaux de recherche ; ceci afin de promouvoir les bonnes pratiques de citation, de transparence et d'intégrité qui facilitent la reproductibilité et la validation des résultats scientifiques obtenus avec ces données.

Par ailleurs, pour compléter et renforcer cette vision, nous faisons référence aux travaux juridiques de C. Domange [22], où il est affirmé :

Les informations publiques sont considérées comme des informations culturelles dès lors qu'elles sont détenues ou élaborées par une entité dont l'activité est directement culturelle. Le seul exercice d'une activité dans le secteur culturel ne suffit pas.

Ceci nous montre l'importance de l'origine des données pour pouvoir les qualifier de *données culturelles*, et nous pouvons donc faire une affirmation similaire pour les données et pour les logiciels de la recherche.

Nous pouvons ainsi écarter le seul critère de l'utilisation en tant que critère important pour définir un logiciel comme logiciel de la recherche : il doit être aussi élaboré dans un contexte de recherche. Il est bien sûr possible d'externaliser des parties du développement, ou bien de recruter des personnels en CDD pour faire des développements, mais cette activité restera sous le contrôle des scientifiques qui vont utiliser le logiciel, et nous pouvons, dans ce cas, interpréter les équipes de recherche d'une façon plus large (et sûrement temporaire) pour inclure ces activités. Voir [45] pour plus de réflexion sur les équipes de recherche.

Les sections 2, 3, 4 qui précèdent complètent le cadre de comparaison de la section 1. Les trois sections qui suivent sont dédiées à l'analyse des trois définitions sélectionnées comme nous l'avons annoncé dans l'introduction.

5. D1-COSO. Définition 1 : la définition COSO

Cette section est dédiée à l'étude des travaux présentés dans [71], faisant référence à la définition proposée par le collège Codes sources et logiciels (blog du Comité pour la science ouverte) en 2022 [66] :

Les logiciels de recherche sont développés pour répondre à des besoins spécifiques de la science. Ils sont conçus, maintenus, et utilisés par des scientifiques (chercheurs et ingénieurs) et institutions de recherche, éventuellement dans une dimension internationale. Ils peuvent découler de travaux de recherche comme ils peuvent les favoriser, notamment par des publications avant / sur / autour / avec le logiciel. Ceux-ci peuvent se formaliser de différentes façons (une plateforme, un intergiciel, un workflow ou une bibliothèque, module ou greffon d'un autre logiciel) et être ainsi en interaction dans un écosystème ou au contraire plus autonomes.

et les critères qui y sont analysés pour soutenir la proposition de cette formulation.

L'équipe de ce collège est composée, à la date d'écriture de ce texte, d'une quarantaine de personnes²⁴ et est organisée en 5 groupes de travail, mais nous n'avons pas trouvé d'information sur les personnes qui ont rédigé cette définition en 2022. Ce qui est mentionné dans [66] s'appuie sur un historique existant :

S'appuyant sur un historique de partage ancien et fortement lié aux pratiques communautaires développées dans le contexte des logiciels libres, la démarche de reconnaissance du logiciel en tant qu'élément incontournable de la production scientifique est bien entamée.

mais il ne semble pas y avoir d'autre information sur l'historique mentionné ou sur les travaux consultés. L'article [71], publié dans la revue juridique Lamy *Droit de l'immatériel*, mentionne deux références : [16], [66].

Cette définition place l'activité scientifique au centre de sa formulation et mentionne les activités associées (logiciels conçus, maintenus, et utilisés) par des scientifiques et des institutions de recherche. À noter que c'est la mise en forme, c'est-à-dire l'écriture des programmes (ie. du code source), qui génère des droits, et que l'étape de conception ne génère pas de droits sans cette mise en forme [30], [35]. Par ailleurs, cette définition n'indique pas si ces différentes activités sont réalisées par une même équipe, au sein d'une institution, ou bien s'il y a différentes équipes, liées à des institutions différentes. La possible dimension internationale est mentionnée, sans clarifier si elle s'applique à l'équipe qui développe et maintient le logiciel, ou bien au contexte d'utilisation. Il semble également un peu étrange d'associer des activités de conception, de maintenance ou d'utilisation à une institution.

Par ailleurs, dans [71], on trouve l'argument :

Il découle de cette analyse que des logiciels, tant issus de la recherche proprement dite que servant de façon spécifique à une activité de

24. <https://www.ouvrirlascience.fr/college-codes-sources-et-logiciels/?menu=4>.

recherche, ne peuvent être qualifiés de “logiciels de recherche” que dans la mesure où ils peuvent être liés à une activité mesurable (création, maintenance, modification à fin d’usage spécifique) et récente prenant place dans le monde de la recherche.

L’analyse de la section 4 nous a permis d’écarter les «logiciels servant de façon spécifique à une activité de recherche qui ne sont pas issus de la recherche proprement dite». Par ailleurs, une équipe qui produit un logiciel de la recherche le fait en relation avec une activité et un objectif de recherche, pour réaliser une étude, pour obtenir ou vérifier un résultat, pour faciliter la compréhension d’un objet. Mais cet objectif, qui s’inscrit généralement dans les activités quotidiennes de la recherche, peut évoluer dans le temps, l’équipe peut se doter de nouveaux objectifs et faire évoluer le logiciel dans un certain contexte, ou bien elle peut mettre ce logiciel de côté pour privilégier d’autres activités de recherche. Le logiciel peut être maintenu ou pas, rester *actif* ou pas. Il peut être réactivé des années plus tard par l’équipe initiale de développement ou bien par une nouvelle équipe.

Donc, l’activité de recherche et l’usage prévu du logiciel sont, à notre avis, en général, spécifiques au moment de la création, et peuvent se poursuivre ou pas, par des périodes alternées, suivant les évolutions de l’équipe et de ses activités de recherche, souvent en fonction des financements obtenus. Mais, comme toute activité de recherche, cette spécificité est évolutive, et il peut y avoir une grande variabilité. Dans [71] il est indiqué que :

... dans la mesure où ils peuvent être liés à une activité mesurable (création, maintenance, modification à fin d’usage spécifique) et récente prenant place dans le monde de la recherche.

Mais ceci nous semble soulever également des questions. Une bonne partie des logiciels répertoriés au LIGM entre 2008 et 2018 [37], [38] ne peut plus être associée à des activités mesurables et récentes de la recherche, et ceci ne peut pas avoir de conséquence sur leur qualité de logiciel de la recherche. Par ailleurs, les activités de la recherche sont parfois difficilement mesurables, les priorités peuvent varier énormément dans une année, peuvent dépendre des financements obtenus et de bien d’autres paramètres. Le concept de logiciel *actif* utilisé pour réaliser le catalogue des logiciels LIGM nous semble mieux décrire tous ces aléas.

Cette définition de logiciel de la recherche indique la formalisation des logiciels en tant que plateforme, intergiciel, *workflow*... ce qui reflète partiellement la dimension numérique de l’objet défini, mais qui implique aussi une certaine classification qui semble superflue.

Pour conclure cette section, il nous semble que plus de précision sur l’objet en soi, en tant qu’objet numérique et en tant que production scientifique, pourrait améliorer la clarté de la définition, ce qui pourrait, en conséquence,

apporter des réponses aux questions du type : quel est l'objet partagé? par qui? avec qui?... De plus, cette formulation de la définition D1-COSO semble également trop complexe pour pouvoir réaliser le parallèle avec la définition des données de la recherche.

6. D2-RDA. Définition 2 : la définition RDA

La définition que nous appelons ici D2-RDA a été proposée en 2021 au sein du groupe de travail FAIR4RS²⁵ de la Research Data Alliance (RDA)²⁶. Elle est publiée dans un document preprint sur Zenodo [51] :

Research Software includes source code files, algorithms, scripts, computational workflows and executables that were created during the research process or for a research purpose. Software components (e.g., operating systems, libraries, dependencies, packages, scripts, etc.) that are used for research but were not created during or with a clear research intent should be considered software in research and not Research Software. This differentiation may vary between disciplines. The minimal requirement for achieving computational reproducibility is that all the computational components (Research Software, software used in research, documentation and hardware) used during the research are identified, described, and made accessible to the extent that is possible²⁷.

Le groupe de travail associé à [51] est composé d'une trentaine de personnes avec des rôles différents : auteurs (*signataires*) de [51], ou bien membres du groupe FAIR4RS, ou bien relecteurs du document, et cette définition est le résultat d'amples discussions au sein de ce groupe. Le document fait référence à une vingtaine de publications (y compris [3], [39], [53], [59]) et à un workshop en 2021.

Cette définition place au centre la dimension numérique de l'objet, en listant les fichiers source du logiciel, les exécutables, les flux de calcul (*computational workflows*), les scripts et les algorithmes qui ont été créés tout le long d'un travail de recherche, avec un objectif de contribuer à cette recherche.

25. <https://www.rd-alliance.org/groups/fair-research-software-fair4rs-wg>.

26. <https://www.rd-alliance.org/>.

27. *Les logiciels de la recherche comprennent les fichiers de code source, les algorithmes, les scripts, les flux de calcul et les exécutables créés au cours du processus de recherche ou à des fins de recherche. Les composants logiciels (systèmes d'exploitation, bibliothèques, dépendances, packages, scripts, etc.) utilisés pour la recherche, mais n'ayant pas été créés pendant ou avec une intention de recherche claire, doivent être considérés comme des logiciels dans la recherche et non comme des logiciels de la recherche. Cette distinction peut varier selon les disciplines. L'exigence minimale pour atteindre la reproductibilité informatique est que tous les composants informatiques (logiciels de la recherche, logiciels utilisés en recherche, documentation et matériel) utilisés pendant la recherche soient identifiés, décrits et rendus accessibles dans la mesure du possible.*

Il nous semble que la terminologie de *computational workflow* a besoin de plus de clarté, nous faisons ici référence à la page Wikipédia *Scientific workflow system*²⁸, qui indique, dans sa section *Scientific workflows* :

*The simplest computerized scientific workflows are scripts that call in data, programs, and other inputs and produce outputs that might include visualizations and analytical results*²⁹.

Quelle est donc la différence entre logiciel, *computational workflow* et script ? Si nous comprenons correctement le contexte juridique, il n'a pas de distinction entre ces trois objets, qui sont protégés de la même façon en tant qu'œuvres de l'esprit.

Cette définition donne également un rôle central à l'activité de recherche, mais elle ne mentionne pas qui fait cette recherche, et donc elle manque la liaison avec l'objet juridique et les droits qui y sont générés, dont certains sont associés à ses auteurs et autrices et aux institutions qui sont leurs employeurs [14], [30], [35].

Par ailleurs, les algorithmes programmés dans un logiciel peuvent être créés au cours d'une activité de recherche spécifique, mais ils peuvent aussi être réalisés par d'autres équipes, tout à fait indépendantes de l'équipe associée au développement du logiciel. Également, l'objectif d'un logiciel peut être la comparaison de plusieurs algorithmes développés par plusieurs équipes, et donc ces algorithmes ne seront pas créés en même temps que le logiciel au sein d'une activité de recherche spécifique.

Il nous semble que cette définition manque de clarté dans la liste des éléments d'un logiciel, puisqu'elle ne propose pas une vision précise des objets logiciel, script ou *computational workflow*. Alors que la liaison avec l'activité de recherche est clairement établie, cette formulation ne mentionne pas l'équipe qui produit le logiciel ou la recherche, et donc ne facilite pas la réponse à la question « *qui partagera le logiciel ?* » Il nous semble donc que les dimensions de l'objet juridique et de l'objet numérique pourraient nécessiter de plus de précision.

De plus, une bonne formulation d'une définition doit éviter d'inclure la distinction entre les logiciels dans la recherche (ce qui fait référence à l'utilisation, comme analysé dans la section 4) et les logiciels de la recherche. Elle ne devrait pas inclure, non plus, l'objectif de la reproductibilité de la recherche, qui, bien qu'étant un objectif important dans la question « *pourquoi et à quels effets le logiciel est partagé ?* », n'est pas le seul objectif important [9], [41], [46].

Par ailleurs, nous ne voyons pas de façon simple comment faire le parallèle avec une possible définition des données de la recherche en suivant cette formulation.

28. https://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_workflow_system.

29. *Les flux de travail scientifiques informatisés les plus simples sont des scripts qui font appel à des données, des programmes et d'autres entrées et produisent des sorties pouvant inclure des visualisations et des résultats analytiques.*

7. D3-CDUR. Définition 3 : la définition CDUR

Pour terminer, cette section est dédiée à la définition suivante de logiciel de la recherche que nous avons proposée en 2019 [39] :

*Research software is a well identified set of code that has been written by a (again, well identified) research team. It is software that has been built and used to produce a result published or disseminated in some article or scientific contribution. Each research software encloses a set (of files) that contains the source code and the compiled code. It can also include other elements as the documentation, specifications, use cases, a test suite, examples of input data and corresponding output data, and even preparatory material*³⁰.

Cette définition trouve son origine dans l'expérience acquise tout le long des carrières scientifiques des deux auteurs en tant que développeurs de logiciels ou participants dans des projets et activités très diverses en relation avec des projets logiciels³¹. Cette expérience s'est particulièrement enrichie avec la *Mission logiciels LIGM* [32], [37], [38] et la participation au projet national CNRS PLUME [4], [31], [33], [35], [36], études et travaux qui se poursuivent, depuis 2018, dans plusieurs publications [39], [41], [42], [45], [46], [47].

Toute cette expérience accumulée nous a permis d'observer, de façon directe, les problématiques que les logiciels soulèvent dans nos laboratoires et nos projets de recherche, et cela au niveau local et national, international ou au sein d'une équipe, dans des communautés scientifiques diverses.

Cette définition a fait l'objet d'une publication [39] dans le journal *F1000-Research*³² et a bénéficié d'une procédure d'*open peer review* où les rapports des *referees* sont publiés avec l'article. Cette publication a deux versions, la deuxième prenant en compte les commentaires et les propositions d'amélioration des rapporteurs; elle inclut un total de 80 références, dont 22 sont mentionnées dans sa section 2.1, *Research software definition*.

Cette définition place l'équipe de développement au centre de la formulation, faisant ainsi la liaison avec la définition juridique de logiciel en tant qu'œuvre de l'esprit qui a des auteurs ou autrices et des droits associés. Mais elle souligne aussi les aspects relatifs à une production scientifique, faite par une équipe, et indique clairement l'objectif d'une activité de recherche, ce qui

30. Un logiciel de la recherche est un code bien identifié, écrit par une équipe de recherche (là encore bien identifiée). Il s'agit d'un logiciel développé et utilisé pour produire un résultat publié ou diffusé dans un article ou une contribution scientifique. Chaque logiciel de recherche inclut un ensemble (de fichiers) contenant le code source et le code compilé. Il peut également inclure d'autres éléments tels que la documentation, les spécifications, les cas d'utilisation, une suite de tests, des exemples de données d'entrée et de données de sortie correspondantes, et même du matériel préparatoire.

31. Voir <https://openalex.org/works?page=1&filter=authorships.author.id:a5029421675>, par exemple.

32. <https://f1000research.com/>.

est aussi souligné dans [59] (voir aussi [53]), où D. Kelly propose la définition suivante :

*Scientific software is defined by three characteristics: (1) it is developed to answer a scientific question; (2) it relies on the close involvement of an expert in its scientific domain; and (3) it provides data to be examined by the person who will answer that question [...]*³³

Cette formulation de D. Kelly, publiée en 2011, montre déjà les différents rôles qui peuvent intervenir dans un développement logiciel, où les personnes qui développent le code peuvent être différentes de l'expert qui traitera la question scientifique; des réflexions qui ont été également étudiées dans [33] et [35] (voir la section 2).

Finalement, cette définition D3-CDUR explique le logiciel de la recherche comme un sous-ensemble de l'ensemble *logiciel*, et traite ainsi le contexte numérique lorsqu'il y est mentionné l'ensemble de fichiers qui peut contenir des objets de natures différentes : code source, code compilé, documentation et peut-être d'autres éléments.

Basés sur cette vision, nous avons proposé des procédures de diffusion [33], [34], les protocoles CDUR d'évaluation [39], [42], des réponses aux *conundrum challenges* (quels logiciels sont destinés à être partagés, par qui, avec qui, comment, où, dans quelles conditions, pourquoi et à quels effets...?) [46] et des études sur l'adoption des politiques de *free/open source software* dans des institutions scientifiques [40], [47].

Comme déjà mentionné, depuis nos premiers travaux sur les logiciels [35], [39] nous utilisons une méthodologie de comparaison entre des productions diverses, ce qui nous a aidé à mieux comprendre ces objets. En particulier, cette méthodologie nous a permis de proposer une définition de données de la recherche (*research data*) qui trouve une formulation similaire à celle des logiciels de la recherche, travaux qui sont analysés en profondeur dans [41], [42].

Research data is a well identified set of data that has been produced (collected, processed, analyzed, shared & disseminated) by a (again, well identified) research team. The data has been collected, processed and analyzed to produce a result published or disseminated in some article or scientific contribution. Each research data encloses a set (of files) that contains the dataset maybe organized as a database, and it can also include other elements as the documentation, specifications, use cases, and any other useful material as provenance information, instrument

33. Les logiciels scientifiques se définissent par trois caractéristiques : (1) ils sont développés pour répondre à une question scientifique; (2) ils reposent sur l'implication étroite d'un expert dans leur domaine scientifique; et (3) ils fournissent des données à examiner par la personne qui répondra à cette question [...]

*information, etc. It can include the research software that has been developed to manipulate the dataset (from short scripts to research software of larger size) or give the references to the software that is necessary to manipulate the data (developed or not in an academic context)*³⁴.

Cette définition de données de la recherche a été estimée par R. Cerda-Cosme et E. Mendez l'une des formulations les plus complètes [11].

En résumé, il nous semble que cette formulation de définition D3-CDUR correspond aux critères d'une bonne définition [18] : elle spécifie ce qui est ou pas inclus dans l'objet à définir sans imprécision ni obscurité. Elle montre également les caractéristiques importantes relatives aux logiciels de la recherche en tant que objets numériques, scientifiques et juridiques, et n'inclut pas de classification. Par ailleurs, elle fournit une base solide pour les réponses que nous avons proposées aux *conundrum challenges* [46] et facilite une formulation similaire pour définir les données de la recherche [41], [42].

8. Discussion

Cette section est dédiée à la comparaison entre les trois définitions étudiées dans les sections 5, 6 et 7 en suivant la méthode proposée dans la section 1. Nous faisons remarquer que cette discussion correspond à notre perception du sujet des logiciels de la recherche, qui est supportée par notre expertise diverse et nos travaux précédemment publiés. Cette discussion est résumée dans la table sur la figure 1.

34. *Les données de la recherche constituent un ensemble de données bien identifié, qui a été produit (données collectées, traitées, analysées, partagées et diffusées) par une équipe de recherche (également bien identifiée). Ces données ont été collectées, traitées et analysées afin de produire un résultat publié ou diffusé dans un article ou une contribution scientifique. Chaque ensemble de données de la recherche comprend un ensemble de fichiers contenant les données organisées, éventuellement, sous forme de base de données. Il peut également inclure d'autres éléments tels que la documentation, les spécifications, les cas d'utilisation et tout autre élément utile, comme des informations sur la provenance, les instruments, etc. Il peut inclure le logiciel de la recherche développé pour manipuler les données (de courts scripts à des logiciels de la recherche plus volumineux) ou fournir les références aux logiciels nécessaires à la manipulation des données (développés ou non dans un contexte académique).*

	D1-COSO	D2-RDA	D3-CDUR
Cadre d'élaboration de la formulation :			
- équipe	nationale	internationale	internationale
- nb. de personnes	?	21	2
- type de publication	article	preprint	article, avec <i>open peer review</i>
- nb. de références	2	18	22
Qualité de la formulation	faible	faible	forte
Compréhension de l'objet numérique	faible	forte	forte
Compréhension de la production scientifique	forte	forte	forte
Compréhension de l'objet juridique	faible	faible	forte
Réponses aux <i>conundrum challenges</i>	partielles	partielles	complètes
Compréhension de <i>données de la recherche</i>	faible	faible	forte

Fig. 1. Les dix points du cadre de comparaison des trois définitions.

Les trois définitions étudiées (D1-COSO, D2-RDA, D3-CDUR) ont été proposées dans trois contextes différents : le premier correspond à une équipe nationale (en France), mais sans spécifier les auteurs et autrices du texte ; le deuxième correspond à une équipe internationale et il inclut les discussions d'une trentaine d'experts d'horizons divers ; le troisième correspond à une équipe de deux experts avec des expériences complémentaires.

Les équipes du COSO et de RDA sont composées par un grand nombre de membres, qui ont étudié une large bibliographie, mais cette bibliographie n'est pas précisée dans le cas du COSO, qui fait référence à un historique de partage ancien. Deux personnes ont formé l'équipe CDUR, mais l'origine de ce travail se place dans plusieurs contextes de collaboration, et comprennent, entre autres, le laboratoire d'informatique LIGM [37], [38] et le projet national CNRS PLUME [31], [35], [36]. Cette équipe a consulté également une large bibliographie. La définition D3-CDUR semble être la seule qui a bénéficié d'un cadre de comparaison entre deux types de productions scientifiques, les articles et les logiciels.

Ces trois définitions sont diffusées dans des documents librement accessibles. La définition D2-RDA est diffusée dans un preprint disponible sur Zenodo [51], les définitions D1-COSO et D3-CDUR ont fait l'objet de publications scientifiques avec une procédure de *referee* [39], [42], [71]. Les publications de l'équipe CDUR ont fait l'objet d'un *open peer review*. Il nous semble que la qualité de la formulation, la clarté et la précision peuvent être améliorées dans le cas des définitions D1-COSO et D2-RDA.



Comme il a été argumenté dans la section 1, une *bonne définition* de l'objet logiciel de la recherche doit appréhender de façon claire trois aspects importants : la production scientifique et numérique, mais sans oublier le contexte juridique qui apparaît naturellement dans la création des œuvres de l'esprit. Les programmes (ie. le code source) de ces logiciels sont écrits par des personnes, ce qui va générer des droits mais, également, doter cet objet de sa nature de production scientifique. Ce point est correctement pris en considération par les définitions D1-COSO et D3-CDUR, mais peut être amélioré dans D2-RDA. La mention des éléments qui composent le logiciel en tant qu'objet numérique peut être améliorée dans la définition D1-COSO.

La capacité de répondre aux questions du *conundrum challenges* (quel est le logiciel à partager, par qui, avec qui, dans quelles conditions, pourquoi et à quels effets) qui est suscitée par les définitions étudiées nous semble un complément important qui montre la justesse de chaque définition, ainsi que le fondement scientifique solide du travail effectué pour comprendre cet objet et pour éviter les ambiguïtés qui peuvent encore l'entourer. De ce point de vue, il nous semble que les travaux associés à la définition D3-CDUR sont ceux qui sont les plus complets, puisqu'ils bénéficient de ce cadre de comparaison avec la production d'articles dans leur phase initiale [35], [39] mais qui ont été, aussi, poursuivis dans le cadre de comparaison avec les données

de la recherche [41], [42], ce qui a entraîné une étude complète des *conundrum challenges* dans [46].

En résumant, cette étude fournit un cadre de comparaison et une méthodologie qui nous a permis d'analyser en détail le concept de logiciel de la recherche et de comparer trois formulations récemment proposées. Il confirme et consolide notre compréhension de cet objet complexe, ce qui nous permet de réaffirmer la définition D3-CDUR proposée dans [39].

Nous espérons ainsi pouvoir contribuer à la conception, la mise en œuvre et à l'adoption des politiques scientifiques qui sont pertinentes pour cet objet. Ces politiques portent sur la gestion d'un patrimoine scientifique et sur les méthodes de diffusion et d'évaluation qui seront choisies dans le cadre de la science ouverte. Elles portent également sur la conception, la construction et la mise en place des services et des infrastructures qui vont participer à rendre cette production plus visible, accessible et réutilisable [40].

Remerciements.

Nous remercions les équipes du collège Codes sources et logiciels et du groupe de travail RDA FAIR4RS pour avoir inspiré les réflexions présentées ici. La version finale de ce texte a bénéficié des commentaires et corrections de plusieurs personnes que nous remercions chaleureusement.

Références

- [1] K. S. Ackroyd, S. H. Kinder, G. R. Mant et al. 2008. Scientific Software Development at a Research Facility. *IEEE Software* 25, 4: 44-51. <https://doi.org/10.1109/MS.2008.93>.
- [2] T. Aimé. 2010. Guide pratique d'usage des logiciels libres dans les administrations. *DGFiP - Ministère du Budget, des Comptes Publics et de la Reforme de l'État*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7191385>.
- [3] P. Alliez, R. Di Cosmo, B. Guedj et al. 2020. Attributing and Referencing (Research) Software: Best Practices and Outlook From Inria. *Computing in Science & Engineering* 22, 1: 39-52. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2019.2949413>.
- [4] J.-L. Archimbaud & T. Gomez-Diaz. 2009. FAQ : licence & copyright pour les développements de logiciels libres de laboratoires de recherche. *Projet PLUME (2007–2013)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7063146>.
- [5] M. Barker, N. P. Chue Hong, D. S. Katz et al. 2022. Introducing the FAIR Principles for research software. *Scientific Data* 9, 622. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01710-x>.
- [6] M. Barker, J. Cohen, P. Hernández Serrano et al. 2025. Institutional Policy Pathways for Supporting Research Software: Global Trends and Local Practices. *Journal of Open Research Software* 13, 39. <https://doi.org/10.5334/jors.625>.
- [7] I. Blanc Catala, R. Di Cosmo, M. Giraud et al. 2023. Establishing a national research software award [version 1; peer review: 2 approved]. *Open Research Europe* 3, 185. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.16069.1>.

- [8] I. Blanc, P. Boulet, G. Courbebaisse et al. 2024. *Production et valorisation des logiciels issus de la recherche publique française*. Comité pour la science ouverte. <https://doi.org/10.52949/47>.
- [9] C. L. Borgman. 2012. The conundrum of sharing research data. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 63, 6: 1059-1078. <https://doi.org/10.1002/asi.22634>.
- [10] Cour de cassation. 1986. Assemblée Plénière 83-10.477 du 7 mars 1986. Publié au bulletin. Consulté à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/juri/id/JURITEXT000007016934>.
- [11] R. Cerda-Cosme & E. Mendez. 2025. Scoping review on research data in Spain: Academic output and developing trends. *The Journal of Academic Librarianship* 51, 6. <https://doi.org/10.1016/j.acalib.2025.103151>.
- [12] Y. Chen, X. Lu & Y.-F. Chen. 2014. Close connections between open science and open-source software. *PeerJ PrePrints* 2, e235v1. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.235v1>.
- [13] Z. Chinchilla-Rodríguez, R. Costas, V. Larivière et al. 2022. The relationship between corresponding authorship and author position. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6957638>.
- [14] M. Clément-Fontaine. 2024. Le cadre juridique des codes sources et des logiciels en Science ouverte. (Dossier spécial : La science ouverte (partie 1) : Les logiciels et codes sources de recherche). *Revue Lamy Droit de l'immatériel* 210. Consulté à l'adresse <https://hal.science/hal-05009877>.
- [15] M. Clément-Fontaine. 2024. L'accès aux connaissances logiciels : enjeux et perspectives pour l'intelligence artificielle et la Science ouverte. *Propriété industrielle* 4, 4. Consulté à l'adresse <https://hal.science/hal-04884965>.
- [16] M. Clément-Fontaine, R. Di Cosmo, B. Guerry et al. 2019. *Note d'opportunité sur la valorisation des logiciels issus de la recherche*. Comité pour la science ouverte. <https://doi.org/10.52949/17>.
- [17] European Commission. 2024. Living guidelines on the responsible use of generative AI in research. Consulté à l'adresse https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/2b6cf7e5-36ac-41cb-aab5-0d32050143dc_en?filename=ec_rtd_ai-guidelines.pdf.
- [18] E. Dayton & K. Rodier. 2024. *Critical Thinking, Logic, and Argument: An Introduction*. (French Google translation available at: https://read-aupress-ca.translate.google.com/read/critical-thinking-logic-and-argument/section/6d3e9906-c0a5-42c4-b841-f69295b75560?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=fr&_x_tr_hl=fr&_x_tr_pto=rq). Athabasca University Press, Athabasca, AB Canada.
- [19] P. Depaz. 2021. The Craft of Code. Consulté à l'adresse <https://hal.science/hal-04365925>.
- [20] P. Depaz. 2023. The role of aesthetics in understanding source code. Université de la Sorbonne nouvelle - Paris III. Consulté à l'adresse <https://theses.hal.science/tel-04588711>.
- [21] R. Di Cosmo, S. Granger, K. Hinsén et al. 2025. Stop treating code like an afterthought: record, share and value it. *Nature* 646. <https://doi.org/10.1038/d41586-025-03196-0>.
- [22] C. Dommange. 2013. *Rapporteur. Guide Data Culture. Pour une stratégie numérique de diffusion et de réutilisation des données publiques numériques du secteur culture*. Ministère de la Culture et de la Communication. Secrétariat Général. Consulté à l'adresse <https://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/documents/60533-guide-data-culture.pdf>.

- [23] Compagnie nationale des experts de justice en informatique et techniques associées (CNEJITA). 2021. L'originalité du logiciel en question, JFC du 13 avril 2021. Consulté à l'adresse <https://www.cnejita.org/jfc-du-13-04-2021-14h-17h-sur-zoom-loriginalite-du-logiciel-en-question>.
- [24] Compagnie nationale des experts de justice en informatique et techniques associées (CNEJITA). 2023. Quelle place reste-t-il pour l'originalité du logiciel? Colloque du 3 avril 2023. Consulté à l'adresse <https://www.cnejita.org/product/colloque-3-avril-2023>.
- [25] M. Farge. 2017. Scholarly publishing and peer-reviewing in open access. In *Europe's Future: Open Innovation, Open Science, Open to the World. Reflections of the Research, Innovation and Science Policy Experts (RISE) High Level Group*. European Commission: Directorate-General for Research; Innovation, 73-81. <https://doi.org/10.2777/348700>.
- [26] République française. 2016. Loi n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique. Consulté à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000033202746>.
- [27] République française. 2022. Loi n° 2022-217 du 21 février 2022. Article 163. Loi relative à la différenciation, la décentralisation, la déconcentration et portant diverses mesures de simplification de l'action publique locale. Consulté à l'adresse http://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000045197616.
- [28] République française. 2021. Décret n° 2021-1572 du 3 décembre 2021 relatif au respect des exigences de l'intégrité scientifique par les établissements publics contribuant au service public de la recherche et les fondations reconnues d'utilité publique ayant pour activité principale la recherche publique. Consulté à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044411360>.
- [29] République française. 2021. Ordonnance n° 2021-1658 du 15 décembre 2021 relative à la dévolution des droits de propriété intellectuelle sur les actifs obtenus par des auteurs de logiciels ou inventeurs non-salariés ni agents publics accueillis par une personne morale réalisant de la recherche. Consulté à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000044501327>.
- [30] République française. 2026. Code de la Propriété intellectuelle. (Version en vigueur au 26 mars 2026). Consulté à l'adresse https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEX000006069414.
- [31] T. Gomez-Diaz. 2007–2013. Le thème PLUME « Patrimoine logiciel d'un laboratoire ». (Zenodo Community). *Projet PLUME (2007–2013)*. Consulté à l'adresse <https://zenodo.org/communities/plume-patrimoine-logiciel-laboratoire>.
- [32] T. Gomez-Diaz. 2007–2026. Page web with presentations, articles, posters and other productions since 2007. (Laboratoire d'informatique Gaspard-Monge (LIGM)). Consulté à l'adresse <https://ligm.univ-eiffel.fr/~teresa/logicielsLIGM>.
- [33] T. Gomez-Diaz. 2010. Diffuser un logiciel de laboratoire : recommandations juridiques et administratives. *Projet PLUME (2007–2013)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7096216>.
- [34] T. Gomez-Diaz. 2014. Free software, Open source software, licenses. A short presentation including a procedure for research software and data dissemination. (Preprint). Presented at the Workshop on open licenses: Data licencing and policies, EGI Conference 2015, Lisbon, May 2015, <https://indico.egi.eu/event/2452/sessions/1522/>. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7096216>.
- [35] T. Gomez-Diaz. 2015. Article vs. Logiciel : questions juridiques et de politique scientifique dans la production de logiciels. 1024 : *Bulletin de la Société Informatique de France* 5: 119-140. <https://doi.org/10.48556/SIF.1024.5.119>.

- [36] T. Gomez-Diaz. 2019. Le Projet PLUME et le paysage actuel des logiciels de la recherche dans la science ouverte. (Preprint). <https://doi.org/10.5281/zenodo.2591474>.
- [37] T. Gomez-Diaz. 2021. Free/Open source Research Software production at the Gaspard-Monge Computer Science laboratory (LIGM). Lessons learnt. In *FOSDEM'21*. Consulté à l'adresse https://fosdem.org/2021/schedule/event/open_research_gaspard_monge.
- [38] T. Gomez-Diaz. 2021. Sur la production de logiciels libres au laboratoire d'informa-tique Gaspard-Monge (LIGM) : ce que nous avons appris. In *Atelier BlueHats*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10970140>.
- [39] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2019. On the evaluation of research software: the CDUR procedure [version 2; peer review: 2 approved]. *F1000Research* 8, 1353. <https://doi.org/10.12688/f1000research.19994.2>.
- [40] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2020–2021. Towards an Open Science definition as a poli-tical and legal framework: on the sharing and dissemination of research outputs. (Version 3 dated 28 February 2021 available at <https://doi.org/10.5281/zenodo.4577065>). *POLIS* 19. <https://doi.org/10.58944/yuro5734>.
- [41] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2022. Research Software vs. Research Data I: Towards a Research Data definition in the Open Science context [version 2; peer review: 3 appro-ved]. *F1000Research* 11, 118. <https://doi.org/10.12688/f1000research.78195.2>.
- [42] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2022. Research Software vs. Research Data II: Protocols for Research Data dissemination and evaluation in the Open Science context [version 2; peer review: 2 approved]. *F1000Research* 11, 117. <https://doi.org/10.12688/f1000research.78459.2>.
- [43] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2023. How to achieve FAIRER research data by studying evaluation & assessment protocols. (Poster). Open Science FAIR 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8398431>.
- [44] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2024. Open comments on the « Open Letter: Establishing a national research software award ». *Open Research Europe*. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.16069.1>.
- [45] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2024. Articles, software, data: An Open Science etholo-gical study. *Maple Transactions* 3, 4. <https://doi.org/10.5206/mt.v3i4.17132>.
- [46] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2024. The Conundrum Challenges for Research Software in Open Science. *Computers* 13, 11. <https://doi.org/10.3390/computers13110302>.
- [47] T. Gomez-Diaz & T. Recio. 2025. Perceptions on the adoption of Free/Open Source Software policies by a Scientific Institution. The case study of the NIH. *Maple Tran-sactions* 5, 3. <https://doi.org/10.5206/mt.v5i3.22904>.
- [48] T. Gomez-Diaz & G. Romier. 2018. Research Software Management Plan template, V3.2. PRESOFT project: Preservation for REsearch SOFTware. (Document bilingue (FR/EN)). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1405614>.
- [49] R. Gröpler, S. Klepke, J. Johns et al. 2025. The Future of Generative AI in Software Engineering: A Vision from Industry and Academia in the European GENIUS Project. (Preprint). Consulté à l'adresse <https://arxiv.org/abs/2511.01348>.
- [50] Y. Vincent Grossmann, G. Lanza, K. Biernacka et al. 2024. Software Management Plans – Current Concepts, Tools, and Application. *The CODATA Data Science Journal* 23, 43. <https://doi.org/10.5334/dsj-2024-043>.
- [51] M. Gruenpeter, D. S. Katz, A.-L. Lamprecht et al. 2021. Defining Research Software: a controversial discussion. (Preprint). <https://doi.org/10.5281/zenodo.5504016>.

- [52] S. Hettrick. 2016. *Research software sustainability: report on a knowledge exchange workshop*. Knowledge Exchange. Consulté à l'adresse https://repository.jisc.ac.uk/6332/1/Research_Software_Sustainability_Report_on_KE_Workshop_Feb_2016_FINAL.pdf.
- [53] K. Hinsén. 2019. Dealing With Software Collapse. *Computing in Science and Engineering* 21, 3: 104-108. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2019.2900945>.
- [54] K. Hinsén. 2025. Reviewing Research Software. *Computing in Science and Engineering* 27, 3: 64-66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2025.3601909>.
- [55] C. Hudelot. 2025. Vers des LLMs ouverts et transparents pour l'Europe : conception, adaptation et explicabilité. In *Assises Nationales des Données de la Recherche (ANDOR)*. Consulté à l'adresse https://andor2025.sciencesconf.org/data/pages/Keynote_LLM_Celine_Hudelot_PPT_Andor.pdf.
- [56] R. C. Jiménez, M. Kuzak, M. Alhamdoosh et al. 2017. Four simple recommendations to encourage best practices in research software [version 1; peer review: 3 approved]. *F1000Research* 6, 876. <https://doi.org/10.12688/f1000research.11407.1>.
- [57] N. Jullien. 2024. La valorisation économique des logiciels scientifiques. (Dossier spécial : La science ouverte (partie 1) : Les logiciels et codes sources de recherche). *Revue Lamy Droit de l'immatériel* 210. Consulté à l'adresse <https://hal.science/hal-04473408>.
- [58] P. Kamocki, T. Bond, K. Lindén et al. 2024. Mind the Ownership Gap? Copyright in AI-generated Language Data. In *CLARIN Annual Conference*. Consulté à l'adresse <https://www.ecp.ep.liu.se/index.php/clarin/article/download/1024/931/1053>.
- [59] D. Kelly. 2024. An Analysis of Process Characteristics for Developing Scientific Software. *Journal of Organizational and End User Computing (JOEUC)* 23, 4. <https://doi.org/10.4018/joeuc.2011100105>.
- [60] X. de La Porte. 2024. France Inter podcast du 7 juin 2024. Le code a changé. « Esthétique du code ». Consulté à l'adresse <https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/le-code-a-change/le-code-a-change-11-9775071>.
- [61] V. Larivière, D. Pontille & C. R. Sugimoto. 2021. Investigating the division of scientific labor using the Contributor Roles Taxonomy (CRediT). *Quantitative Science Studies* 2, 1: 111-128. https://doi.org/10.1162/qss_a_00097.
- [62] Md. Ariful Islam Malik, J. C. Carver, & N. U. Eisty. 2025. Peer code review in research software development: The research software engineer perspective. *Empirical Software Engineering* 31, 2. <https://doi.org/10.1007/s10664-025-10785-0>.
- [63] M. G. Santangelo, V. Louvet, S. Chachay et al. 2025. Recommandations Recherche Data Gouv – Collège Codes sources et logiciels pour le questionnaire dédié aux codes sources et logiciels de recherche. Consulté à l'adresse https://dmp.opidor.fr/guidance_group_export/1160.pdf.
- [64] B. Mermet. 2025. IA et développement logiciel : où va-t-on ? 1024 : *Bulletin de la Société Informatique de France* 25: 189-199. <https://doi.org/10.48556/SIF.1024.25.189>.
- [65] Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. 2021. Deuxième Plan national pour la science ouverte. Généraliser la science ouverte en France 2021–2024. Consulté à l'adresse <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/le-plan-national-pour-la-science-ouverte-2021-2024-vers-une-generalisation-de-la-science-ouverte-en-48525>.
- [66] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Collège Codes sources et logiciels. 2022. Le logiciel de recherche, un pilier de la recherche scientifique ouverte. Blog du Comité pour la science ouverte. Consulté à l'adresse <https://www.ouvrirlascience.fr/le-logiciel-de-recherche-un-pilier-de-la-recherche-scientifique-ouverte>.

- [67] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Comité pour la science ouverte. 2022. Science ouverte – Codes et logiciels. Consulté à l'adresse <https://www.ouvrirlascience.fr/science-ouverte-codes-et-logiciels>.
- [68] Ministère de l'Industrie. 1981. Arrêté du 22 décembre 1981 du ministère de l'Industrie relatif à l'enrichissement du vocabulaire de l'informatique. Consulté à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000842020>.
- [69] D. Partha & P. A. David. 1994. Toward a new economics of science. (Special Issue in Honor of Nathan Rosenberg). *Research Policy* 23, 5: 487-521. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(94\)01002-1](https://doi.org/10.1016/0048-7333(94)01002-1).
- [70] F. Pellegrini. 2016. L'originalité des œuvres logicielles. *Rapport de recherche RR-8945*. Inria Bordeaux Sud-Ouest, université de Bordeaux. 2016, pp. 13. Consulté à l'adresse <https://inria.hal.science/hal-01352700>.
- [71] F. Pellegrini. 2024. Qu'est-ce qu'un logiciel de recherche? (Dossier spécial : La science ouverte (partie 1) : Les logiciels et codes sources de recherche). *Revue Lamy Droit de l'immatériel* 210. Consulté à l'adresse <https://inria.hal.science/hal-04476872>.
- [72] R. Arikrishna Perumal. 2025. The role of AI tools like ChatGPT and Copilot in revolutionizing software development and user experiences. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology* 11, 1: 125-131.
- [73] D. Pontille. 2002. La signature scientifique. Authentification et valeur marchande. *Actes de la Recherche en Sciences Sociales* 2, 141: 72-78. <https://doi.org/10.3917/arss.141.0072>.
- [74] A. S. Pothukuchi, L. V. Kota, & V. Mallikarjunaradhya. 2023. Impact of Generative AI on the Software Development Lifecycle (SDLC). *International Journal of Creative Research Thoughts* 1, 8. Consulté à l'adresse <https://ssrn.com/abstract=4536700>.
- [75] A. Robin. 2024. Exploitation de l'innovation. *Cahiers Droit, Sciences & Technologies* 18. <https://doi.org/10.4000/1271j>.
- [76] B. Saenen. 2025. *Developing and Aligning Policies on Research Software: Recommendations for Research Funding and Research Performing Organisations*. Science Europe. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14622355>.
- [77] S. Tonda-Goldstein, M. Clément-Fontaine, N. Jullien et al. 2025. *Quelles stratégies de diffusion et pérennité pour les logiciels de recherche dans les établissements publics français?* Comité pour la science ouverte. <https://doi.org/10.52949/82>.
- [78] UNESCO. 2021. Recommandation de l'UNESCO sur une science ouverte. Consulté à l'adresse https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949_fre.
- [79] M. D. Wilkinson, M. Dumontier, IJ. J. Aalbersberg et al. 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data* 3, 1. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.

Effets environnementaux de la 5G (partie 3)

Philippe Ciblat

LTCI, Telecom Paris, IP Paris, EcoInfo

Jacques Combaz

Université de Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, VERIMAG, EcoInfo

Marceau Coupechoux

LTCI, Telecom Paris, IP Paris, LinCS, EcoInfo

Kevin Marquet

Université de Lyon, INSA Lyon, Inria, CITI, EcoInfo

Anne-Cécile Orgerie

Université de Rennes, Inria, CNRS, IRISA, EcoInfo

Ce document a pour objectif de rassembler les connaissances actuelles liées aux effets environnementaux de la 5G. Il s'articule autour de questions liées à ces effets. Pour cela, il est organisé en trois parties. La première donnait les bases nécessaires à la compréhension de la technologie elle-même, elle a été publiée en octobre 2022 [30]. La deuxième détaillait les services rendus possibles par la 5G, elle a été publiée en novembre 2024 [31]. La dernière partie, présentée ici, porte sur les effets environnementaux du déploiement de la 5G.

Effets environnementaux de la 5G

Après les deux premiers volets publiés précédemment ([30] et [31]), nous examinons ici l'impact environnemental de la 5G, ou plus exactement ses effets environnementaux puisque ceux-ci peuvent être de différentes natures comme nous allons le voir. La question des effets environnementaux de la 5G a occupé

plusieurs fois l'attention de la presse [29], [69], [83], [87] et des médias en général. L'essentiel des discussions sur ce sujet porte sur la consommation énergétique du réseau et plus précisément sur son *efficacité énergétique* qui s'annonce supérieure à celle de la 4G [26]. Mais, comme nous le verrons dans la suite, une meilleure efficacité énergétique ne garantit pas d'économie d'énergie.

De plus, la consommation électrique du réseau ne recouvre qu'une partie des impacts environnementaux de la 5G. Comme pour tout équipement informatique, les équipements de la 5G (smartphones, antennes, etc.) génèrent différents impacts tout au long de leur cycle de vie, tels que la déplétion des ressources, l'acidification des océans et des sols, etc. [100]. En particulier, pour les smartphones, la phase d'usage n'est très souvent pas prépondérante : la phase de fabrication concentre la majeure partie des impacts environnementaux (voir par exemple les analyses de cycles de vie fournies par Samsung pour les smartphones 4G et 5G [99]).

Parmi les arguments fréquemment employés en faveur du déploiement de la 5G, il y a celui de ses bénéfices environnementaux indirects : les applications qu'il sera possible de bâtir grâce à la 5G sont amenées à transformer les autres secteurs d'activité (transports, agriculture, industrie, etc.) et donc à modifier leurs impacts environnementaux [26]. Le bilan de ces transformations sera-t-il bénéfique ou néfaste d'un point de vue de l'environnement ? Il n'existe aujourd'hui pas de réponse définitive à cette question, pour la 5G en particulier comme pour la numérisation en général. En 2022, le GIEC indiquait dans son sixième rapport sur l'atténuation du changement climatique que les effets de la numérisation étaient mal compris à l'heure actuelle et que, sans une gouvernance appropriée, celle-ci conduirait probablement à augmenter la demande en énergie et les émissions de gaz à effet de serre [65 p.140]. C'est aussi ce que nous pourrions conclure à propos du développement de la 5G comme nous allons le voir dans la suite.

La figure 1 illustre le périmètre de cet article de manière exhaustive : les effets directs (consommation énergétique, émissions de gaz à effet de serre, épuisement des ressources naturelles, émissions de particules fines, etc.) des équipements numériques (terminaux, équipements réseau et centres de calcul) tout au long de leur cycle de vie (fabrication, distribution, installation, usage, maintenance et fin de vie), les effets indirects (obsolescence, effets rebond, effets de substitution, etc.) sur les autres secteurs (tels que l'agriculture ou le transport), les scénarios prospectifs qui explorent des futurs possibles de cette technologie et enfin les recherches en informatique menées dans le contexte actuel de l'anthropocène.

Les différentes sections et questions posées tout au long de cet article tentent de couvrir l'état des connaissances actuelles sur ce périmètre. Ces connaissances étant incomplètes, nous ne couvrons donc que partiellement la vue exhaustive de la figure 1.

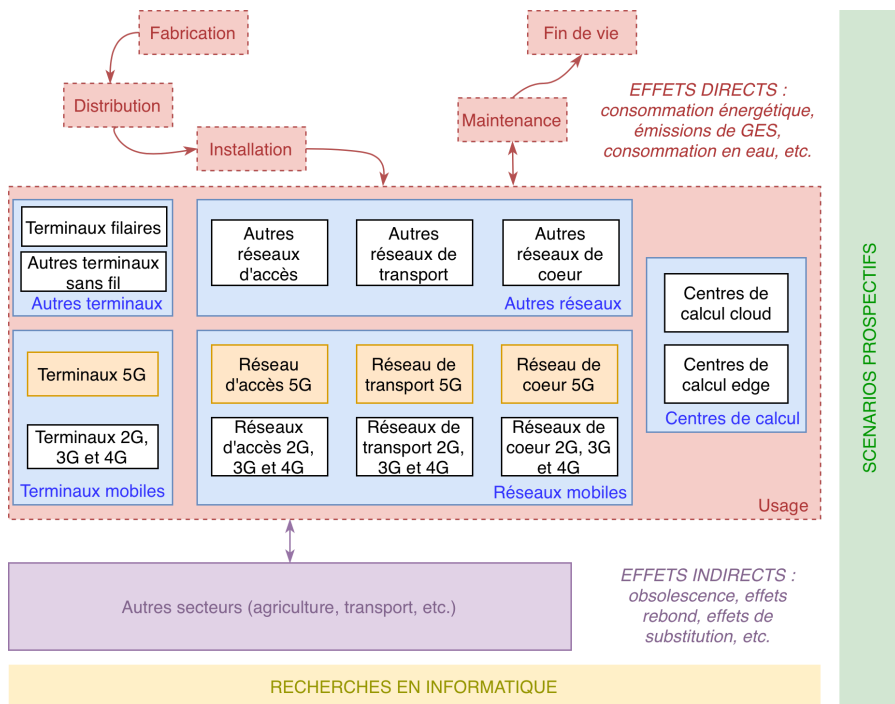


Fig. 1. Illustration du périmètre de cet article sur les effets environnementaux de la 5G incluant les effets directs sur tout le cycle de vie, les effets indirects, les scénarios prospectifs qui explorent les futurs possibles et les recherches en informatique menées dans le contexte de l'anthropocène.

Quelle est l'efficacité énergétique de la 5G ?

QU'EST-CE QUE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE D'UN RÉSEAU SANS FIL ?

L'*efficacité énergétique* d'un réseau désigne la quantité de bits d'information transmis par unité de consommation d'énergie. Elle peut donc s'exprimer en bits/J (ou Go/kWh). L'*intensité énergétique* désigne quant à elle exactement l'inverse : la quantité d'énergie qu'il faut pour transporter une certaine quantité de données. Elle est typiquement exprimée en J/bit (ou kWh/Go).

La consommation énergétique d'un équipement du réseau, typiquement une station de base, n'est généralement pas une fonction linéaire du trafic servi ou de sa charge (cette dernière est définie comme la proportion de ressources temps-fréquence utilisée, lissée sur une fenêtre de temps suffisamment grande). Le modèle affine est toutefois souvent utilisé par souci de

simplification, voir par exemple [13]. En effet, la consommation énergétique se compose :

- d’une partie dite statique, c’est-à-dire indépendante de la charge, il peut s’agir par exemple du système de refroidissement du site ou des traitements nécessaires à la transmission des signaux de synchronisation ;
- d’une partie dynamique qui croît avec le trafic réseau, par exemple la puissance de transmission, les opérations de codage et décodage, la modulation et démodulation ou autres traitements du signal qui requièrent une capacité de calcul croissante avec le débit.

On peut ajouter à cette fonction un point de discontinuité lorsqu’il n’y a pas de trafic pour prendre en compte l’effet d’une mise en veille de l’équipement comme illustré dans la figure 2.

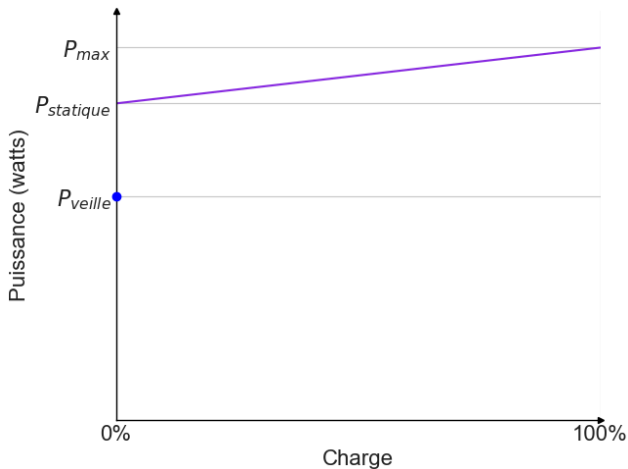


Fig. 2. Modèle simplifié de la consommation énergétique d’une station de base.

Ainsi, lorsque les auteurs de [11] indiquent que l’intensité énergétique du transfert de données via le réseau Internet est de 0,06 kWh/Go, il s’agit en fait d’estimations basées sur un trafic moyen. Du fait des coûts énergétiques fixes, ce chiffre augmente (respectivement diminue) si le trafic moyen diminue (respectivement augmente). En d’autres termes, plus le trafic est important, plus la partie fixe est proportionnellement faible dans la consommation totale et donc, plus l’efficacité énergétique est importante. De plus, les technologies radio ont évolué au cours du temps, soit pour réduire cette consommation fixe, par exemple en introduisant et en améliorant des modes de veille, soit pour augmenter la quantité de données par unité d’énergie dans la partie dynamique, par exemple en utilisant les MIMO massifs (voir

la section « *Comment (technologiquement) va-t-on atteindre ces performances?* » du premier volet de notre étude pour en savoir plus [30]) ou en améliorant l'efficacité des amplificateurs de puissance.

Lorsque des valeurs d'efficacité énergétique (ou de façon équivalente d'intensité énergétique) sont avancées, il convient donc de savoir à quelles conditions de trafic elles s'appliquent et quel est le périmètre des équipements réseau considéré. Très souvent, il s'agit du cas le plus favorable, c'est-à-dire lorsque le réseau est chargé au maximum de sa capacité, ce qui n'arrive jamais en conditions réelles. En effet, pour des raisons de performances, de qualité de service ou de tolérance aux pannes, les opérateurs préfèrent ne pas utiliser leurs équipements en limite de capacité et s'emploient plutôt à ajouter des équipements réseaux lorsque ceux-ci s'en approchent. Le fait que l'efficacité énergétique d'un réseau soit plus élevée que celle d'un autre dans ce cas théorique ne signifie pas forcément qu'elle le sera en pratique sur le trafic réellement observé.

La littérature scientifique s'est beaucoup intéressée par ailleurs à l'efficacité énergétique théorique d'une communication radio. Il existe un compromis intéressant qui relie l'efficacité et la puissance émise. En effet, le débit est une fonction croissante de la puissance reçue au récepteur et donc transmise par l'émetteur; on peut le constater par exemple avec la formule de Shannon. Mais quand la puissance émise augmente, c'est aussi la consommation énergétique qui augmente, de telle sorte qu'une puissance optimale peut apparaître pour maximiser l'efficacité énergétique (voir encart ci-dessous). Par exemple, les auteurs de [21] ont calculé l'efficacité théorique d'une communication radio en se basant sur les équations physiques de propagation d'onde et l'entropie de Shannon notamment. Ils indiquent que pour un nombre réaliste d'antennes et des gains de canaux réalistes, on peut espérer atteindre une efficacité énergétique de l'ordre de quelques Tbit/J.

Cependant, cette étude, et d'autres du même type, n'indiquent pas que l'on puisse atteindre cette efficacité dans des conditions de trafic réelles (notamment car le débit réel est plus petit que la capacité de Shannon et que le trafic est sporadique ou pas adapté à la valeur du débit obtenu en optimisant l'efficacité énergétique) ou avec des technologies économiquement viables. Comme dans l'exemple montré dans l'encart ci-dessous, on voit aussi que les gains théoriques les plus importants sont atteints en adaptant la puissance de transmission à la puissance statique, parfois au détriment du débit. Or, en pratique, certains opérateurs se contentent de configurer les stations de base pour qu'elles émettent à des puissances fixes en privilégiant les débits, sans considération pour l'efficacité énergétique [7].

QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE D'UNE LIAISON RADIO

On étudie succinctement dans cet encart le compromis entre débit et consommation énergétique sur un modèle théorique simplifié.

On se fixe une durée T_0 maximale pendant laquelle on peut transmettre un paquet de longueur L bits. Le temps effectif de la transmission est $T \leq T_0$ secondes et l'émetteur entre en mode veille pendant les $(T_0 - T)$ secondes restantes. Notons que la durée T dépend du débit et donc de la puissance d'émission de l'émetteur P via la relation $D(P) = L/T$. On supposera que le débit $D(P)$ est une fonction doublement dérivable, strictement croissante, strictement concave, et telle que $D(0) = 0$. La puissance consommée en mode veille est notée P_s . En supposant un amplificateur parfait on a alors l'efficacité énergétique suivante :

$$\mathcal{E}(P) = \frac{L}{(P + P_c)T + (T_0 - T)P_s} = \frac{D(P)}{(P + P_c) + (T_0 D(P)/L - 1)P_s} \quad (1)$$

où P_c est la puissance statique (c'est-à-dire de circuiterie), vérifiant $P_c \geq P_s$. Rappelons que $T \leq T_0$, c'est-à-dire que $L/D(P) \leq T_0$ ou que $P \geq P_{\min}$ avec $P_{\min} = D^{-1}(L/T_0)$. Par construction, l'énergie E utilisée par le réseau pendant la durée T_0 est :

$$E = L/\mathcal{E}(P) \quad (2)$$

On cherche à minimiser cette quantité d'énergie E ou, de manière équivalente dans ce modèle simplifié, à maximiser l'efficacité énergétique du réseau $\mathcal{E}(P)$. Puisqu'il faut assurer la transmission de l'intégralité du paquet pendant la durée T_0 , on cherche une puissance $P^* \geq P_{\min}$ maximisant $\mathcal{E}(P)$. Pour étudier les valeurs maximales de $\mathcal{E}(P)$, on étudie le signe de sa dérivée $\mathcal{E}'(P)$. Quand elle est définie, cette dernière a le même signe que l'expression suivante :

$$D'(P)(P + P_c - P_s) - D(P) \quad (3)$$

On peut montrer facilement qu'avec les hypothèses prises sur $D(P)$, fonction doublement dérivable, la quantité (3) est strictement décroissante. En particulier, si $\mathcal{E}(P)$ admet un maximum il est unique.

Cas 1 — Le réseau ne possède pas de mode veille, $P_s = P_c \geq 0$

Dans ce cas, puisque (3) est nulle pour $P = 0$, on a $\mathcal{E}'(P) < 0$ pour $P > 0$, ce qui veut dire que l'efficacité énergétique est strictement décroissante. La puissance optimale est donc $P^* = P_{\min}$. Par conséquent, il s'agit d'émettre à la puissance la plus faible possible, $P_{\min}$, c'est-à-dire au débit minimal L/T_0 . Notez que cette situation couvre en particulier le cas où la puissance statique est nulle, $P_c = P_s = 0$.

Cas 2a — Le réseau possède un mode veille, $P_s < P_c$

Dans ce cas, sous quelques hypothèses peu restrictives en pratique, l'efficacité énergétique $\mathcal{E}(P)$ atteint une valeur maximale pour une puissance $\tilde{P} > 0$ annulant

l'expression (3). Cette puissance dépend uniquement de la fonction $D(P)$ et de la différence entre la puissance statique et la puissance en veille ($P_c - P_s$). La puissance optimale est obtenue alors en posant $P^* = \max(\tilde{P}, P_{\min})$. En fonction des valeurs des paramètres L et T_0 , on peut avoir $P^* = \tilde{P} > P_{\min}$, c'est-à-dire un débit optimal supérieur au débit minimal assurant la transmission du paquet. Néanmoins il convient de mentionner que la littérature ne considère généralement pas ce cas mais le cas particulier où $P_s = 0$, que nous développons dans ce qui suit.

Cas 2b — Le réseau possède un mode veille parfait, $P_s = 0$ et $P_c > 0$

Ce cas correspond aussi à un trafic continu qui ne nécessiterait jamais de mise en veille. La forme typique de la fonction $\mathcal{E}(P)$, en supposant $D(P) = \log_2(1 + P)$, est illustrée en figure 3 pour deux valeurs de P_c . On constate que le maximum de l'efficacité énergétique est plus élevé lorsque la puissance statique est plus faible, ce qui était bien sûr attendu. On voit également que l'efficacité énergétique maximale n'est pas obtenue à pleine puissance, c'est-à-dire au débit maximal. De plus, la puissance $\tilde{P}$ qui maximise l'efficacité énergétique (matérialisée par les traits en pointillés sur la figure) augmente avec P_c . Autrement dit, plus le coût statique est élevé et plus il est intéressant d'envoyer à forte puissance pour mettre rapidement le système en veille.

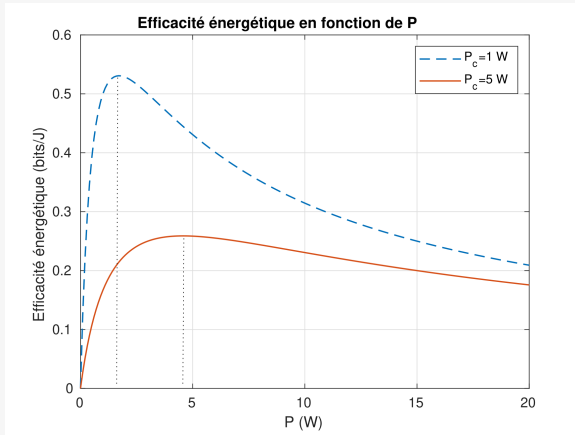


Fig. 3. Efficacité énergétique en fonction de la puissance émise.

En conclusion, dès que les puissances de veille (émission inactive) et de circuiterie (partie fixe quand émission active) ont la même valeur, le système le plus efficace énergétiquement induit l'utilisation de la puissance la plus petite autorisée ($P_{\min}$). En revanche dès que $P_c > P_s$ (qui peut correspondre à plusieurs cas de figure dont le cas traditionnel $P_c > P_s = 0$), le résultat de l'optimisation conduit à choisir une puissance potentiellement plus élevée que la puissance minimale et qui croît avec l'écart ($P_c - P_s$).

L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE L'INFRASTRUCTURE 5G EST-ELLE MEILLEURE QUE CELLE DE LA 4G ?

Nous l'avons vu, la technologie 5G propose plusieurs améliorations (modes veilles, meilleure efficacité spectrale, etc.) qui vont dans le sens d'une meilleure efficacité énergétique. Comme nous l'avons expliqué dans la première partie de notre étude [30], ces améliorations sont nécessaires afin de maintenir les coûts à des niveaux raisonnables dans le cas où le trafic continuerait à augmenter de façon importante (cf. deuxième partie de notre étude [31]), puisque la consommation électrique du réseau constitue une part non négligeable de ses coûts d'opération [95].

Puisque l'efficacité énergétique dépend notamment du trafic, pour comparer deux réseaux mobiles, il convient d'abord de préciser le niveau de trafic considéré. On pourrait par exemple s'intéresser à faire transiter le même volume de données sur différentes générations de réseaux (3G, 4G, 5G). Évidemment il s'agirait là d'une comparaison théorique puisque que chaque génération s'accompagne d'une augmentation du trafic du fait des nouveaux usages qu'elle apporte, comme détaillé dans la deuxième partie de notre étude [31].

D'après certains travaux, un réseau 5G devrait être plus efficace qu'un réseau 4G pour les niveaux de trafic attendus par les opérateurs [108], [109]. Il reste cependant encore beaucoup d'incertitudes sur les performances réelles qu'auront les réseaux 5G dans les années à venir, en partie parce que celles-ci vont dépendre des choix d'implantation (nombre et emplacement des stations, fréquences, fonctionnement des modes veilles, etc.), mais aussi parce qu'il n'est pas toujours aisé d'anticiper les progrès qui seront fait en la matière.

En se fondant sur des mesures effectuées sur des réseaux pilotes en Espagne et au Brésil, Ericsson et Telefonica affirment que la 5G est jusqu'à 90 % plus efficace que la 4G en termes de consommation énergétique par unité de trafic (en W/Mbps) [27]. Plusieurs études ont montré des gains significatifs en termes d'énergie émise en l'absence de trafic utilisateur. La suppression de certains signaux, dits de référence, consommant en 4G de l'énergie en permanence même en l'absence de trafic, permet en 5G d'émettre de 4 à 10 fois moins de puissance (en mode *idle* avec une périodicité du bloc de signaux de synchronisation SSB de 20 ms), selon les environnements et les configurations de station de base [46]. Les mêmes ordres de grandeurs se retrouvent dans le rapport de l'ARCEP sur l'efficacité énergétique de la 5G dont la figure 4 est tirée [32].

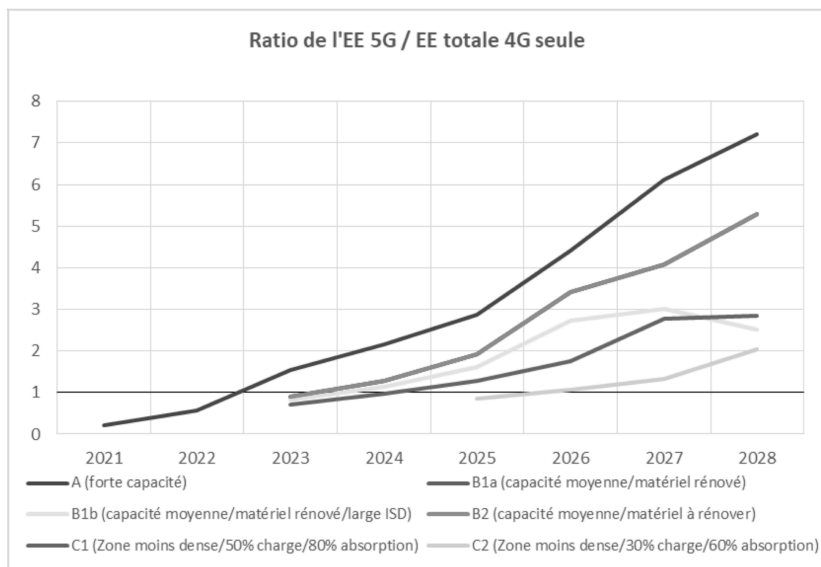


Fig. 4. Ratio de l'efficacité énergétique (EE) de la 5G sur celui de la 4G pour différents scénarios de déploiements fictifs explorés par l'ARCEP. Figure extraite de [32].

Elle montre le ratio entre l'efficacité énergétique de la 5G et celui de la 4G au cours du temps pour différents scénarios de déploiement d'un réseau fictif décrit dans le document. On remarque que les gains les plus importants ne seront atteints qu'après plusieurs années, c'est-à-dire quand la charge des cellules 5G sera importante. Pour la même raison, les gains sont moins importants en zones peu denses que dans les grandes villes. On observe même en début de déploiement une perte d'efficacité énergétique due au déploiement de stations de base desservant un très faible trafic. Ce phénomène a été également identifié en Chine par les auteurs de [73] qui parlent de *carbon efficiency trap* (la consommation électrique étant convertie en empreinte carbone). Enfin, on observe un facteur 7 dans le meilleur des cas en fin de période étudiée. En termes d'ordre de grandeur, [21] évalue, en se fondant sur [13], à environ 20 kbit/J l'efficacité énergétique de la 4G. Les auteurs de [54] proposent un ordre de grandeur similaire avec 15 kbit/J et estiment que la 5G a une efficacité 8 à 12 fois supérieure, soit au maximum 178 kbit/J (on est loin des valeurs théoriques obtenues dans la section précédente). Ces références permettent de conclure que dans un réseau réel, l'efficacité énergétique de la 5G est probablement supérieure d'environ un ordre de grandeur (10 fois supérieure) à celle de la 4G dans le meilleur des cas.

Dans tous les cas, une plus grande efficacité énergétique ne signifie pas nécessairement une consommation électrique globale plus faible, en valeur absolue, comme détaillé plus loin.

POURRAIT-ON SE CONTENTER D'AMÉLIORER LA 4G ?

Il faut d'abord rappeler que les réseaux mobiles ne restent pas figés pendant une génération avant de changer radicalement. La norme évolue continuellement de façon à améliorer et enrichir la technologie actuelle. La technologie EDGE avait permis de transmettre des données sur les réseaux 2G et la norme HSPA (3G+) avait constitué une évolution très significative de la 3G. La dernière version de la 4G, une sorte de 4G++, appelée LTE-Advanced Pro par le 3GPP (releases R13 et R14) vient enrichir le LTE-Advanced qui était déjà une évolution de la 4G. Grâce à ces évolutions successives, de nombreux concepts de la 5G avaient déjà été progressivement intégrés à la 4G. La 4G++ permet par exemple d'atteindre des débits de 3,9 Gbps grâce à de l'agrégation de porteuses et des MIMO massifs (certes dans des conditions bien particulières où l'opérateur dispose de nombreuses bandes 4G), mais aussi une latence de 2 ms. Elle inclut également des fonctionnalités dédiées à l'Internet des objets [84]. Pour bénéficier de cette norme, il faut bien sûr que l'opérateur ait mis à jour son réseau et que l'utilisateur ait un terminal compatible avec cette 4G++.

La différence entre la 4G++ et la 5G devient alors ténue. En fait, quand le 3GPP décide de changer de génération, il pousse un cran plus loin les performances en se dégageant des contraintes de rétrocompatibilité qui s'imposent à la 4G++. Les modes de microveilles de la 5G semblent par exemple difficilement compatibles avec la transmission continue des signaux de référence de la 4G. En réorganisant la transmission de ces signaux, la 5G permet donc d'améliorer l'efficacité énergétique. Le réseau cœur est également complètement repensé pour intégrer les contraintes de latences et les possibilités offertes par la virtualisation.

On voit donc qu'optimiser la 4G plutôt que de déployer la 5G comme le préconisait *The Shift Project* [106] n'a pas grand sens si l'on se place dans la perspective d'un accroissement illimité des performances en termes de débits et de latences, si on alloue de nouvelles bandes à la 4G et si l'on augmente de nombre d'antennes. La 5G est une refonte qui permet justement d'améliorer l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale (en bit par seconde et par hertz). Quant au renouvellement des équipements, il est difficile de trancher sur ce qui serait plus coûteux d'un point de vue environnemental : mettre à jour le réseau et les terminaux pour supporter la 4G++ ou bien la 5G.

En conclusion, optimiser la 4G pour en faire une 5G qui ne porte pas son nom, ne semble pas une piste prometteuse face aux défis environnementaux,

notamment si les objectifs qui guident l'évolution de la technologie mobile restent inchangés.

Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur la consommation électrique des réseaux mobiles ?

EFFETS SUR LES GÉNÉRATIONS PRÉCÉDENTES

Supposons dans un premier temps que l'introduction de la 5G n'ait aucun effet sur le volume total du trafic mobile (cet effet est abordé juste après). Dans ce cas une partie de ce trafic (ou de son augmentation) serait supportée par le réseau 5G, c'est-à-dire que l'introduction de la 5G permettrait au trafic transitant sur les générations 2G, 3G et 4G d'augmenter moins rapidement, voire de diminuer. Ceci conduirait à des économies sur la consommation électrique des générations 2G, 3G et 4G, mais celles-ci seraient faibles dans la mesure où ces générations sont reconnues pour avoir une faible proportionnalité énergétique, c'est-à-dire une consommation électrique statique très élevée par rapport à la partie dynamique (voir figure 2).

Pour obtenir des réductions importantes de consommation électrique sur ces réseaux, il faudrait tout simplement les décommissionner, à commencer par les réseaux 2G et 3G. Jusqu'à aujourd'hui, on a constaté un phénomène d'empilement plutôt que de substitution des couches réseau, comme nous l'avons illustré avec les déploiements en parallèle des réseaux 3G et 4G dans la deuxième partie de cette étude [31] (dans la section : «*La 5G va-t-elle induire une augmentation du trafic ?*»). Néanmoins, d'ici 2029 les réseaux 2G et 3G devraient être définitivement arrêtés en France [47]. Les ressources fréquentielles ainsi libérées pourront être utilisées par des générations plus récentes de réseaux.

Selon l'ARCEP [8], la consommation énergétique des réseaux 2G et 3G dans la bande 900 MHz représente environ 20 % de la consommation des réseaux mobiles, mais cette proportion est appelée à décroître avec le temps et la croissance de la 5G. L'arrêt de ces réseaux ne représentera pas cependant un gain net de 20 % car les fréquences seront réutilisées par les opérateurs pour la 4G ou la 5G.

Le déploiement d'une nouvelle génération de réseaux mobiles s'appuie en grande partie sur les générations précédentes, notamment en réutilisant les stations de base existantes. En effet, il est fréquent que plusieurs générations soient déployées sur un même site, permettant ainsi de mutualiser une partie des équipements de la station de base, la partie mutualisée dépend notamment des générations déployées et des bandes de fréquences utilisées [72]. Cette mutualisation de l'infrastructure atténue les coûts de déploiement par nouvelle génération, mais participe à l'empilement des générations plutôt qu'à leur substitution. La mutualisation des infrastructures

peut aussi se faire entre les opérateurs, ce qui permet potentiellement de limiter la consommation électrique des réseaux mobiles. Ce levier est surtout vu par le secteur comme un moyen de réduire les coûts [56] mais pourrait aussi être vu comme un frein à la concurrence.

CONSUMMATION ÉNERGÉTIQUE DES RÉSEAUX ACTUELS

L'enquête annuelle de l'ARCEP «*Pour un numérique soutenable*» parue en 2024 fournit la consommation des réseaux fixes et mobiles en France de 2017 à 2022 (figure 5). Il est à noter que ces données n'incluent pas la consommation des box (box fibres, DSL ou 5G). Ces données illustrent l'augmentation de la consommation totale des réseaux année après année sur cette période et le fait que cette consommation est en grande partie due aux réseaux mobiles. En effet, pour 2022, les réseaux mobiles représentent 63 % de la consommation totale, soit 2,6 TWh, avec une augmentation de 14 % par rapport à 2021 alors que l'augmentation était de 6 % l'année précédente. L'enquête indique que cette forte augmentation provient de la croissance de la consommation de données transitant sur les réseaux mobiles (+28 % en 2022) et du déploiement de sites mobiles (+7300 en 2022).

L'ANFR (Agence nationale des fréquences) répertorie toutes les installations radioélectriques de plus de 5 Watts en France de façon mensuelle [2]. Ces données permettent de tracer les figures 6 et 7 grâce aux scripts fournis par [4]. La figure 6 représente l'évolution du nombre de stations de base en

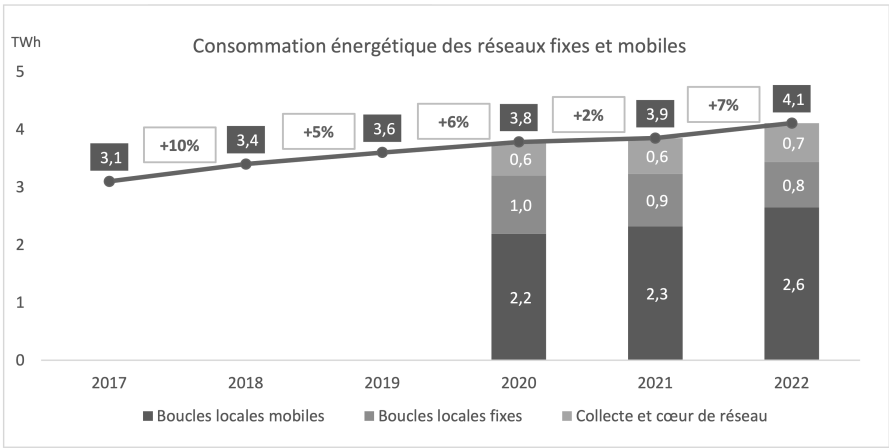


Fig. 5. Consommation énergétique des réseaux fixes et mobiles en France selon l'ARCEP. Figure extraite de [9].

service en France. Depuis l'introduction de la 5G, les sites n'offrant que de la 2G ou de la 3G ont quasiment disparu. Les sites combinant 2G, 3G et 4G ont beaucoup diminué, tandis que les sites 2G/3G/4G/5G, 3G/4G et 3G/4G/5G ont augmenté jusqu'à fin 2025. Fin 2025, les sites 3G/4G/5G ont fortement diminué pour être remplacés par des sites 4G/5G (ceci est probablement lié au décommissionnement des antennes 3G, c'est-à-dire à l'arrêt de l'exploitation des antennes 3G, et donc à leur démantèlement). Cependant, il est à noter que le nombre de sites n'offrant que la 3G et la 4G continue de progresser en 2026.

On peut également remarquer qu'en l'espace de 10 ans, le nombre de stations de base a doublé, passant de 59 150 en avril 2015 à 120 656 en avril 2025. L'introduction de la 5G ne semble pas avoir significativement modifié la tendance générale de déploiement en termes de nombre de stations de base (courbe « toutes générations »). La symétrie entre les courbes 2G/3G/4G et 2G/3G/4G/5G d'un côté et les courbes 3G/4G et 3G/4G/5G de l'autre indique que la 5G a été déployée depuis 2021 principalement sur des stations de base déjà existantes. Nous avons choisi de ne pas reporter sur la figure certaines combinaisons existantes (par exemple 3G/5G ou 2G/4G) car elles représentent chacune moins de 1 % des cas.

La figure 7 présente quant à elle le nombre d'émetteurs-récepteurs en service en France. En effet, comme on vient de le voir sur la figure précédente, une même station de base peut être équipée de plusieurs émetteurs-

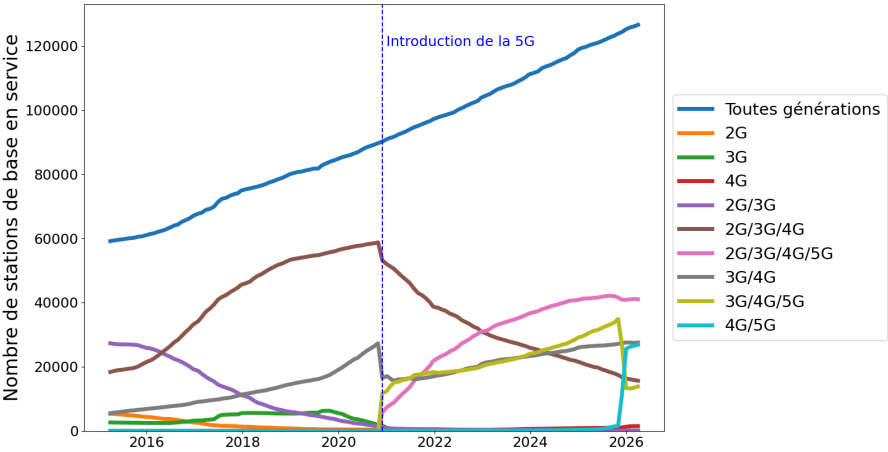


Fig. 6. Nombre de stations de base en service en France en fonction des technologies installées selon l'ANFR.

récepteurs offrant ainsi plusieurs technologies pour un même site. On observe que le déploiement des émetteurs-récepteurs 5G et 4G sont en augmentation, ces derniers représentant la moitié des équipements en service en 2025. On remarque également qu'en l'espace de 10 ans, le nombre d'émetteurs-récepteurs a été multiplié par quatre, passant de 471 605 en avril 2015 à 2 052 155 en avril 2025. Ces déploiements ont amélioré la couverture des opérateurs mobiles au niveau national ainsi que le débit offert aux utilisateurs et utilisatrices.

Sur la figure 7, on observe également que l'introduction de la 5G n'a pas infléchi le déploiement d'émetteurs-récepteurs 4G (i.e. la pente de la courbe n'a pas diminué). On peut également remarquer que la 4G a mis plusieurs années pour devancer la 2G et la 3G en termes de nombre d'émetteurs-récepteurs. En effet, la 4G a été introduite en France fin 2012 et le nombre d'émetteurs-récepteurs de la 4G n'a dépassé celui de la 2G qu'en 2017 (année où ce nombre commence à décroître pour la 2G) et celui de la 3G qu'en 2018 (ce nombre a, quant à lui, continué d'augmenter jusqu'en 2023 pour la 3G). Ainsi, le déploiement d'une nouvelle génération mobile met de nombreuses années à freiner le déploiement des générations précédentes et l'effet d'empilement des générations se poursuit bien après l'introduction d'une nouvelle génération.

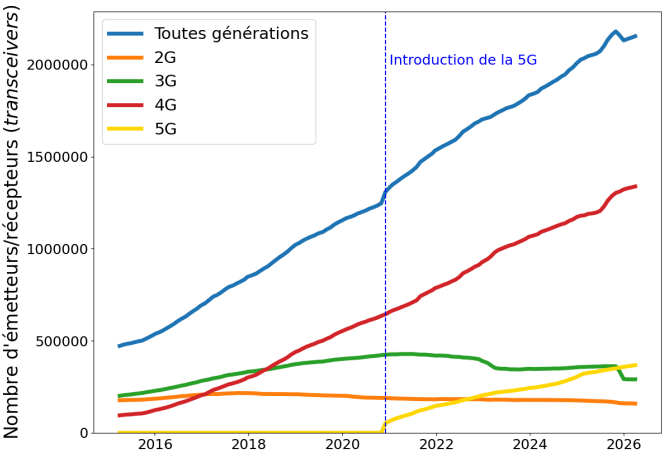


Fig. 7. Nombre d'émetteurs/récepteurs (*transceivers*) en service en France en fonction de la technologie selon l'ANFR.

En rapprochant les figures 5, 6 et 7, on peut remarquer qu'entre 2021 et 2022, soit au début de l'introduction de la 5G, la consommation énergétique des réseaux mobiles a augmenté de 13 %, le nombre de stations de base a

augmenté de 7% et le nombre d'émetteurs-récepteurs de 11%. Il semble ainsi que la consommation énergétique a cru plus fortement que le nombre de stations de base et que le nombre d'émetteurs-récepteurs.

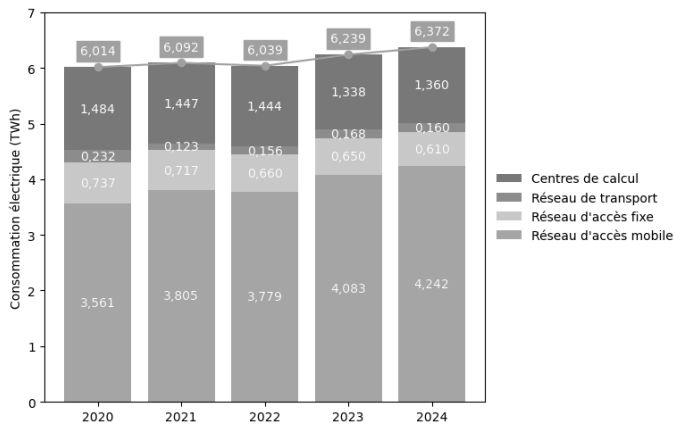


Fig. 8. Consommation énergétique de l'opérateur Vodafone à partir des données publiées dans l'addendum 2024 [110].

La figure 8 montre la consommation énergétique de l'opérateur Vodafone de 2020 à 2024 dans l'ensemble des 20 pays où il est implanté. On observe des proportions similaires à celles observées dans la figure 5 pour les opérateurs français. En effet, pour Vodafone en 2024, le réseau d'accès mobile représente 67 % de la consommation totale. Il est à noter que seules les proportions sont comparables d'une année sur l'autre sur cette figure car le périmètre n'est pas resté constant sur les 5 ans. En effet, Vodafone a évolué au travers d'acquisitions et de reventes de plusieurs opérateurs sur cette période.

Ces observations semblent conforter l'idée selon laquelle l'introduction d'une génération avec une meilleure efficacité énergétique ne conduit pas automatiquement à une réduction de la consommation énergétique totale des réseaux mobiles à moyen terme. D'une manière générale, les progrès en matière d'efficacité énergétique des réseaux mobiles ont permis au trafic mobile de croître plus rapidement que la consommation d'énergie des réseaux, cette dernière n'ayant toutefois cessé d'augmenter. Autrement dit, on assiste à un découplage relatif mais pas absolu entre trafic et consommation d'énergie.

ÉVOLUTIONS DU TRAFIC ET DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Certains travaux [32], [108], [109] montrent qu'il est préférable en termes de consommation énergétique d'empiler la 5G sur de la 4G existante plutôt que de développer l'infrastructure 4G pour répondre à une forte croissance du trafic (comme par exemple cette étude de l'ARCEP qui fait l'hypothèse d'un rythme annuel de croissance de 30 % par an entre 2021 et 2028 [32]). Il convient de nuancer ces conclusions dans la mesure où elles reposent sur l'hypothèse de l'indépendance entre la performance de l'infrastructure et le trafic, ce qui semble assez simpliste comme nous l'avons vu dans la deuxième partie de cette étude ([31] dans la section «*La 5G va-t-elle induire une augmentation du trafic ?*»).

En réalité, les études qui mettent en avant une forte croissance à venir du trafic s'appuient en général sur le scénario dans lequel la 5G est déployée [113]. Comme nous l'avons mentionné dans la deuxième partie de cette étude [31], l'observation des réseaux 5G déjà en place [70], [104], [105] semble indiquer que cette technologie *induit* une augmentation des volumes de données consommées par les utilisateurs et utilisatrices et qu'il n'y a pas report de trafic depuis les générations précédentes vers la 5G. D'une part, le développement de nouveaux usages, impossibles à réaliser en 4G, pourrait conduire à une forte augmentation du trafic (visionnage de vidéos très haute définition et même volumétriques, jeux en ligne, Internet des objets, véhicules autonomes, etc.). D'autre part, les performances de la 5G encouragent l'acheminement par les réseaux mobiles d'une partie du trafic Internet pour un usage fixe, soit parce que l'infrastructure filaire n'est pas disponible (par exemple en zone rurale isolée), soit en substitution à un abonnement fixe parfois plus coûteux. Ericsson prévoit ainsi une forte augmentation du trafic généré par le FWA (*Fixed wireless access*, c'est-à-dire l'accès fixe à Internet haut débit sans fil), qui pourrait représenter plus d'un tiers du trafic mobile d'ici 2030 ([41], p.9). Des données réelles de trafic mobile d'un opérateur français, observées entre mars 2023 et mai 2023, semblent confirmer que la 5G se substitue aux connexions filaires haut débit dans certaines zones [81].

Comme le notent L. Williams et ses coauteurs [113], la 5G est souvent présentée comme nécessaire pour rendre la croissance future du trafic environnementalement et économiquement soutenable, comme si cette croissance était indépendante de la 5G. Or, il existe une dynamique d'autorenforcement entre l'offre et la demande : la croissance du trafic pousse au développement de nouvelles infrastructures, mais ces dernières, en offrant de plus grandes capacités, suscitent de nouveaux usages ou intensifient les usages existants. Dans cette dynamique, les progrès en matière d'efficacité énergétique sont nécessaires pour que le réseau 5G soit économiquement viable (voir les parties précédentes de cette étude : [30] section «*Quelles sont les justifications techniques au développement de la 5G et de qui émanent-elles ?*» et [31]

section «*Quelles sont les justifications techniques au développement de la 5G et de qui émanent-elles ?*» et [31] section «*Qui va bénéficier du déploiement de la 5G ?*»), tandis que les progrès dans les autres domaines (débit, latence, etc.) rendent possible l'avènement de nouvelles applications à l'origine d'une augmentation du trafic. Ainsi, malgré sa plus grande efficacité énergétique, la 5G pourrait très bien être à l'origine d'une augmentation de la consommation électrique des réseaux mobiles par effet rebond.

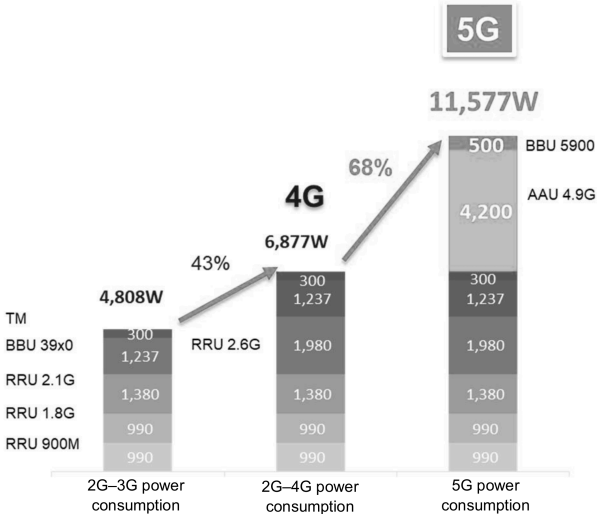


Fig. 9. Consommation énergétique maximale d’une station de base d’après Huawei. Figure extraite de [62].

À quel point doit-on s’inquiéter de cet effet rebond potentiel? En 2019, Huawei estimait que la consommation maximale d’une station de base 2G/3G en fonctionnement était de 4808 Watts, celle d’une station 2G/3G/4G de 6877 Watts et celle d’une station 2G/3G/4G/5G de 11577 Watts. Ainsi, même si l’efficacité énergétique d’une station 5G (calculée en considérant le débit maximal possible) est meilleure que celle d’une station 4G, chaque station 5G a le potentiel de consommer significativement plus qu’une station 4G comme illustré dans la figure 9 extraite de [62]. D’ailleurs, Huawei indique un coût financier considérable pour la mise à niveau des infrastructures existantes de chacune des 2,5 millions de stations de base en Chine afin de supporter la 5G [37]. En effet, une telle augmentation de la puissance brute par station nécessite une mise à niveau de la capacité du réseau électrique, de la capacité des batteries des stations de base (utilisées

en cas de coupure électrique) et du système de refroidissement des armoires. De plus, Huawei estime qu'en 2020, en Chine, la consommation électrique totale des réseaux de télécommunications dépasse 50 milliards de kWh, mais une fois les réseaux 5G déployés, elle pourrait dépasser 100 milliards de kWh, générant des émissions de carbone annuelles de 27,2 millions de tonnes [37].

La recommandation ITU (Union internationale des télécommunications) L.1210 de 2019 annonce des chiffres similaires : une puissance crête de 10kW pour un site 5G typique et jusqu'à 20kW pour un site 5G avec 10 bandes de fréquences [67]. Il est également précisé que ces chiffres pourraient être doublés dans le cas d'un site partagé entre plusieurs opérateurs mobiles. La 5G a donc le potentiel de faire exploser la consommation électrique des opérateurs et leurs émissions de gaz à effet de serre associées. Ainsi, améliorer l'efficacité énergétique par équipement n'offre aucune garantie contre ce scénario.

Quels sont les impacts environnementaux liés à la production des stations de base 5G ?

Outre l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement, les équipements réseau ont aussi des impacts environnementaux lors de leur production, sous la forme de pollution de l'eau, de l'air et du sol à cause de l'extraction de matériaux et des usines de fabrication. Les dizaines de métaux utilisés dans ces équipements ont différents niveaux de rareté géologique, de criticité ou d'importance stratégique. Dans ce qui suit, nous nous intéressons uniquement aux stations de base qui permettent aux terminaux de se connecter en mode sans fil et non aux infrastructures filaires auxquelles ces stations sont elle-même raccordées.

En 2023, une étude de l'ADEME a quantifié les impacts des réseaux fixes et mobiles par étape du cycle de vie [12]. La figure 10 est extraite de cette étude. L'étude, fondée sur l'analyse du cycle de vie (ISO 14040 et ISO 14044) et exploitant des données des fournisseurs d'accès à Internet français, porte sur six indicateurs environnementaux qui illustrent la diversité des effets environnementaux :

- ADPe : épuisement des ressources naturelles, minérales et métaux (exprimé en kg éq. Sb);
- AP : acidification (exprimée en mol éq. H+);
- GWP : changement climatique (exprimé en kg éq. CO₂);
- IR : radiations ionisantes (exprimée en kBq éq. U₂₃₅);
- PM : émissions de particules fines (exprimée en occurrences de maladies);
- TPE : consommation d'énergie primaire (exprimée en MJ).

Réseau mobile - Méthode des flux

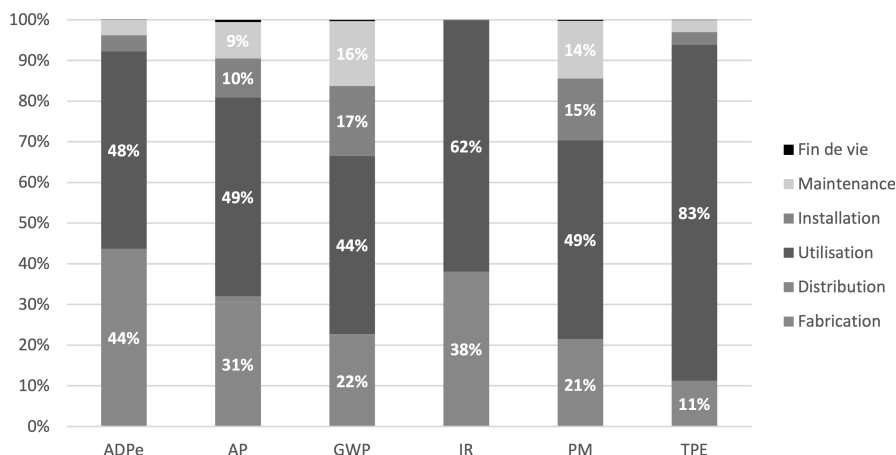


Fig. 10. Répartition des impacts du réseau mobile par étape du cycle de vie, avec la méthode des flux. Figure extraite de [12].

La figure 10 montre que, pour les réseaux mobiles, la phase d'utilisation est prépondérante (44 % à 83 % suivant les indicateurs), contrairement aux réseaux fixes pour lesquels c'est la phase de fabrication. Cette étude suppose que la durée de vie des équipements réseau est de 7 ans pour l'ensemble des réseaux mobiles (incluant les réseaux d'accès, d'agrégation et le backbone). Le principal contributeur aux impacts environnementaux est le réseau d'accès radio (87 % à 94 %), très loin devant les réseaux de transport et de cœur (pour les réseaux mobiles). Concernant les équipements, les amplificateurs sont les premiers contributeurs (39 % à 53 %), devant les antennes actives, les unités de bande de base (BBU), les routeurs de collecte et les antennes passives multibandes [12].

Plusieurs autres études [28], [53], [58], [78], [112] rapportent que les impacts environnementaux de la production sont soumis à d'importantes incertitudes mais sont loin d'être négligeables. Elles considèrent des durées de vie de 5 à 20 ans pour les équipements du réseau mobile et 20 % à 40 % des émissions au cours du cycle de vie de ces équipements au niveau mondial sont dues à leur phase de fabrication. Ces chiffres cachent de grandes disparités entre les pays, notamment à cause des différents mix énergétiques (par exemple, [78] mentionne une part à 20 % au niveau mondial, mais à 70 % en Suède où la production d'électricité est peu carbonée).

Lorsque l'on s'intéresse à l'effet de la 5G sur ces impacts environnementaux de production, des incertitudes s'ajoutent, liées à l'ampleur et à la

nature du déploiement de la 5G (optimisations implémentées, par exemple *sleep modes*). Cependant, deux phénomènes importants nous permettent d'affirmer que les impacts environnementaux liés à la fabrication des équipements réseaux vont augmenter. D'une part, la première partie de notre étude [30], ainsi que les études susmentionnées, montrent que le nombre de stations de base sera en augmentation sur les zones couvertes. C'est aussi ce que dit une étude de 2022 [54], qui considère en outre que les infrastructures 5G vont s'ajouter aux infrastructures 4G, pendant un temps indéterminé. D'autre part, la littérature récente [58], [117] indique que les performances accrues des équipements 5G se feront en partie grâce à l'usage de quantité de matériaux supplémentaires (l'article mentionne l'aluminium, le cuivre, le gallium, le germanium, l'or, l'yttrium et le baryum) et qu'il est impossible de simplement mettre à jour certains composants d'une station 4G et qu'il faut donc les remplacer complètement. Cela est dû à deux facteurs : davantage d'antennes par station de base (*massive MIMO*) et les bandes de fréquence millimétriques.

Les études susmentionnées rapportent que les impacts environnementaux de la production des équipements sont dominés par la phase d'extraction des matériaux (en comparaison des phases d'assemblage, transport ou recyclage). Ceci est cohérent avec ce que dit la littérature scientifique sur la fabrication des équipements numériques en général. En effet, l'extraction minière, présente en amont de très nombreuses chaînes de valeur, est une des industries les plus polluantes. Elle constitue d'ailleurs la première source de conflits environnementaux dans le monde [101] et a de nombreux impacts sur la biodiversité [16]. Les quantités de métaux utilisées par le numérique peuvent paraître faibles au regard d'autres usages, mais il convient de rappeler que les pollutions liées à l'industrie minière dépendent non seulement des quantités de métaux extraites, mais aussi de la nature des minerais et de leur concentration en éléments métalliques. Estimer la part que représente le numérique dans les impacts de l'extraction minière pose aussi des questions d'attribution dans la mesure où les métaux concernés sont le plus souvent des coproduits [85]. En 2018, une étude estimait que les principales sources de toxicité potentielle liées aux matières premières nécessaires aux appareils et infrastructures numériques étaient le cuivre et l'or [76]. Concernant les équipements 5G, la tendance est à la hausse (davantage d'antennes, davantage de stations de base). De plus, dans la quantité de cuivre consommée directement par la production des infrastructures, il faudrait également inclure une fraction du cuivre utilisé pour produire et transporter l'électricité, activités à l'origine de près de la moitié de la demande mondiale en cuivre [43]. Pour le cas particulier de la 5G, ce dernier point paraît non négligeable si le nombre de stations de base à relier au réseau électrique augmente.

Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur les terminaux ?

TERMINAUX 5G

Les terminaux des utilisateurs et utilisatrices permettent d'illustrer, de nouveau, le problème à considérer l'efficacité maximale plutôt que l'efficacité pour un usage réel. En effet, des mesures sur les premiers appareils 5G [114] indiquent que l'efficacité énergétique est quatre fois meilleure par rapport à un appareil 4G quand le débit est au maximum des capacités du module radio, mais que les terminaux 5G consomment davantage que les terminaux 4G car le module radio 5G consomme au moins deux fois plus en débit moyen. Cela est dû au fait que l'électronique embarquée pour supporter certaines optimisations de la 5G (e.g. convertisseurs large bande et MIMO) est plus consommatrice. Cette tendance est confirmée par des mesures de Qualcomm [71] sur deux smartphones identiques avec la même capacité de batterie, mais l'un avec un module 4G et l'autre avec un module 5G. L'expérience réalisée est la suivante : télécharger au maximum de la bande passante possible jusqu'à épuisement de la batterie. Pour le smartphone 4G, une charge complète de batterie permet ainsi de télécharger 91,9 Go de données, tandis que le smartphone 5G peut lui télécharger 276 Go de données. Le smartphone 5G est donc jugé plus efficace : il est 3 fois meilleur en bit/Ah. Cependant, on peut faire une autre expérience avec les mêmes smartphones, mais avec cette fois, une charge de travail différente qui est plus représentative et inclut un usage typique journalier (transfert de données à des vitesses variables à différents moments de la journée, utilisation d'autres applications nécessitant l'allumage de l'écran, temps de veille, etc.). Dans ce cas d'une utilisation moyenne typique, une charge de batterie complète permet au smartphone 4G d'être actif pendant 31 h 30 environ, tandis que le smartphone 5G atteint à peine 14 h (soit moins d'une journée complète) [91]. Ainsi, le smartphone 5G, bien que plus efficace pour une utilisation maximale, consomme en pratique plus pour une utilisation moyenne.

D'autres études académiques confirment que le module 5G des smartphones est gourmand en énergie et qu'il devient le principal élément consommateur devant l'écran, bien que l'efficacité (en bit/J) soit 4 fois plus grande avec un module 5G par rapport à un smartphone avec un module 4G [114]. Les auteurs essaient une optimisation simple : désactiver le module 5G lorsqu'il est inutile. Cela permet de bénéficier des avantages du module 5G pour les gros débits : la consommation du téléphone est réduite de 60 % lors d'un transfert de fichier (-40 % en visionnage vidéo) et de l'avantage du module 4G pour les faibles débits : la consommation est celle de l'appareil 4G en cas de simple navigation web. Ainsi, pour des applications gourmandes en données, l'efficacité est meilleure avec la 5G, mais pas pour les autres applications.

Une autre étude plus récente, publiée en 2022, se penche sur la consommation énergétique de 22 millions de smartphones en conditions réelles, représentant 29 modèles différents de 4 constructeurs (Huawei, Vivo, Oppo et Apple), lors de leur utilisation d'une application de streaming vidéo [115]. Les auteurs observent la charge de la batterie des téléphones lors du visionnage ou de la diffusion de vidéos en fonction de la technologie utilisée : 4G, Wifi, 5G (*standalone* et *non-standalone*, sur des bandes à 2,6 GHz et 3,5 GHz). Ils remarquent que pour 7 des 29 modèles, la consommation est un peu moindre en moyenne avec la 5G qu'avec la 4G (jusqu'à 5 % de consommation énergétique en moins), alors que pour les 22 modèles sur 29 restants, la consommation est supérieure en 5G (jusqu'à 18 % plus élevée). La consommation en Wi-Fi est quant à elle dans tous les cas la plus basse (en moyenne 20 % de consommation en moins par rapport à la 4G sur l'ensemble des modèles). Cette étude est réalisée en conditions réelles, ainsi les débits de communication et les résolutions des vidéos varient en fonction des conditions d'accès des smartphones, les données présentées étant des moyennes sur les données collectées. Ceci tend à montrer que la consommation énergétique des terminaux 5G dépend surtout de l'utilisation qui en est faite, des applications utilisées et des débits employés.

Les appareils connectés, aussi nommés « Internet des objets », font partie des objectifs de déploiement de la 5G (voir la deuxième partie de cette étude [31], section « À quelles applications va servir la 5G ? »). Ces objets connectés sont très divers et ont donc des consommations énergétiques très variées. Les véhicules autonomes sont parmi les plus gourmands et la 5G pourrait permettre leur développement. Une étude récente sur une voiture électrique citadine équipée de capteurs et calculateurs pour la conduite autonome indique que ces éléments informatiques représentent 12 % de la consommation de la voiture [23]. Certains acteurs prédisent une explosion du nombre d'objets connectés : ils seraient environ 25 millions à 175 millions d'ici 2027 selon les prévisions [90]. Dans le cas où les prévisions hautes seraient atteintes, avec le déploiement massif d'objets connectés complexes (drones, assistants à commande vocale, montres connectées, etc.), les émissions de gaz à effet de serre pour l'IoT pourraient atteindre les 1 GtCO₂eq par an en 2027, c'est à dire à 1,6 % des émissions mondiales annuelles tous secteurs confondus [90].

TERMINAUX 2G, 3G ET 4G

L'apparition du réseau 5G risque de provoquer un effet d'obsolescence avec des smartphones qui seront potentiellement remplacés plus tôt qu'ils ne l'auraient été sans la 5G. Il est cependant difficile de quantifier cet effet d'obsolescence, tout comme il est difficile de prévoir une éventuelle modification du taux de pénétration du smartphone qui se situait en 2022 en France à environ 83 % avec une légère augmentation annuelle [102].

L'effet d'obsolescence est toutefois bien réel à partir de fin 2025 avec l'extinction progressive des réseaux 2G, puis à partir de fin 2028 avec celle des réseaux 3G [10]. Cette obsolescence ne concernera pas uniquement les smartphones de ces deux générations, mais également tous les terminaux (ascenseurs, interphones, systèmes de téléassistance, etc.).

Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur le reste de l'infrastructure numérique ?

Nous avons déjà évoqué l'augmentation de trafic liée aux nouvelles applications permises par la 5G dans la section « *Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur la consommation électrique des réseaux mobiles ?* », ainsi que dans la deuxième partie de cette étude [31]. Ces données supplémentaires vont générer une pression accrue sur l'ensemble de l'infrastructure numérique, notamment sur le réseau Internet filaire et sur les serveurs de stockage et de traitement hébergés dans les centres de données, encourageant ainsi à déployer de nouveaux équipements pour augmenter la capacité globale des infrastructures. Il est difficile de quantifier les effets de la 5G pour les années futures sur le reste de l'infrastructure numérique, notamment parce que, comme on l'a vu dans les sections précédentes, de nombreuses augmentations sont déjà en cours : augmentation du nombre de stations de base, augmentation du nombre de terminaux, augmentation du volume de données par terminal, etc.

De nombreux usages reposent sur le traitement lointain de données locales, par exemple pour le traitement de flux vidéos provenant de caméras de surveillance [74]. De telles caméras peuvent par exemple être utilisées pour détecter automatiquement la présence de piétons sur des autoroutes et prévenir des accidents. Dans ce cas, la consommation électrique — liée à l'acheminement des données (via des réseaux de communication) et à leur traitement dans des centres de calcul — peut être 2 à 3 fois plus importante que l'objet connecté en lui-même, c'est-à-dire la caméra [74]. Pour certaines applications, comme la réalité virtuelle en temps-réel par exemple [114], où la latence et le temps de calcul sont des paramètres cruciaux, le déploiement d'infrastructures de *edge computing* est primordial. Il s'agit d'infrastructures de calcul et de stockage distribuées en bordure des réseaux de communication (i.e. au plus près des stations de base de téléphonie mobile). Ce type d'infrastructure est fortement distribué par nature et constitué d'une multitude de petits centres de données dont les capacités de calcul varient fortement d'un centre à l'autre. D'un point de vue énergétique, une telle architecture complètement distribuée peut avoir une consommation énergétique meilleure qu'un centre de calcul centralisé si elle le remplace complètement grâce à une utilisation plus faible des réseaux de communication de cœur de l'Internet notamment [5]. Cependant, cela suppose que la dissipation de chaleur dans ces

petits centres de calculs soit autant optimisée que dans les grands centres de calculs, ce qui est rarement le cas en pratique à l'heure actuelle [74]. En effet, les grands centres de calculs (plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de serveurs) s'appuient souvent sur des mécanismes de refroidissement par eau qui sont très efficaces, mais nécessitent une infrastructure complexe et volumineuse qui n'est pas adaptée à de petits centres de données. Ainsi, les centres de données continuent à faire des progrès en terme d'efficacité énergétique. Cependant, ces améliorations sont compensées par l'augmentation effrénée des nouvelles données à traiter comme évoqué précédemment. Concernant le *edge computing* et sa consommation énergétique, les arguments favorables concernent souvent l'utilisation de sources d'énergie renouvelable, l'optimisation du transport des données, tandis que les arguments défavorables concernent la multiplication des infrastructures avec une augmentation des ressources de calcul du fait du morcellement des ressources (et donc augmentation de l'impact lié à leur fabrication) et les frais de déploiement associés (infrastructure électrique, réseau haut débit, refroidissement, etc.) [59].

La 5G permet-elle une baisse des émissions de GES dans des secteurs autres que le numérique ? À quel point ?

Certaines études indiquent que la 5G permettrait de transformer profondément les autres secteurs (transports, agriculture, industrie, etc.), avec potentiellement des bénéfices environnementaux à la clé [18]. La littérature scientifique qualifie ces effets d'*indirects* ou *second* et *troisième ordre* [61], [113]. Ils sont induits par les applications et les services qui seront rendus possibles grâce à la 5G. La figure 11 donne une classification des effets directs et indirects des technologies de l'information et de la communication. Les effets indirects correspondent à des transformations de la société à des échelles plus ou moins larges et peuvent être bénéfiques comme néfastes d'un point de vue environnemental. Par exemple, le véhicule autonome est souvent présenté comme ayant le potentiel de réduire les impacts environnementaux des transports [103] (en favorisant le partage de véhicule, en permettant le *platooning* c'est-à-dire le groupement en flottes de véhicules, etc.). Toutefois en fonction des comportements utilisateurs, il peut aussi encourager l'autosolisme (se déplacer seul avec un véhicule) au détriment d'autres modes de transport plus écologiques [34].

À notre connaissance, une seule publication académique fournit une estimation des effets indirects de la 5G sur les émissions [116], les autres estimations disponibles étant issues de rapports de cabinets de conseils ou d'experts pour le compte d'industriels des télécom, d'associations représentant leurs intérêts [1], [18], [25], [48], [86], ou de l'Union Européenne [42].

LA 5G, LA VILLE INTELLIGENTE ET LA SOUTENABILITÉ ÉCOLOGIQUE

Nous avons évoqué dans la deuxième partie de cette étude [31] le concept de « ville intelligente » (*smart city*). Ce concept est fréquemment associé à une notion de *développement durable* du territoire considéré, associant des considérations sociales, économiques et environnementales. Cependant, dans la littérature, la définition de développement durable est plurielle et l'importance donnée aux considérations sociales, économiques et environnementales dépend de la notion de soutenabilité retenue [107].

Des articles montrent comment certaines techniques au cœur du concept de ville intelligente *pourraient* être bénéfiques d'un point de vue écologique, parmi elles les véhicules intelligents [52] ou les bâtiments intelligents [63] connectés par la 5G. Mais la littérature pointe aussi les limites du concept. Ainsi, dans une revue de littérature [80], les auteurs montrent un certain antagonisme dans les principes qui sous-tendent *ville intelligente* et soutenabilité. Ils rapportent que :

- la croissance économique, un des objectifs central des *villes intelligentes*, ne semble pas écologiquement durable ;
- la numérisation d'un territoire risque d'accroître les inégalités sociales au sein de ce territoire ;
- les innovations numériques risquent d'instrumentaliser les habitants plutôt que de les encapaciter (leur donner la capacité et les moyens nécessaires pour agir) ;
- les mécanismes par lesquels la numérisation d'un territoire permettrait de diminuer la pression environnementale ne sont pas définis ;
- la numérisation a tendance à développer un certain consumérisme.

On peut citer aussi l'article [66] qui montre que les solutions numériques ont rendu Copenhague plus énergivore (mais indique qu'un choix avisé dans les solutions numériques pourrait peut-être avoir un effet bénéfique), ou encore l'article [6] qui révèle que de nombreux travaux ne considèrent pas ou pas assez l'aspect énergétique des solutions numériques mises en place dans une *smart city*. Enfin, l'article [36] conclut d'une revue de littérature que les considérations écologiques ne sont pas centrales dans le concept de ville intelligente. Par conséquent, « intelligent » n'est pas forcément synonyme de « durable ».

Taxonomy described in this paper			Alternate taxonomies			
Effect	Scope	GPS System Example	Hilty	Berkhout & Hertin	Williams	Rattle
Embodied energy	Direct	Energy to produce a GPS system	1 st -order	Direct effects	ICT infrastructure and devices	
Operational energy		Energy to operate a GPS system				
Disposal energy		Energy to dispose of a GPS system at end-of-life				
Efficiency	Indirect: Single-service	More efficient traffic flow due to GPS-enhanced routing	2 nd -order	Indirect effects	Applications	Optimization
Substitution		Replacement of paper-based maps				Substitution
Direct rebound		More travel due to lower cost of traffic congestion	3 rd -order	Structural & behavioral effects	Effects on economic growth and consumption patterns	Induction
Indirect rebound	Indirect: Complementary services	Energy consumed during time saved by more efficient travel				Supplementation
Economy-wide rebound (Structural change)	Indirect: Economy-wide	GPS enables autonomous vehicles and causes growth of intelligent transportation system manufacturing				Creation
Systemic Transformation	Indirect: Society-wide	Autonomous vehicles alter patterns in where people choose to live and work			Systemic effects on technology convergence & society	

^a Alternate taxonomies are from Hilty *et al* (2006), Berkhout and Hertin (2004), Williams (2011), and Rattle (2010).

Fig. 11. Effets directs et indirects des TIC. Figure extraite de [61].

Toutes ces études reprennent la méthode de calcul de la *Global enabling sustainability initiative*, la GeSI, un consortium d’industriels du numérique [49], [50], [51]. C’est aussi sur cette méthode que s’est appuyée la *Global System for Mobile Communications Association* (la GSMA, une association d’entreprises de la téléphonie mobile) pour évaluer les effets indirects des réseaux mobiles [57]. D’ailleurs, près de la moitié des études précitées [1], [25], [116] se basent directement sur les valeurs produites par la GSMA en 2019 (donc pour les générations antérieures à la 5G), dont il a été montré que leur fiabilité était très incertaine [96], [97].

La méthode de la GeSI consiste à quantifier les émissions évitées pour des cas d’application spécifiques (relevant généralement de la dématérialisation ou de l’amélioration d’efficacité et souvent qualifiés de *smart*), c’est-à-dire à estimer un facteur d’émissions évitées pour chaque cas d’application et à extrapoler ces valeurs à l’échelle d’un pays ou au niveau mondial en multipliant simplement

ces facteurs par des quantités caractérisant le niveau d'utilisation de la solution. Pour illustrer cette méthode, considérons l'exemple des plateformes de partage de logements telles que AirBnB. Le rapport de la GSMA calcule les émissions évitées simplement en multipliant le nombre d'utilisateurs de smartphone par le facteur d'émissions évitées (les émissions évitées en moyenne par utilisateur pour ce cas d'étude). Ce facteur est lui-même estimé en multipliant la proportion d'utilisateurs de smartphones ayant recours aux plateformes à la place de l'hôtellerie classique, issue d'une enquête auprès de 6000 personnes, une estimation grossière du nombre de nuits séjournées annuellement dans ces logements partagés pour un client moyen, les émissions moyennes d'une nuit en hôtellerie classique et enfin, la proportion de ces émissions qui est évitée d'après AirBnB sur la base d'une enquête auprès de 8000 de ses clients et qui n'est plus accessible à ce jour. Cet exemple illustre bien la fragilité de la méthode de la GeSI, qui reporte la difficulté sur le calcul des facteurs d'émissions évitées. D'une part, les données ayant servi à estimer le facteur d'émissions évitées correspondent à des contextes et des hypothèses bien spécifiques (par exemple, elles ne concernent que quelques pays et ne devraient pas être extrapolées à l'échelle mondiale comme le fait la GSMA dans son rapport). D'autre part, le résultat final dépend entièrement d'une valeur produite par AirBnB qu'il nous est impossible de vérifier.

Dans ce qui suit, nous présentons d'autres biais méthodologiques qu'ont en commun les études discutées ici et qui donnent ainsi à voir, en conséquence, une image exagérément optimiste des effets de la 5G sur les émissions de GES des autres secteurs. Ces problèmes ont été relevés à plusieurs reprises dans la littérature scientifique [17], [19], [33], [39], [45], [55], [75], [77], [93], [97].

SEULS LES CAS D'APPLICATION FAVORABLES SONT RETENUS

Les études se concentrent, explicitement ou implicitement, seulement sur des cas d'application susceptibles d'engendrer des réductions importantes d'émissions (télétravail, *smart grids*, bâtiments intelligents, etc.). Pourtant, en tant que technologies généralistes, le numérique et plus spécifiquement la 5G ont des applications dans pratiquement tous les domaines et peuvent conduire ainsi à des augmentations d'émissions [22], [45]. Par exemple, les écrans publicitaires numériques remplacent, voire s'ajoutent, aux écrans classiques. L'Agence internationale de l'énergie indique que la numérisation permettrait d'abaisser les coûts d'exploitation et d'accroître les taux de récupération des hydrocarbures, notamment du pétrole et du gaz naturel non conventionnels [64]. Le numérique développe de nouvelles opportunités de consommation, en facilitant l'achat ou permettant de mieux cibler les préférences des consommateurs [35], [55]. Ces exemples ne sont pas des cas d'application spécifiques de la 5G, mais ils pourraient être facilités par cette

nouvelle technologie. C'est aussi vrai de l'essentiel des cas favorables retenus par les études. Cet effet de facilitation est rediscuté plus loin.

ABSENCE DE VISION SYSTÉMIQUE

Les études se limitent généralement à des effets de substitution et d'optimisation bénéfiques pour l'environnement. Pour l'illustrer, nous considérons dans ce qui suit l'exemple du transport, secteur dont les études attendent d'importants bénéfices. S'il est vrai que les moyens de communication (téléphonie, visioconférence, commerce en ligne, télétravail, etc.) permettent de remplacer certains déplacements, ils sont tout autant susceptibles de générer des trajets supplémentaires (en permettant de maintenir des relations distantes [3], en incitant et en facilitant le tourisme international [82], etc.). D'ailleurs, dans de nombreuses études, les télécommunications et les transports sont vus comme *complémentaires* plutôt que *substituables* [82]. Ainsi, la saturation, voire le recul, observé dans certains pays développés, de l'usage de la voiture (qui a conduit à formuler l'hypothèse d'un pic automobile [44]), ne s'expliquerait pas par le développement des technologies numériques, mais par les facteurs socio-économiques habituels (temps de transport, revenus, coûts, etc.) [20], [79]. De plus, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de saturation des distances parcourues par personne si on considère l'ensemble des modes de transport. Celles-ci sont en effet toujours en forte croissance, notamment à cause du développement du trafic aérien international [14], [20], [40], [111].

En plus d'agir directement sur la demande de transport, les télécommunications permettent aussi d'améliorer les systèmes qui y répondent (calcul du meilleur itinéraire en fonction des conditions réelles de circulation, gestion intelligente des feux de circulation, groupement en flottes de véhicules [103], etc.). Ces effets d'optimisation permettent potentiellement de réduire la congestion et/ou les émissions de GES, mais aussi d'augmenter globalement le trafic routier en exploitant au mieux les infrastructures existantes. C'est ce que relève, dès les années 80, la littérature sur les liens télécommunications-transport qui considère en général l'optimisation comme un cas particulier de complémentarité [98]. Autrement dit, optimiser les systèmes de transport conduirait inévitablement à accroître la demande en transport, par effet rebond systématique, comme cela semble être le cas à chaque fois qu'on augmente la capacité routière [38]. Il est donc possible que le développement d'Internet et plus particulièrement de la 5G, ait pour effet d'augmenter les émissions du transport plutôt que de les réduire.

Au niveau macroéconomique, l'agrégation de l'ensemble de ces effets rebond dans les différents secteurs se traduit par une augmentation de l'activité économique, notamment du fait des gains de productivité, qui s'accompagne d'émissions supplémentaires. De ce point de vue, les études sur les effets indirects de la 5G manquent de cohérence : d'un côté, elles n'intègrent pas les

effets rebond lorsqu'il s'agit d'estimer les émissions de gaz à effet de serre (seule l'étude [18] tente de les intégrer); de l'autre, ces effets rebond sont pris en compte au niveau macroéconomique lorsqu'il s'agit de mettre en avant (voire de quantifier pour certaines études) les effets de la 5G sur la croissance économique. Il s'agit donc davantage de proposer une vision avantageuse, dans laquelle seuls les effets favorables sont retenus, plutôt que de développer une compréhension complète et systémique des effets potentiels de la 5G.

INCERTITUDES SUR L'EFFET DE FACILITATION

La 5G ne semble indispensable à aucun des cas d'application présentés dans les différentes études : le télétravail est possible avec le réseau fixe ou le réseau 4G, il existe d'autres types de réseaux pour l'industrie, la 5G n'est pas indispensable au véhicule autonome, etc. Les études indiquent que la 5G devrait faciliter leur développement, mais puisqu'il est extrêmement difficile de déterminer à quel point, elles se contentent d'émettre des hypothèses sur l'augmentation de l'usage des cas d'applications cibles, au mieux en considérant plusieurs scénarios [18], ou plus simplement en appliquant un facteur multiplicatif sur l'effet de facilitation proposé par la GSMA pour les autres générations de réseaux mobiles [1], [25], [116]. Les sources d'incertitude proviennent donc non seulement des cas d'application et des effets non pris en compte par les études, mais aussi de l'évaluation de cet effet de facilitation.

SYNTHÈSE

Les études existantes sur les effets indirects de la 5G se concentrent, presque exclusivement, sur ses potentiels effets bénéfiques sur les émissions des autres secteurs, omettant notamment les cas d'application défavorables et les effets rebond. De plus, compte tenu des fortes incertitudes qui concernent, en particulier, les facteurs d'émissions évitées et l'effet de facilitation, aucune étude n'est en mesure de démontrer que la 5G aura comme effet net de réduire les émissions globales. Comme nous l'avons illustré avec l'exemple du transport, on peut même légitimement penser le contraire, c'est-à-dire qu'en améliorant la productivité dans la plupart des secteurs économiques, en accélérant l'ensemble des flux matériels et en offrant de nouvelles opportunités de consommation et de production, le déploiement de la 5G conduira à une augmentation des émissions.

Quel futur pour les réseaux mobiles face aux enjeux écologiques ?

Nous avons vu que les impacts environnementaux de la 5G sont potentiellement nombreux et significatifs, ce qui soulève naturellement plusieurs

questions : Le déploiement de la 5G est-il compatible avec les enjeux environnementaux auxquels nous faisons face ? Et plus généralement, quelle place pour le numérique face à ces enjeux ?

Rappelons tout d'abord qu'indépendamment du numérique et des réseaux mobiles en particulier, il n'existe à ce jour pas de proposition consensuelle sur l'ensemble des mesures que nos sociétés devraient prendre face aux enjeux écologiques (même la sortie des énergies fossiles est sujet à débat dans la société). La soutenabilité est de fait un concept à dimension normative : il fait intervenir, en plus des connaissances scientifiques notamment dans le domaine de l'écologie, nos valeurs et ce que nous jugeons souhaitable pour les générations actuelles et futures. Ainsi, plusieurs visions de la soutenabilité s'opposent : la soutenabilité faible, par exemple, fait l'hypothèse que le capital artificiel peut se substituer au capital naturel, autrement dit qu'on peut légitimement comparer la valeur apportée par l'installation d'une station 5G avec celle des perturbations environnementales qu'elle est susceptible d'engendrer, alors que la soutenabilité forte soutient au contraire que ces deux formes de capital ne sont pas substituables mais complémentaires et donc non comparables [60].

La notion de développement durable portée par l'ONU et présente dans le droit de l'environnement français vise un équilibre entre des objectifs économiques, sociaux et environnementaux. Les limites planétaires, la théorie du Donut qui s'appuie sur ces dernières, ou encore les objectifs climatiques tels que la limitation du réchauffement climatique à +2°C, articulent eux aussi résultats scientifiques et dimension normative et donc politique [15], [94]. Ces différents concepts ont en commun d'avoir une portée globale sur les enjeux environnementaux, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les appliquer directement à un produit ou à une technologie, comme le rappelaient L. Hilty et B. Aebischer en 2015 au sujet des technologies numériques dans un ouvrage fondateur de la communauté de recherche *ICT for sustainability (ICT4S)* [60].

Pour savoir si une technologie particulière de réseau mobile est compatible avec les enjeux environnementaux, il faut donc non seulement spécifier la vision de la soutenabilité par rapport à laquelle on l'évalue, mais aussi dans quelle organisation économique et sociale elle s'inscrit. En effet, d'une part les impacts environnementaux des réseaux mobiles, qu'ils soient directs ou indirects, dépendent de l'ensemble du système sociotechnique puisqu'ils résultent des interactions complexes entre les processus socio-économiques. D'autre part, le respect d'objectifs environnementaux globaux, tels que les cibles climatiques, suppose de faire des arbitrages parmi les activités. Par exemple, faut-il allouer un budget carbone plus important à la mobilité ou aux services numériques ? Nos moyens d'action étant limités, des arbitrages devront potentiellement être faits entre des mesures d'atténuation (réduction

des émissions de gaz à effet de serre) et d'adaptation (limitation des conséquences du changement climatique sur les sociétés).

Pour aider à éclairer ces enjeux, différents travaux de scénarisation prospective donnent des pistes intéressantes à propos de trajectoires possibles pour le numérique et les réseaux mobiles face aux enjeux environnementaux. Le premier d'entre eux est celui de l'ARCEP et de l'ADEME [88] qui se base sur une méthodologie d'analyse de cycle de vie et qui présente cinq scénarios pour l'avenir du numérique en France :

- *tendanciel* — ce scénario prolonge les tendances actuelles, notamment en termes de volume de trafic et nombres d'équipements, sans remise en cause des modes de production et de consommation des services numériques ;
- *pari réparateur* — la transition est guidée par l'idée que la société va réussir à gérer et réparer les impacts environnementaux. Nos modes de vie ne changent pas. La numérisation est la norme dans tous les secteurs de l'économie. Le nombre d'équipements et de terminaux explose. Les réseaux mobiles connaissent des déploiements importants et la 6G est déployée ;
- *technologies vertes* — la transition est guidée par la technologie et les gains d'efficacité énergétique. Le numérique est présent dans tous les secteurs de la société. Le nombre de terminaux continue d'augmenter mais à un rythme plus lent. Le déploiement des réseaux mobiles se concentre sur la 5G ;
- *coopérations territoriales* — il s'agit d'un scénario intermédiaire guidé par la sobriété. Il y a une croissance modérée des services numériques et des terminaux. La durée de vie des terminaux augmente d'une année en moyenne. Le nombre de stations de base reste stable par rapport à 2020 ;
- *génération frugale* — la transition est guidée par une frugalité contrainte (réglementaire) et une sobriété volontaire. La production est fondée sur le *low-tech*, c'est-à-dire que les technologies sont simplifiées, robustes et peuvent être contrôlées par les citoyens et citoyennes. L'écoconception des logiciels et des matériels est généralisée. La durée de vie des terminaux s'en trouve augmentée de deux ans. Le nombre de terminaux est stable.

Les opérateurs partagent leurs infrastructures.

L'étude a évalué l'empreinte carbone du numérique à l'horizon 2050 pour les cinq scénarios prospectifs et l'a comparée à l'empreinte en 2020 (voir figure 12). Parmi les scénarios étudiés, seul le scénario « génération frugale » permet de diminuer l'empreinte du numérique. Ces chiffres sont bien sûr à prendre avec précaution car ils dépendent des hypothèses formulées et de l'imprécision des données utilisées, ils ne prennent pas non plus en compte les effets indirects. Ils ne considèrent que les infrastructures en France et négligent les infrastructures situées à l'étranger mais à usage en France (les centres de données notamment).

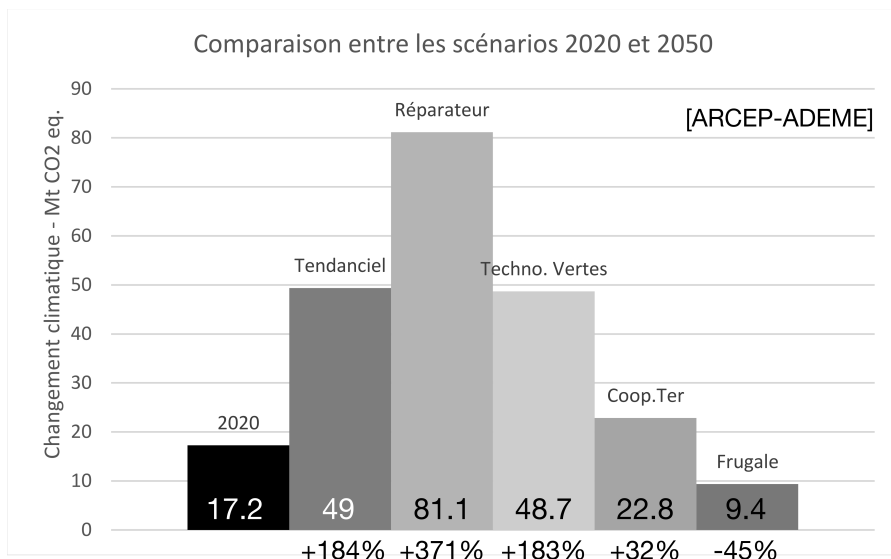


Fig. 12. Empreinte carbone du numérique en France en 2020 et en 2050 selon l'ARCEP et l'ADEME. Figure extraite de [88].

Bien que l'étude concerne l'ensemble du numérique, les réseaux mobiles et la 5G jouent un rôle central pour la définition des scénarios prospectifs. Le développement accéléré de nouvelles technologies (scénarios «tendanciel», «technologies vertes» et «pari réparateur») est présenté comme un facteur d'augmentation du trafic. L'augmentation des débits et de la qualité d'expérience accroît en effet la demande et diminue le coût par Mo transmis. Une part croissante du trafic Internet est appelée à transiter via les smartphones. Dans le scénario «tendanciel», la consommation énergétique des réseaux mobiles est multipliée par 2,4 entre 2020 et 2050.

Le scénario «génération frugale» dessine ce que pourrait être un usage sobre du numérique et des réseaux. Il suppose un changement assez radical de notre façon de produire et d'utiliser les services et matériels numériques. On y trouve par exemple un essor du *low-tech*, c'est-à-dire de technologies plus simples, plus robustes et qui puissent être contrôlées par les citoyens et citoyennes. L'écoconception est généralisée de façon à allonger la durée de vie des équipements, à pouvoir facilement les reconditionner et à assurer une grande réparabilité. L'obsolescence logicielle est fortement réduite grâce à une optimisation des systèmes d'exploitation et des mises à jour assurées sur le long terme. Les administrations et les entreprises freinent leurs usages connectés en interrogeant l'utilité des données. Les services et matériels

numériques sont mutualisés. Les citoyens et citoyennes ont par exemple pris conscience de la nécessité de faire converger les équipements vers le smartphone ou l'ordinateur portable. Le taux d'équipement des téléphones est de 1 par habitant. Les principaux flux de données passent par la fibre. Tout le monde a accès au minimum de services numériques pour des besoins fondamentaux liés par exemple à la santé ou à l'éducation et de façon plus générale, les services jugés utiles pour la société sont priorités. Ces mesures doivent ainsi permettre de stabiliser le nombre d'objets connectés (à part pour la santé), de diminuer la consommation énergétique des équipements (divisée par 3) et d'allonger leur durée de vie (de 2 ans). Pour les réseaux mobiles, le partage d'infrastructure et les accords d'itinérance sont favorisés. La société s'habitue à préférer le Wifi et à limiter les usages en mobilité.

Dans le scénario «coopérations territoriales», l'optimisation logicielle permet d'accéder à des services même à débit faible ou modéré. L'acquisition de nouveau matériel est toujours interrogée vis-à-vis des besoins, de la possibilité de maintenir l'existant ou de solutions alternatives non-numériques. L'IoT est principalement utilisé pour des gains énergétiques, par exemple dans le bâtiment.

Une deuxième étude prospective est celle issue du groupe de réflexion «*The shift project*» qui a également proposé une étude prospective à l'horizon 2035, spécifique aux réseaux mobiles [24]. Elle insiste d'abord sur l'importance de l'accroissement du trafic et montre par exemple comment l'hypothèse d'un déploiement à grande échelle du métavers pourrait entraîner une multiplication par quatre des émissions de gaz à effet de serre en 2035 par rapport à 2020. Quatre scénarios sont proposés :

- *cahier des charges* — ce scénario prend en compte les contraintes réglementaires liées aux licences 5G, suppose le déploiement de la 6G en 2030, gèle le taux de partage des infrastructures au niveau de 2024 et considère une augmentation du trafic en ligne avec les prévisions actuelles (jusqu'à 150 Go par mois et par habitant en 2035) ;
- *usage avec croissance maîtrisée* — les hypothèses sont les mêmes mais la croissance du trafic est maîtrisée. L'évolution du trafic est prolongée de manière linéaire pour atteindre 45 Go par mois et par habitant en 2035 ;
- *écoconception systémique* — dans ce scénario, la couverture n'est assurée qu'avec les bandes de fréquence basses. Les contraintes de régulation sont gelées en 2024. Le déploiement de la 6G est suspendu. L'écoconception permet d'allonger la durée de vie des équipements de 2 ans. Les gains d'efficacité énergétique sont plus rapides. Les volumes de trafic sont réduits de 20 % par rapport au scénario de référence ;
- *écoconception et sobriété* — le scénario précédent est combiné à une plus faible augmentation du trafic de données pour atteindre 45 Go par mois par habitant en 2035 (contre 20 Go en 2024).

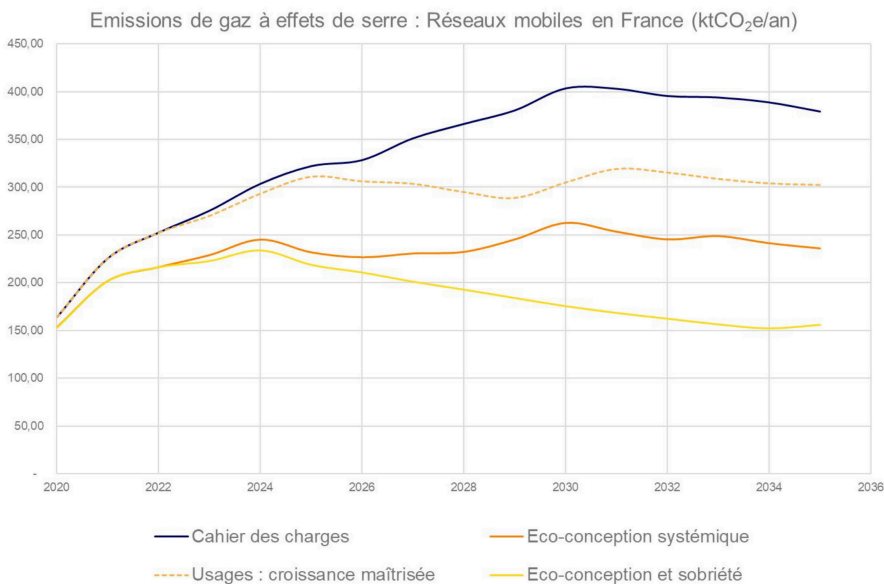


Fig. 13. GES des réseaux mobiles en France entre 2020 et 2035 selon le Shift Project. Figure extraite de [24].

La figure 13 montre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre des réseaux mobiles en France entre 2020 et 2035 suivant les scénarios de cette étude [24]. Si le scénario d'écoconception systémique permet de stabiliser les émissions autour de leur niveau de 2024, seul de scénario incluant la sobriété permet de revenir aux chiffres de 2020. À titre de comparaison, l'ITU a fixé un objectif de -45 % en 2030 par rapport à 2020 pour le secteur du numérique [68].

Que faut-il retenir des effets environnementaux de la 5G ?

Tout d'abord, malgré les progrès apportés par la 5G en matière d'efficacité énergétique, son déploiement n'empêchera pas, au moins à court et moyen termes, une augmentation de la consommation énergétique des réseaux mobiles. D'une part, du fait de l'empilement des générations de réseaux, l'introduction de la 5G ne devrait pas freiner le déploiement de la 4G avant plusieurs années. D'autre part, une amélioration de l'efficacité énergétique du réseau ne signifie pas une réduction de sa consommation énergétique globale, dès lors que celui-ci est dimensionné pour accueillir un trafic nettement plus important. C'est aussi ce que nous enseigne l'étude du déploiement des générations antérieures de réseaux en France : l'efficacité

énergétique croît à chaque génération mais moins rapidement que le trafic, si bien que la consommation énergétique des réseaux mobiles est en croissance continue. L'empilement des réseaux et l'augmentation de la capacité globale expliquent aussi que le nombre de stations de base ait doublé ces dix dernières années en France et que le nombre d'émetteurs-récepteurs ait quadruplé pendant la même période, malgré l'amélioration de l'efficacité spectrale et l'augmentation des largeurs de bande de fréquence.

On pourrait penser que l'introduction d'une nouvelle génération est nécessaire pour limiter la croissance de la consommation énergétique face à l'explosion du trafic. Mais, en réalité, chaque nouvelle génération vient alimenter la dynamique de croissance, dans la mesure où elle s'accompagne systématiquement de plus grandes capacités et de meilleures performances, suscitant ainsi de nouveaux usages ou intensifiant les usages existants. Compte tenu des applications envisagées (visionnage de vidéos très haute définition et même volumétriques, jeux en ligne, Internet des objets, véhicules autonomes, etc.), la 5G ne devrait pas faire exception. Le trafic supplémentaire qu'elle va engendrer s'accompagnera aussi d'une pression accrue sur le reste de l'infrastructure numérique (centres de données, réseaux filaires). Pour finir, ses impacts environnementaux ne se limitent pas à sa consommation électrique : la production des équipements réseau et des terminaux supplémentaires (smartphones et appareils connectés) est aussi source d'impacts environnementaux, mais ces derniers sont difficiles à évaluer faute de données.

Les effets de l'introduction de la 5G sur les autres secteurs (transport, bâtiment, agriculture, industrie, etc.) sont eux aussi difficiles à évaluer. Certaines études mettent en avant des bénéfices environnementaux, mais elles sont essentiellement produites par les industriels du numérique et, comme nous l'avons vu, ne constituent pas des sources fiables du fait de leurs nombreux biais. Compte tenu de l'état des connaissances, notre point de vue est, qu'au contraire, en améliorant la productivité dans la plupart des secteurs économiques, en accélérant l'ensemble des flux matériels et en offrant de nouvelles opportunités de consommation et de production, sans régulation, le déploiement de la 5G risque avant tout de conduire à une augmentation des émissions et des impacts environnementaux. Notre propos n'est pas de nier l'existence d'effets bénéfiques actuels ou futurs de la 5G. Cependant, sans mesures de régulation, les effets précédents risquent de l'emporter. Cette conclusion se rapproche de celle que le GIEC avait formulé en 2022 sur les effets de la numérisation en général. Au-delà des caractéristiques de la technologie 5G elle-même, ce sont donc surtout les projets dans lesquels elle s'inscrit et les trajectoires environnementales qu'ils déterminent qu'il faudrait interroger.

Quelles recherches en informatique... ?

En tant que chercheur ou chercheuse en informatique, nous avons parfois du mal à resituer notre travail dans l'anthropocène et ses défis que sont, par exemple, le changement climatique ou encore la sixième extinction de masse des espèces. Il s'agit pour les chercheurs et les chercheuses de s'emparer de questions telles que

comment notre activité de recherche s'intègre-t-elle dans les sociétés actuelles et dans la part destructrice de leur fonctionnement et comment l'intégrer dans les scénarios prospectifs à moyen et long terme ?

ou encore

est-ce que les résultats de nos recherches participent à la construction d'un monde qui correspond à nos valeurs ?

(ainsi qu'elles sont formulées dans l'atelier SEaS [92]). Ces questions sont inhabituelles pour le chercheur et la chercheuse en informatique, qui sont plus habitués à traiter des questions techniques bien identifiées, formalisables mathématiquement, et admettant souvent une unique solution. Elles révèlent non seulement les difficultés que nous avons à établir un lien entre nos recherches et les grandes questions de société, mais aussi à problématiser nos questions de recherche. Il s'agit en particulier d'expliciter chacune des étapes du processus qui mène aux contributions de recherche, en précisant non seulement la voie qui a été prise, mais aussi celles qui n'ont pas été retenues. Par exemple, dans quelle trajectoire s'inscrivent mes recherches ? Celle-ci est-elle liée à la SNBC (*Stratégie nationale bas carbone*, la feuille de route que s'est fixée la France pour honorer ses engagements en matière de décarbonation) ou explore-t-elle une trajectoire alternative ? Dans le cadre de la réduction des impacts environnementaux des réseaux mobiles, pourquoi ai-je choisi tel levier (mesure, optimisation énergétique, etc.) plutôt qu'un autre ? À quelles conditions sera-t-il efficace ? Mieux travailler la problématisation est bénéfique à plus d'un titre. Cela permet non seulement de s'assurer qu'un travail de recherche est pertinent face au problème qu'il entend aborder, mais aussi de mettre en lumière les pistes qui ont été sous-explorées.

Une des questions ouvertes et très peu discutée dans les cercles académiques est de savoir comment construire des technologies différentes, en accord avec les objectifs environnementaux que la France s'est fixée. Ces objectifs peuvent être ceux de la *Stratégie nationale bas carbone* ou ceux des stratégies de diminution de la consommation en eau, comme soutenue par les agences de l'Eau, ou bien encore des stratégies de non-artificialisation, comme la loi « Zéro artificialisation nette » (ZAN). Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, la SNBC fixe notamment des plafonds d'émissions de gaz à effet de serre à ne pas dépasser au niveau national dans chaque secteur. Comme l'indique l'ARCEP dans une note de synthèse à propos de son étude prospective sur les impacts environnementaux du numérique en France [89], pour

atteindre de tels objectifs *le numérique doit prendre la part qui lui incombe* et réduire son empreinte environnementale. Pour l'ARCEP le premier levier d'action est *la mise en œuvre de politiques de sobriété numérique qui commencent par une interrogation sur l'ampleur du développement des nouveaux produits ou services et une réduction ou stabilisation du nombre d'équipements*. Dans ce contexte, des réflexions sur une génération de réseaux mobiles pourraient prendre les formes suivantes :

1. comprendre et étudier les impacts environnementaux du numérique qu'ils soient directs ou indirects : cette forme est déjà largement entamée comme cette étude l'a démontré. Évidemment, des précisions peuvent encore être apportées sur les systèmes existants mais la forme la plus intéressante serait de s'occuper des systèmes en phase de recherche et de développement et donc de procéder à des évaluations en amont, c'est-à-dire, avant la décision de lancement de nouvelles technologies afin d'éclairer le débat public ;
2. garantir la réduction des impacts environnementaux des réseaux mobiles par construction en intégrant des contraintes strictes dès la conception :
 - un premier point de vue serait de se donner des contraintes environnementales strictes pour les impacts d'une nouvelle technologie. En suivant notre exemple, cela revient à allouer un montant maximal énergétique pour un réseau mobile et ainsi voir à quoi pourrait ressembler ce réseau et notamment quelle nouvelle génération serait à construire en relation avec les générations précédentes. En effet, se demander après coup si une génération mobile est à impact environnemental réduit est une question très différente de concevoir *a priori* un réseau à impact prédéfini. Dans sa conception, des contraintes énergétiques fortes à la fois sur la fabrication, sur les puissances de transmission, sur l'ordonancement des trafics, sur les puissances consommées par des dispositifs physiques devraient être intégrées dans un unique calcul et conduiraient à de nouveaux problèmes mathématiques ainsi qu'à de nouveaux défis dans la conception du matériel. La réflexion sur la durée de vie ferait partie intégrante de la conception. Et évidemment, les usages à conserver ou à rejeter dynamiquement voire définitivement seraient aussi des éléments cruciaux à considérer,
 - un second point de vue serait de réfléchir en amont aux seules applications qui seraient considérées comme utiles et non satisfaites par la génération actuelle et qui pourraient bénéficier de la nouvelle génération. En limitant d'office (et non par un calcul comme dans l'item précédent) l'usage de la nouvelle génération, sa conception technique et sa consommation énergétique totale en seraient radicalement modifiées. Certes, l'utilité d'une application est une notion difficile à mesurer et imposer, et le rôle joué par les différents acteurs (État, entreprises, etc.) dans cette décision est un problème de société ouvert ;

3. consacrer ses travaux scientifiques à des domaines ou des actions jugées plus utiles pour l'environnement que le développement de nouvelles technologies. En effet, le temps et l'argent utilisés pour concevoir et déployer de nouvelles technologies sont et resteront colossaux, et ces moyens ont été mis au service d'une technologie qui pour l'instant n'a pas été conçue pour être à impact environnemental faible et qui par conséquent, n'a que peu de chance de l'être réellement si des restrictions ne viennent pas entraver son utilisation. De plus, il y aura des dépenses supplémentaires liées à de nouveaux usages permis par cette nouvelle technologie si on suit la manière actuelle de la concevoir et de la commercialiser. Donc, certaines transformations sociétales qui nécessitent encore des recherches scientifiques seraient certainement plus utiles d'un point de vue environnemental : isolation des bâtiments, transformation de l'agriculture, réduction des inégalités, etc. Cependant, faire des substitutions de moyens financiers, techniques et humains n'est pas simple. Chaque système technique dépend en effet d'une multitude d'acteurs.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier (par ordre alphabétique) : Louis Golard, Yohan Lanier et Loutfi Nuaymi, pour leurs relectures attentives et leurs commentaires constructifs.

Références

- [1] Accenture. 2020. Accelerating 5G in Canada: The Role of 5G in the Fight Against Climate Change. https://canadatelecoms.ca/wp-content/uploads/2023/03/5G_Role_In_Fight_Against_Climate_Change.pdf.
- [2] ANFR. 2025. Données sur les installations radioélectriques de plus de 5 watts. <https://www.data.gouv.fr/en/datasets/donnees-sur-les-installations-radioelectriques-de-plus-de-5-watts-1/>.
- [3] A. Aguiléra, C. Guillot & A. Rallet. 2012. Mobile ICTs and physical mobility: Review and research agenda. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46, 4: 664-672. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.01.005>.
- [4] A. Ahmed et M. Coupechoux. 2023. ANFR Dataset Processing - Source Code. https://github.com/arsalanqasimahmed/ANFR_Dataset_Processing_Codes/tree/main.
- [5] E. Ahvar, A.-C. Orgerie & A. Lebre. 2022. Estimating Energy Consumption of Cloud, Fog and Edge Computing Infrastructures. *IEEE Transactions on Sustainable Computing* 7: 277-288. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2905900>.
- [6] H. Ahvenniemi, A. Huovila, I. Pinto-Seppä & M. Airaksinen. 2017. What are the differences between sustainable and smart cities? *Cities* 60: 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.009>.
- [7] C. Andersson, J. Bengtsson, G. Byström et al. 2022. Improving energy performance in 5G networks and beyond. *Ericsson Technology Review*. <https://www.ericsson>

- .com/4a485f/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2022/improving-energy-performance-in-5g-networks-and-beyond.pdf.
- [8] ARCEP. 2023. Evaluation de l'impact carbone de l'extinction des réseaux mobiles 2G/3G. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/comite-experts-mobile/evaluation-impact-carbone-extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html>.
 - [9] ARCEP. 2024. Enquête annuelle «Pour un numérique soutenable» - édition 2024 (données 2022). <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/impact-environnemental/enquete-annuelle-pour-un-numerique-soutenable-edition-2024.html>.
 - [10] ARCEP. 2025. Fermeture des réseaux mobiles 2G et 3G : ce qu'il faut anticiper. <https://www.arcep.fr/mes-demarches-et-services/consommateurs/fiches-pratiques/extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html>.
 - [11] J. Aslan, K. Mayers, J. G. Koomey & C. France. 2018. Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates. *Journal of Industrial Ecology* 22, 4: 785-798. <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>.
 - [12] L. Aubet, A. Rabot, L. Bitard & C. Riolo. 2023. *Empreinte environnementale de la fourniture d'accès internet en France*. ADEME - groupe RCP FAI (Référentiel de Catégorie de Produit Fourniture d'Accès à Internet)).
 - [13] G. Auer, V. Giannini, C. Desset et al. 2011. How much energy is needed to run a wireless network? *IEEE Wireless Communications* 18, 5: 40-49. <https://doi.org/10.1109/MWC.2011.6056691>.
 - [14] Autorité de régulation des transports. 2022. Le transport de voyageur en France, État des lieux des mobilités courte et longue distance (volume 2) : Évolutions des mobilités depuis 2008 et pendant la crise sanitaire au regard de leur impact environnemental. <https://www.autorite-transport.fr/wp-content/uploads/2022/12/rapport-multimodal-2022-pdf-final-2.pdf>.
 - [15] S. Aykut & A. Dahan. 2011. Dossier «Adaptation aux changements climatiques» - Le régime climatique avant et après Copenhague : sciences, politiques et l'objectif des deux degrés. *Natures Sciences Sociétés* 19, 2: 144-157. <https://doi.org/10.1051/nss/2011144>.
 - [16] V. Barbarossa, A. M. Schipper, I. Andringa et al. 2026. The Many Pathways of Mining Impacts on Biodiversity. *Conservation Letters* 19, 1. <https://doi.org/10.1111/con4.70000>.
 - [17] P. Bergmark, V. C. Coroama, M. Höjer & C. Donovan. 2020. A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services: Part II: Multiple Services and Companies. In *International Conference on ICT for Sustainability*, 46-55. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401711>.
 - [18] J. Bieser, B. Salieri, R. Hischier & L. Hilty. 2020. *Next generation mobile networks: Problem or opportunity for climate protection?* Technical report, University of Zurich.
 - [19] J. C. T. Bieser, R. Hintemann, L. M. Hilty & S. Beucker. 2023. A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology. *Environmental Impact Assessment Review* 99: 107033.
 - [20] A. Bigo. 2020. Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement. Theses, Institut Polytechnique de Paris.
 - [21] E. Björnson & E. G. Larsson. 2018. How Energy-Efficient Can a Wireless Communication System Become? *Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*: 1252-1256. <https://arxiv.org/pdf/1812.01688.pdf>.

- [22] I. Brooks, M. L. Thorslund & A. Biørn-Hansen. 2023. Tech4Bad in the Oil and Gas Industry: Exploring Choices for ICT Professionals. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 142-153. <https://doi.org/10.1109/ict4s58814.2023.00023>.
- [23] N. E. Brown, F. Motallebiaraghi, J. F. Rojas et al. 2023. Evaluation of Autonomous Vehicle Sensing and Compute Load on a Chassis Dynamometer. In *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1989-1995. <https://doi.org/10.1109/ITSC57777.2023.10422013>.
- [24] I. Buquicchio, M. Coupechoux, M. de Bank et al. 2024. *Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients*. The Shift Project.
- [25] Cambridge Econometrics & Analysys Mason. 2021. Realising the Benefits of 5G. <https://www.gov.uk/government/publications/realising-the-benefits-of-5g>.
- [26] C. Cano & H. March. 2025. Problematising the sustainability of 5G/6G networks and devising alternative ways forward. *ACM Journal on Responsible Computing* 2, 1.
- [27] R. Cardone. 2021. *Achieving sustainability with energy efficiency in 5G networks*. Ericsson. Consulté à l'adresse <https://www.ericsson.com/en/blog/3/2021/1/achieving-sustainability-with-energy-efficiency-in-5g-networks>.
- [28] C. A. Chan, A. F. Gygax, C. Leckie et al. 2016. Telecommunications energy and greenhouse gas emissions management for future network growth. *Applied Energy* 166: 174-185. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.007>.
- [29] A. Charnay. 2020. Pourquoi la 5G est une mauvaise nouvelle pour l'environnement. <https://www.01net.com/actualites/pourquoi-la-5g-est-une-mauvaise-nouvelle-pour-l-environnement-1846716.html>,
- [30] P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux et al. 2022. *Effets environnementaux de la 5G – partie 1*. Research report. EcoInfo.
- [31] P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux et al. 2024. Effets environnementaux de la 5G – partie 2. *Bulletin 1024*, 24 : 99-127. DOI:10.48556/SIF.1024.24.99.
- [32] Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles. 2022. *Evaluation de la consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G*. Technical report. ARCEP.
- [33] V. C. Coroama, P. Bergmark, M. Höjer & J. Malmödin. 2020. A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services: Part I: Single Services. In *International Conference on ICT for Sustainability*, 36-45.
- [34] V. C. Coroamă & D. Pargman. 2020. Skill Rebound: On an Unintended Effect of Digitalization. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 213-219.
- [35] F. Creutzig, D. Acemoglu, X. Bai et al. 2022. Digitalization and the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources* 47, 1: 479-509.
- [36] M. de Jong, S. Joss, D. Schraven et al. 2015. Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production* 109: 25-38.
- [37] C. Dongxu. 2020. 5G Power: Creating a green grid that slashes costs, emissions & energy use. <https://www.huawei.com/en/technology-insights/publications/huawei-tech/89/5g-power-green-grid-slashes-costs-emissions-energy-use>.
- [38] G. Duranton & M. A. Turner. 2011. The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities. *American Economic Review* 101, 6: 2616-2652.
- [39] D. Ekchajzer, L. Bornes, J. Combaz et al. 2024. Decision-making under environmental complexity: the need for moving from avoided impacts of ICT solutions to systems thinking approaches. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*.

- [40] J. Eliasson. 2022. Will we travel less after the pandemic? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 13: 100509.
- [41] Ericsson. 2024. Ericsson Mobility Report. <https://www.ericsson.com/4adb7e/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2024/ericsson-mobility-report-november-2024.pdf>.
- [42] European Commission. Directorate General for Communications Networks, Content and Technology, Tech4i2, Real Wireless, CONNECT, Trinity College Dublin & Inter-Digital. 2016. *Identification and quantification of key socio-economic data to support strategic planning for the introduction of 5G in Europe: final report*. Publications Office, LU.
- [43] F. Flipo & J. Combaz. 2024. Le numérique face à ses responsabilités planétaires - Un état des lieux. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [44] Forum International des Transports - OCDE. 2014. *Usage de la voiture particulière : Les tendances à long terme*. OCDE.
- [45] C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks et al. 2021. The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns* 2, 9.
- [46] P. Frenger & R. Tano. 2019. More Capacity and Less Power: How 5G NR Can Reduce Network Energy Consumption. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, 1-5.
- [47] Fédération française des télécoms. 2024. Questions / réponses sur la fermeture 2G/3G. <https://www.fftelecoms.org/app/uploads/2023/10/FAQ-fin-2G-3G-1.pdf>.
- [48] C. Gabriel, A. Hansang & A. Chern. 2020. Green 5G: building a sustainable world. Analysys Mason, <https://www.huawei.com/en/public-policy/green-5g-building-a-sustainable-world>.
- [49] GeSI. 2008. *SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*. The Global e-Sustainability Initiative.
- [50] GeSI. 2015. *SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges*. The Global e-Sustainability Initiative.
- [51] GeSI. 2019. *Digital with Purpose: Delivering a SMARTer2030*. The Global Enabling Sustainability Initiative.
- [52] A. Gohar & G. Nencioni. 2021. The Role of 5G Technologies in a Smart City: The Case for Intelligent Transportation System. *Sustainability* 13, 9.
- [53] L. Golard, R. Dethienne, J. Louveaux & D. Bol. 2026. A parametric life-cycle model for assessing environmental impacts of 4G and 5G cellular base stations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- [54] L. Golard, J. Louveaux & D. Bol. 2023. Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints: the case of Belgium for 2020–2025. *Annals of Telecommunications* 78, 5: 313-327.
- [55] D. Gritsenko, J. Aaen & B. Flyvbjerg. 2024. Rethinking digitalization and climate: don't predict, mitigate. *npj Climate Action* 3, 1: 43.
- [56] GSMA. 2019. Infrastructure Sharing: An Overview. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/gsma_resources/infrastructure-sharing-an-overview/.
- [57] GSMA. 2019. The Enablement Effect. The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2019/12/GSMA_Enablement_Effect.pdf.
- [58] J. Guérid, J.-B. Doré, J. Reverdy et al. 2022. Toward Eco-Design of a 5G mmWave Transmitarray Antenna Based on Life Cycle Assessment. In *Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, 440-445.

- [59] A. Hamm, A. Willner & I. Schieferdecker. 2020. Edge Computing: A Comprehensive Survey of Current Initiatives and a Roadmap for a Sustainable Edge Computing Development. In *Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik (WI)*, 694-709.
- [60] L. M. Hilty & B. Aebischer. 2015. ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In *ICT Innovations for Sustainability*, 3-36.
- [61] N. Horner, A. Shehabi & I. L. Azevedo. 2016. Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*.
- [62] Huawei. 2019. 5G Power Whitepaper. <https://carrier.huawei.com/~media/CNMG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>.
- [63] G. F. Huseien & K. W. Shah. 2022. A review on 5G technology for smart energy management and smart buildings in Singapore. *Energy and AI* 7.
- [64] International Energy Agency. 2019. Digitalisation and Energy. <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>.
- [65] IPCC. 2023. *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [66] K. L. Ipsen, R. K. Zimmermann, P. S. Nielsen & M. Birkved. 2019. Environmental assessment of Smart City Solutions using a coupled urban metabolism—life cycle impact assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24, 7: 1239-1253.
- [67] ITU. 2019. Sustainable power-feeding solutions for 5G networks. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1210-201912-I!!PDF-E&type=items.
- [68] ITU. 2020. ICT industry to reduce greenhouse gas emissions by 45 per cent by 2030 – ITU, GeSI, GSMA & SBTi set science-based pathway in line with Paris Agreement. Press release. <https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR04-2020-ICT-industry-to-reduce-greenhouse-gas-emissions-by-45-percent-by-2030.aspx>.
- [69] D. Johnson. 2018. The 5G Dilemma: More Base Stations, More Antennas - Less Energy? *IEEE Spectrum*. <https://spectrum.ieee.org/energywise/telecom/wireless/will-increased-energy-consumption-be-the-achilles-heel-of-5g-networks>.
- [70] F. Jungerman. 2020. Nine Months with 5G: 4.7 Million Subs – Each Using 27 GB per Month. <https://tefficient.com/nine-months-with-5g-4-7-million-subs-each-using-27-gb-per-month/>.
- [71] M. Al Khairy. 2019. Benchmark global study proves 5G performance, coverage and power-efficiency. <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/10/benchmark-global-study-proves-5g-performance-coverage-and-power-efficiency>.
- [72] M. Klapez, C. A. Grazia & M. Casoni. 2021. The Energy Footprint of 5G Multi-RAT Cellular Architectures. *IEEE Access* 9.
- [73] T. Li, L. Yu, Y. Ma et al. 2023. Carbon emissions of 5G mobile networks in China. *Nature Sustainability* 6: 1620-1631.
- [74] Y. Li, A.-C. Orgerie, I. Rodero, B. Lemma Amersho et al. 2018. End-to-end Energy Models for Edge Cloud-based IoT Platforms: Application to Data Stream Analysis in IoT. *Future Generation Computer Systems* 87: 667-678.
- [75] J. Malmodin, P. Bergmark, N. Lövehagen et al. 2014. Considerations for macro-level studies of ICT's enablement potential. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)* (ict4s-14).
- [76] J. Malmodin, P. Bergmark & S. Matinfar. 2018. A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 168-186.

- [77] J. Malmodin & V. Coroama. 2016. Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation — The example of smart metering. In *Electronics Goes Green (EGG)*, 1-9.
- [78] J. Malmodin, D. Lundén, A. Moberg et al. 2014. Life Cycle Assessment of ICT. *Journal of Industrial Ecology* 18, 6: 829-845.
- [79] M. Manville, D. A. King & M. J. Smart. 2017. The Driving Downturn: A Preliminary Assessment. *Journal of the American Planning Association* 83, 1: 42-55.
- [80] C. J. Martin, J. Evans & A. Karvonen. 2018. Smart and sustainable? Five tensions in the visions and practices of the smart-sustainable city in Europe and North America. *Technological Forecasting and Social Change* 133: 269-278.
- [81] S. Mishra, A. F. Zanella, O. E. Martínez-Durive et al. 2024. Characterizing 5G Adoption and its Impact on Network Traffic and Mobile Service Consumption. In *Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 1531-1540.
- [82] P. Mokhtarian. 2009. If telecommunication is such a good substitute for travel, why does congestion continue to get worse? *Transportation Letters* 1, 1: 1-17.
- [83] Patrick Nelson. 2019. La 5G sera-t-elle plus économe en énergie que la 4G? <http://www.reseaux-telecoms.net/actualites/lire-la-5g-sera-t-elle-plus-econome-en-energie-que-la-4g-27752.html>,
- [84] Nokia. 2015. *LTE-Advanced Pro - Pushing LTE capabilities towards 5G*. Technical report. Nokia.
- [85] P. Nuss & M. J. Eckelman. 2014. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLOS ONE* 9, 7: 1-1.
- [86] OMDIA. 2021. 5G Impact 2030: The impact of 5G on the economy, employment, and emissions in France, Spain, Poland, Belgium, and Romania in 2030.
- [87] B. Partridge. 2019. Telco Industry Hopes and Fears - From Energy Costs to Edge Computing Transformation.
- [88] E. L. Perasso, C. Vateau, F. Domon et al. 2022. *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective*. ARCEP-ADEME.
- [89] E. L. Perasso, C. Vateau, F. Domon et al. 2023. *Note de synthèse de l'ARCEP sur l'étude prospective 2030-2050*. ARCEP-ADEME. Consulté à l'adresse https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/note-synthese-Arcep-gouvernement-prospective-2030-2050_mars2023.pdf.
- [90] T. Pirson & D. Bol. 2021. Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production* 322: 128966.
- [91] Qualcomm - Signals Research Group. 2019. A Global Perspective of 5G Network Performance.
- [92] S. Quinton & É. Tannier. 2020. Atelier Sciences Environnements Sociétés.
- [93] A. Rasoldier. 2024. Comment évaluer le potentiel d'une solution numérique face à l'urgence écologique? Application aux plateformes de covoiturage régulier à l'échelle locale. Université Grenoble Alpes. Consulté à l'adresse <https://theses.hal.science/tel-04702139>.
- [94] J. Rockström, W. Steffen, K. Noone et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 7263: 472-475.
- [95] G. Roussilhe. 2020. La controverse de la 5G. <https://gauthierroussilhe.com/pdf/5G-Juillet2020.pdf>.
- [96] G. Roussilhe. 2021. Que peut le numérique pour la transition écologique? <https://gauthierroussilhe.com/ressources/que-peut-le-numerique-pour-la-transition-ecologique>.

- [97] G. Roussilhe, A.-L. Ligozat & S. Quinton. 2023. A long road ahead: a review of the state of knowledge of the environmental effects of digitization. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 62: 101296.
- [98] I. Salomon. 1986. Telecommunications and travel relationships: a review. *Transportation Research Part A: General* 20, 3: 223-238.
- [99] Samsung. 2025. Life Cycle Assessment For Mobile Phones. <https://www.samsung.com/global/sustainability/policy-file/AYVhR1k6BicAIx95/LCAResultsforSmartphones.pdf>.
- [100] W. Scharnhorst, L. M. Hilty & O. Jolliet. 2006. Life cycle assessment of second generation (2G) and third generation (3G) mobile phone networks. *Environment International* 32, 5: 656-675.
- [101] A. Scheidel, D. Del Bene, J. Liu et al. 2020. Environmental conflicts and defenders: A global overview. *Global Environmental Change* 63: 102104.
- [102] Statista. 2023. Prévision du taux de pénétration du smartphone en France de 2013 à 2028. <https://fr.statista.com/previsions/531119/taux-de-penetration-du-smartphone-france>.
- [103] M. Taiebat, A. L. Brown, H. R. Safford et al. 2018. A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles. *Environmental Science & Technology* 52, 20: 11449-11465.
- [104] Tefficient. 2019. Mobile data consumption continues to grow – a majority of operators now rewarded with ARPU. <https://tefficient.com/wp-content/uploads/2019/09/tefficient-industry-analysis-3-2019-mobile-data-usage-and-revenue-1H-2019-per-operator-5-Sep.pdf>.
- [105] Tefficient. 2020. The gig economy: 58% more gigabytes generated 0.4% more revenue 5G monetisation lessons from China and Korea. <https://tefficient.com/wp-content/uploads/2020/04/tefficient-industry-analysis-1-2020-mobile-data-usage-and-revenue-FY-2019-per-operator.pdf>.
- [106] The Shift Project. 2021. Impact environnemental du numérique : tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G. <https://theshiftproject.org/article/impact-environnemental-du-numerique-5g-nouvelle-etude-du-shift/>.
- [107] A. M. Toli & N. Murtagh. 2020. The Concept of Sustainability in Smart City Definitions. *Frontiers in Built Environment* 6.
- [108] S. Tombaz, P. Frenger, F. Athley et al. 2015. Energy Performance of 5G-NX Wireless Access Utilizing Massive Beamforming and an Ultra-Lean System Design. In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1-7.
- [109] S. Tombaz, P. Frenger, M. Olsson & A. Nilsson. 2016. Energy performance of 5G-NX radio access at country level. In *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 1-6.
- [110] Vodafone. 2024. Environmental, Social and Governance Addendum. <https://investors.vodafone.com/~media/Files/V/Vodafone-IR/documents/esg/vodafone-esg-addendum-2024/>.
- [111] Z. Wadud, M. Adeel & J. Anable. 2024. Understanding the large role of long-distance travel in carbon emissions from passenger travel. *Nature Energy*.
- [112] M. Wagih, A. Bainbridge, B. Alsulami & J. Kettle. 2024. Environmental Life-Cycle Assessment (LCA) of Wireless RF Systems: A Comparative Sustainability Analysis and a Microwave Engineers' Guide to LCA. *IEEE Journal of Microwaves* 4, 4: 987-1000.
- [113] L. Williams, B. K. Sovacool & T. J. Foxon. 2022. The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157: 112033.

- [114] D. Xu, A. Zhou, X. Zhang et al. 2020. Understanding Operational 5G: A First Measurement Study on Its Coverage, Performance and Energy Consumption. In *ACM SIGCOMM Conference*, 479-494.
- [115] X. Yuan, M. Wu, Z. Wang et al. 2022. Understanding 5G performance for real-world services: a content provider's perspective. In *ACM SIGCOMM Conference*, 101-113.
- [116] J. Zagdanski & P. Castells. 2023. The impact of spectrum policy on carbon emissions. In *European Conference of the International Telecommunications Society (ITS)*.
- [117] Z. Zhang, L. Scola & A. Schulman. 2023. Investigating the Sustainability of the 5G Base Station Overhaul in the United States. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 53-62.

Apprentissage de modèles de préférence

Un mariage entre théorie de la décision et apprentissage automatique

Margot Hérin

Instituto de Telecomunicações, Lisbonne, Portugal

L'individu, le groupe ou l'entité en charge de *prendre une décision* se heurte souvent à une première difficulté : comparer des solutions réalisables qui, selon le point de vue considéré, présentent toutes des avantages et des inconvénients. Par exemple, la comparaison de propositions de projets de développement ou de politiques publiques (e.g., politiques climatiques [6], planification énergétique durable [17]) nécessite de tenir compte d'impacts de natures diverses (environnementaux, économiques, sociaux, etc.) ou d'avis, potentiellement divergents, de différents experts et parties prenantes. Un autre exemple, à l'échelle individuelle, est le choix d'un itinéraire de voyage, qui implique souvent de trouver un équilibre entre plusieurs critères conflictuels, tels que le coût, la durée, les émissions de carbone et le confort.

Cette thèse¹, ancrée dans le domaine de l'*intelligence artificielle*, s'intéresse à la construction de systèmes capables de faciliter ou d'automatiser l'arbitrage entre ces différents points de vue selon les *préférences* du décideur. En particulier, exploitant d'un côté des *modèles de préférence* issus de la *théorie de la décision*, et de l'autre des techniques d'*apprentissage automatique*, elle fournit des *algorithmes d'apprentissage de préférences*. Ces derniers

1. Réalisée au LIP6 (UMR 7606, CNRS), sous la direction de Patrice Perny (Sorbonne université, LIP6) et Nataliya Sokolovska (Sorbonne université, LCQB) et disponible en lecture complète ici : <https://theses.fr/2025SORUS169>.

permettent d'obtenir, à partir de l'observation d'exemples, des représentations formelles des préférences, rendant alors possible la comparaison et l'évaluation systématique des solutions, et, *in fine*, la prise de décision (par exemple, le choix de la meilleure solution).

Modélisation des préférences

En présence de n points de vue sur les solutions, on peut représenter celles-ci par des vecteurs $x = (x_1, \dots, x_n)$, pris dans un ensemble admissible $\mathcal{X}$, représentant leurs conséquences selon chaque points de vue. Ensuite, une manière, parmi d'autres, de modéliser les préférences d'un décideur sur $\mathcal{X}$, peut être de faire appel à une *fonction d'utilité* $U_w : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$, qui associe à chaque solution un score global. Le système de valeur du décideur guide alors cette évaluation à travers le paramètre w , encodant par exemple l'importance qu'il porte aux différents points de vue. Ainsi, après l'adaptation de w aux valeurs du décideur, une recommandation peut lui être proposée par l'optimisation de la fonction U_w sur l'ensemble $\mathcal{X}$ des solutions.

Ainsi, un vaste corpus de travaux dans le domaine de la *théorie de la décision*, allant de l'économie [20] et de la psychologie mathématique [19] à l'intelligence artificielle [1], s'est intéressé à la conception de ces fonctions d'utilité. L'objectif poursuivi est souvent double : assurer un *fort pouvoir descriptif* permettant de modéliser des comportements décisionnels variés et intégrant des logiques d'évaluation complexes, et garantir des propriétés mathématiques permettant d'assurer un certain niveau de *rationalité* et de cohérence parmi les décisions prises.

Une première approche élémentaire consiste à construire une *utilité additive* de la forme $\sum_{i=1}^n w_i u_i(x_i)$, où chaque conséquence x_i est d'abord encodée sur une échelle de satisfaction commune $[0, 1]$ par une *utilité marginale* u_i , puis pondérée par un poids w_i reflétant l'importance accordée au point de vue i . Cependant, l'agrégation des utilités marginales au moyen d'une somme pondérée limite fortement les capacités descriptives du modèle. Par exemple, cette agrégation ne permet pas de modéliser la préférence pour des solutions présentant des vecteurs d'utilité marginales *équilibrés*. Ainsi, il n'est pas possible de rendre $(0.5, 0.5)$ préférable simultanément à $(1, 0)$ et $(0, 1)$. Une solution simple dans ce cas consiste à attribuer un bonus aux solutions qui obtiennent de bonnes performances selon l'ensemble des points de vue. Il suffit pour cela d'ajouter un terme *conjonctif* à la somme pondérée, par exemple $\prod_{i=1}^n u_i(x_i)$ ou $\min\{u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)\}$, pondéré par un coefficient positif suffisamment élevé. On observe en effet que ce terme conjonctif prend une valeur strictement positive en $(0.5, 0.5)$, mais reste nul en $(1, 0)$ et en $(0, 1)$.

Plus généralement, au-delà de la partie linéaire de la fonction d'agrégation, divers termes d'*interaction* peuvent être introduits afin de modéliser des synergies positives, mais aussi négatives, au sein de certains groupes de points de vue. C'est l'idée des agrégateurs $F_w : [0, 1]^n \mapsto \mathbb{R}$ paramétrés par une *fonction d'ensemble* w_S , $S \subseteq \{1, \dots, n\}$ associant un poids à chaque groupe de critères potentiellement en interaction. De telles fonctions d'agrégation permettent d'étendre le modèle de l'utilité additive à la classe des fonctions dites *totalelement décomposables* (TD), s'écrivant sous la forme :

$$U_w(x) = F_w(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) \quad (1)$$

Deux exemples d'importance majeure de fonctions F_w sont l'*intégrale de Choquet* [8] et le modèle *multilinéaire* [16], qui modélisent respectivement les termes d'interaction à l'aide des opérateurs de conjonction min et $\prod$. Ces derniers agrégateurs sont croissants par rapport à chacun de leurs arguments lorsque w est monotone par rapport à l'inclusion des ensembles (on parle alors de *capacité*). Ceci permet de garantir qu'une certaine solution dont les performances sont supérieures à tout point de vue à celles d'une autre obtienne un score global plus élevé, i.e.

$$\forall i, u_i(x_i) \geq u_i(x'_i) \Rightarrow U_w(x) \geq U_w(x'). \quad (2)$$

Une autre classe importante de fonctions d'utilité autorisant les interactions entre points de vue et généralisant le modèle TD est celle des fonctions d'utilité GAI-décomposables [7]. Celles-ci prennent la forme d'une décomposition additive en termes multivariés :

$$U(x) = \sum_{S \in \mathcal{F}} u_S(x_S) \quad (3)$$

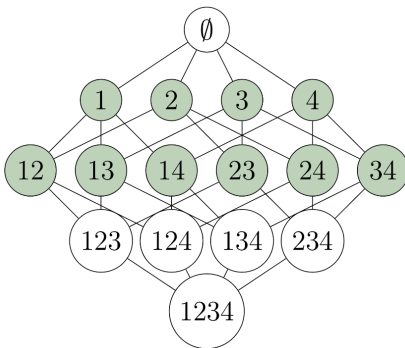
où $\mathcal{F}$ est une collection de sous-ensembles de $\{1, \dots, n\}$, et où, pour tout $S \in \mathcal{F}$, x_S correspond au vecteur x restreint aux points de vue inclus dans S .

Apprentissage de représentations parcimonieuses de préférences

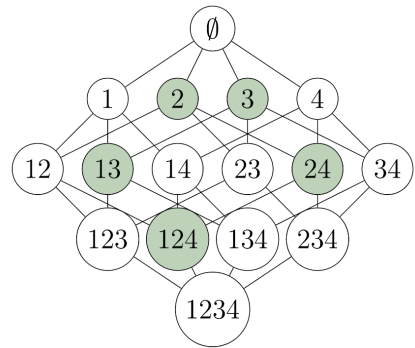
En raison de la nature combinatoire des interactions possibles, la puissance descriptive de ces modèles repose toutefois sur l'exploitation d'un grand nombre de paramètres, et leurs propriétés normatives, sur un grand nombre de contraintes. Par exemple, la capacité w paramétrant le modèle TD est définie par 2^n coefficients. Par conséquent, les méthodes d'*apprentissage de préférences* (appelées aussi *élicitation des préférences*), visant à adapter leurs paramètres au système de valeurs d'un décideur, s'appuient généralement sur des *restrictions préalables* de la flexibilité du modèle. Par exemple, une restriction largement utilisée consiste à autoriser uniquement les interactions

au sein de groupes de taille inférieure ou égale à un certain entier k , ou encore à spécifier en amont la collection $\mathcal{F}$ de groupes en interaction dans le modèle GAI [5, 9]. Cependant, bien que ces restrictions simplifient le problème d'apprentissage, elles amputent drastiquement le modèle d'une partie de sa richesse descriptive avant l'apprentissage.

Ainsi, exploitant les outils de l'apprentissage automatique et de l'optimisation pour l'apprentissage de modèles en haute dimension, nous proposons des algorithmes d'apprentissage de fonctions d'utilité avec interactions issues de la théorie de la décision, dont l'efficacité computationnelle ne repose pas sur des réductions préalables de la flexibilité des modèles (telles que, par exemple, la restriction des interactions possibles aux seules paires de points de vue, comme illustré sur le schéma (a) ci-dessous). En particulier, les algorithmes proposés réalisent un apprentissage *parcimonieux* des paramètres de ces fonctions d'utilité, permettant d'exploiter pleinement la richesse descriptive de ces modèles en laissant émerger, à partir des données de préférence, les interactions les plus importantes (comme illustré sur le schéma (b) ci-dessous, où les trois groupes $\{1, 3\}$, $\{2, 4\}$ et $\{1, 2, 4\}$, de cardinalité non limitée à 2, suffisent à décrire les préférences via les termes conjonctifs $\min(u_1(x_1), u_3(x_3))$, $\min(u_2(x_2), u_4(x_4))$ et $\min(u_1(x_1), u_2(x_2), u_4(x_4))$, produisant ainsi des modèles simples. Ce faisant, nous cherchons aussi à fournir à la communauté de l'apprentissage automatique des modèles de préférences interprétables et dotés de propriétés mathématiques souhaitables.



(a) Restriction des interactions aux groupe de taille $k = 2$.



(b) Émergence des interactions importantes sans condition sur la cardinalité.

Plus précisément, ces représentations sont apprises par la résolution de problèmes d'apprentissage régularisés par des fonctions favorisant les paramètres avec peu de coefficients non nuls. Ces fonctions de régularisation, dont

la norme ℓ_1 constitue un exemple canonique [18], se caractérisent par des points de non-différentiabilité là où les paramètres sont nuls, une propriété qui encourage les solutions parcimonieuses au cours du processus d'optimisation. D'un point de vue de l'optimisation, cette non-différentiabilité ajoute un niveau de difficulté supplémentaire à la tâche déjà complexe de l'optimisation dans des espaces de paramètres de haute dimension. Par conséquent, cette thèse exploite et adapte des paradigmes d'optimisation proposés pour résoudre de tels problèmes [2, 3, 4, 21], prenant notamment la forme d'algorithmes itératifs à faible coût par itération (mais à convergence lente) permettant d'obtenir des solutions approximatives au problème d'apprentissage dans des délais raisonnables, même pour des modèles impliquant des millions de paramètres.

Principales contributions

La donnée de départ des algorithmes d'apprentissage proposés est un ensemble d'exemples de préférences $x^j \succ x'^j$ et d'indifférences $x^j \sim x'^j$, ou d'évaluations numériques globales $x^j, y^j \in \mathbb{R}$, disponibles de manière différente selon le contexte. On considère notamment trois cadres d'apprentissage : (i) le cadre classique *en batch et passif* où l'on considère une base d'exemples précollectés, (ii) le cadre *en ligne* où les exemples sont accessibles sous la forme d'un flux incrémental, et finalement (iii) le cadre *actif* où les exemples sont sélectionnés et obtenus en interaction avec le décideur auquel on pose des questions.

Choisissez votre cadre :



Cadre passif Cadre en ligne Cadre actif

Les algorithmes proposés, systématiquement accompagnés de garanties théoriques et validations empiriques dans la thèse, sont détaillés ci-dessous selon le modèle d'utilité considéré.

Modèles TD linéaires en w

Un algorithme dans le cadre en batch (i) est d'abord proposé pour l'intégrale de Choquet des utilités marginales, une instance centrale des modèles TD présentant l'avantage d'être linéaires en w . L'algorithme comprend l'estimation des utilités marginales et d'une représentation parcimonieuse de la capacité w via sa *transformée de Möbius* [10, 13]. Les deux étapes reposent sur des programmes linéaires, résolubles à l'exact à l'aide de solveurs numériques. Ils ne sont cependant pas résolubles à l'exact pour plus d'une douzaine de points de vue du fait d'un nombre de variables et de contraintes exponentiel en n . Ainsi, dans un cadre unifié pour l'apprentissage des modèles TD linéaires en w , incluant notamment l'intégrale de Choquet et le modèle multilinéaire, nous proposons une méthode d'optimisation computationnellement efficace, fondée sur le principe des *moindres carrés itérés repondérés* et la *dualité Lagrangienne* [11]. Enfin, nous proposons dans le cadre en ligne (ii), une méthode de mise à jour computationnellement efficace de ces modèles à chaque arrivée de nouvel exemple, en exploitant le principe des méthodes *follow-the-regularized-leader*, que l'on combine ensuite avec le principe de la *méthode des multiplicateurs à directions alternées* pour inclure des contraintes structurelles sur la capacité w telles que la monotonie par rapport à l'inclusion [12].

Modèles TD sans condition de linéarité en w

Un algorithme général d'apprentissage, adapté à toute fonction d'agrégation paramétrique F_w (à utilités marginales connues), est ensuite proposé dans le cadre actif (iii). Basé sur le principe des méthodes d'*apprentissage actif par désagrément*, il permet de réduire progressivement l'espace des paramètres possibles en extrayant du décideur les exemples les plus informatifs, jusqu'à ce que l'incertitude concernant la solution préférée dans un ensemble de solutions de départ soit suffisamment réduite pour pouvoir lui formuler une recommandation [14]. L'algorithme permet, de manière novatrice, de tenir compte du bruit dans les réponses du décideur, tout en évitant la lourdeur computationnelle des méthodes Bayésiennes.

Modèles GAI

Un algorithme d'apprentissage de fonctions GAI est finalement proposé dans le cadre batch (i). Il est capable simultanément, d'identifier les facteurs correspondant aux attributs en interaction et d'apprendre les fonctions d'utilité définies sur ces facteurs, sans restreindre la taille des groupes d'interactions possibles. L'approche proposée repose sur la détermination d'une représentation parcimonieuse de la décomposition ANOVA de la fonction d'utilité, en utilisant l'*apprentissage par noyaux multiples* [15].

Perspectives

Ces travaux ouvrent la voie à l'apprentissage de modèles de préférences de formes variées, allant au delà de la fonction d'utilité qui présuppose certaines propriétés structurelles des préférences telles que la *complétude* (toutes les solutions sont comparables) et la *transitivité* (si x est préféré à y et y à z , alors x est préférée à z).

Les algorithmes proposés pourraient en effet être étendus à l'apprentissage de modèles potentiellement non transitifs, par exemple de la forme $P_w(x, x') = F_w(u_1(x_1) - u_1(x'_1), \dots, u_n(x_n) - u_n(x'_n))$, où chaque alternative x ou x' se voit associer un score décrivant l'intensité de la préférence de x sur x' , obtenu en agrégeant les écarts de performance entre x et x' selon les différents points de vue (i.e. $u_i(x_i) - u_i(x'_i)$, $i = 1, \dots, n$). Ceci permettrait d'accéder à une palette encore plus riche de représentations de préférences, tout en maintenant les objectifs d'efficacité computationnelle et d'interprétabilité des modèles atteints dans cette thèse.

Un autre prolongement naturel de ces travaux consiste en leur intégration au sein de systèmes d'intelligence artificielle opérationnels, tels que les *systèmes de recommandation* ou les *agents conversationnels*, afin d'assurer la traçabilité et l'interprétabilité des décisions prises ou recommandées par ces systèmes, et de les doter de certaines propriétés normatives jouant le rôle de garde-fous, dans la perspective d'une intelligence artificielle *transparente* et *rationnelle*.

Références

- [1] F. Bacchus et A. Grove. 1995. Graphical Models for Preference and Utility. In *UAI'95*.
- [2] F. Bach, R. Jenatton, J. Mairal, G. Obozinski, et al. 2012. Optimization with sparsity-inducing penalties. *Foundations and Trends in Machine Learning* 4, 1: 1-106.
- [3] A. Beck et M. Teboulle. 2009. A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems. *SIAM journal on imaging sciences* 2, 1: 183-202.
- [4] L. Bottou, F. E. Curtis, et J. Nocedal. 2018. Optimization Methods for Large-Scale Machine Learning. *SIAM Review* 60, 2: 223-311. <https://doi.org/10.1137/16M1080173>.
- [5] R. Bresson, J. Cohen, E. Hüllermeier, C. Labreuche, et M. Sebag. 2021. Neural representation and learning of hierarchical 2-additive Choquet integrals. In *Proceedings of the Twenty-Ninth International Conference on International Joint Conferences on Artificial Intelligence*, 1984-1991.
- [6] H. Doukas et A. Nikas. 2020. Decision support models in climate policy. *European Journal of Operational Research* 280, 1: 1-24.
- [7] P. C. Fishburn. 1970. *Utility Theory for Decision Making*. Wiley.
- [8] M. Grabisch. 1996. The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research* 89, 3: 445-456.

- [9] M. Grabisch, C. Labreuche, et M. Ridaoui. 2022. Well-formed decompositions of Generalized Additive Independence models. *Annals of Operations Research* 312, 2: 827-852.
- [10] M. Herin, P. Perny, et N. Sokolovska. 2022. Learning Sparse Representations of Preferences within Choquet Expected Utility Theory. In *The 38th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*.
- [11] M. Herin, P. Perny, et N. Sokolovska. 2023. Learning Preference Models with Sparse Interactions of Criteria. In *Proceedings of the Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-23*, 3786-3794.
- [12] M. Herin, P. Perny, et N. Sokolovska. 2024. Online Learning of Capacity-Based Preference Models. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI) 2024*, 7118-7126.
- [13] M. Herin, P. Perny, et N. Sokolovska. 2024. Learning preference representations based on Choquet integrals for multicriteria decision making. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*: 1-34.
- [14] M. Herin, P. Perny, et N. Sokolovska. 2024. Noise-Tolerant Active Preference Learning for Multicriteria Choice Problems. In *International Conference on Algorithmic Decision Theory*, 191-206.
- [15] M. Herin, P. Perny, et N. Sokolovska. 2024. Learning GAI-decomposable Utility Models for Multiattribute Decision Making. In *The 38th Annual AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2024)*. Consulté à l'adresse <https://hal.science/hal-04424705>
- [16] G. Owen. 1972. Multilinear extensions of games. *Management Science* 18, 5-part-2: 64-79.
- [17] E. Pohl et J. Geldermann. 2024. Selection of multi-criteria energy efficiency and emission abatement portfolios in container terminals. *European Journal of Operational Research* 316, 1: 386-395.
- [18] R. Tibshirani. 1996. Regression Shrinkage and Selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (methodological)* 58, 1: 267-88.
- [19] A. Tversky et D. Kahneman. 1981. The framing of decisions and the psychology of choice. *science* 211, 4481: 453-458.
- [20] J. von Neumann et O. Morgenstern. 1944. Theory of games and economic behavior.
- [21] L. Xiao. 2010. Dual Averaging Methods for Regularized Stochastic Learning and Online Optimization. *Journal of Machine Learning Research* 11: 2543-2596.

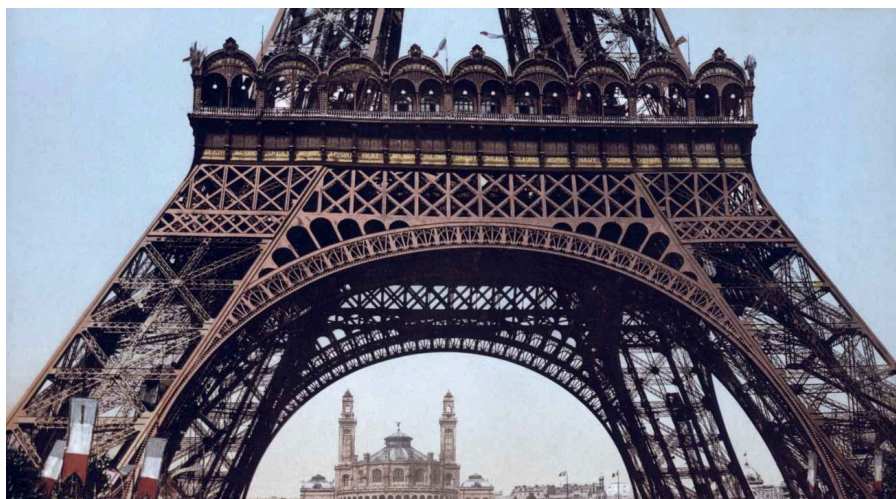
Le panthéon scientifique incomplet

Ou Matilda sur la tour Eiffel, contemplée d'en bas

Florence Sèdes

Depuis 1889, la tour Eiffel ne se contente pas d'être un symbole architectural : elle porte aussi, gravés en lettres d'or, les noms de 72 savants ayant marqué les sciences françaises. Parmi eux, des figures majeures comme Joseph-Louis Lagrange, Pierre-Simon de Laplace ou encore Antoine Lavoisier incarnent un véritable panthéon du savoir.

Mais un détail frappe aujourd'hui : aucune femme n'y figure.



La tour Eiffel (au fond, le palais du Trocadéro). Exposition universelle 1889 à Paris. Library of Congress.

Plus d'un siècle après son inauguration, cette absence surprend... choque. Est-elle le reflet d'une réalité historique ? d'un récit incomplet des sciences ?

Une absence révélatrice : le poids de l'histoire

Dès 1918, l'écrivain H. J. Mozans s'étonnait de l'absence de Sophie Germain, dont les travaux en théorie de l'élasticité sont pourtant essentiels. Son constat reste d'une actualité troublante : les femmes scientifiques ont existé à toutes les époques, dépendant des possibilités (ou impossibilités) légales ou culturelles d'exercer une fonction, de s'inscrire à l'université, de passer le baccalauréat ou un autre concours, mais leur contribution a souvent été minimisée... invisibilisée... voire spoliée pour n'être attribuée qu'à des hommes.

Ce phénomène est aujourd'hui bien documenté sous le nom d'*effet Matilda*. Ce concept fut inventé en 1993 par l'historienne des sciences américaine Margareth Rossiter en référence à Matilda Joslyn Gage (1826–1898), autrice américaine féministe qui avait analysé comment les hommes s'attribuaient les pensées de femmes intellectuelles... D'après Margareth Rossiter, ce phénomène est décuplé quand il s'agit de femmes scientifiques. L'effet Matilda fait écho à l'*effet Matthieu*, référence à une phrase de l'évangile selon saint Matthieu décrivant les mécanismes contribuant à ce que les plus nantis tendent à accroître leurs avantages sur les autres. De manière analogue, les scientifiques les plus reconnus bénéficient d'un crédit disproportionné par rapport à leurs collaborateurs moins réputés, et cette reconnaissance déséquilibrée aboutit à la concentration de ressources et de talents scientifiques.

Ce biais structurel dans la reconnaissance scientifique peut être illustré par de nombreux exemples. Le cas de la française Marthe Gautier est emblématique de ce phénomène. Elle identifia l'origine chromosomique de la trisomie 21 dès 1958, grâce à une technique de culture cellulaire à laquelle elle s'était formée durant un séjour aux États-Unis et qu'elle était la seule à maîtriser en France. Mais c'est son confrère Jérôme Lejeune qui s'en attribua la découverte et reçut les honneurs. Décédée en 2022, Marthe Gautier a témoigné jusqu'au bout de son amertume face à l'usurpation de sa découverte et à la spoliation qui s'ensuivit, jusqu'à la reconnaissance bien tardive en 2014.

Ces exemples ne relèvent pas d'exceptions : ils témoignent d'un biais profond dans la construction du récit scientifique.

Un enjeu toujours actuel

L'invisibilisation des femmes dans l'histoire des sciences n'est pas sans conséquence aujourd'hui. Privées de modèles, comment la majorité des jeunes filles pourraient-elles se projeter dans les carrières scientifiques et techniques ? En France, moins de 30 % des diplômés d'écoles d'ingénieurs sont des femmes, une

proportion qui stagne depuis plusieurs années. Collectivement, nous avons souvent alerté sur cette situation de déséquilibre de genre dans les STEM¹ en général, et les constats posés sont implacables et partagés.

Ce constat nous invite à nous interroger, non seulement sur les pratiques actuelles, mais aussi sur les symboles qui façonnent notre imaginaire collectif. Quels modèles donnons-nous à voir? Qui incarne la science dans l'espace public?

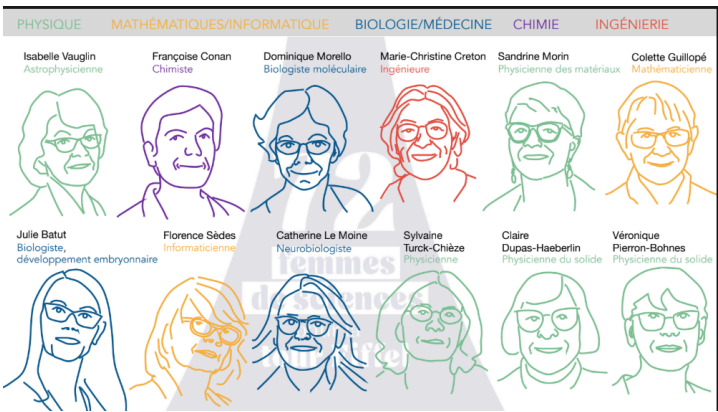
Un projet pour rééquilibrer la mémoire scientifique

C'est dans ce contexte que l'association *Femmes & sciences* — engagée depuis plus de vingt-cinq ans pour la promotion des femmes dans les sciences — a œuvré dans le but de faire inscrire 72 noms de femmes scientifiques sur la tour Eiffel, au-dessus de la frise existante.

Le projet, soutenu par la Ville de Paris, vise une égalité symbolique forte : autant de femmes que d'hommes, sur le même monument, dans une continuité historique assumée.

Le lundi 26 janvier 2026, Isabelle Vauglin a remis à la maire de Paris, Anne Hidalgo, au nom de l'association *Femmes & sciences*, la liste des 72 noms de femmes scientifiques destinés à être inscrits au premier étage de la tour Eiffel, au-dessus de ceux des 72 savants choisis par Gustave Eiffel.

La construction de cette liste est le résultat du travail d'un collectif de 12 femmes scientifiques (voir l'illustration ci-après).



Les membres du comité de sélection des 72 femmes scientifiques
© Véronique Pierron-Bohnes.

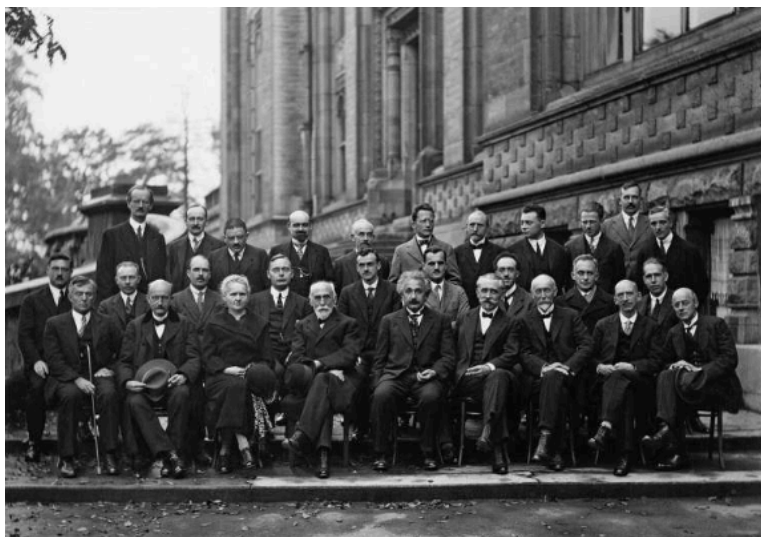
1. Science, technology, engineering, and mathematics.

Les douze expertes ayant établi la liste des 72 femmes scientifiques sont : Isabelle Vauglin, astrophysique; Françoise Conan, chimie; Claire Dupas-Haeberlin, physique du solide; Dominique Morello, biologie moléculaire; Julie Batut, biologie; Marie-Christine Creton, ingénierie; Colette Guillopé, mathématique; Catherine Le Moine, neurobiologie; Sandrine Morin, physique des matériaux; Véronique Pierron-Bohnes, physique du solide; Florence Sèdes, informatique; Sylvaine Turck-Chièze, physique.

Les 72 femmes choisies couvrent 6 domaines scientifiques : biologie & médecine, chimie, mathématiques & informatique, physique & astrophysique, sciences de la terre, sciences de l'ingénieur.

Ces 72 noms viendront compléter ceux des 72 savants inscrits par Gustave Eiffel (1832–1923) sur la tour construite pour l'exposition universelle de 1889. Magnifique symbole en cette année de l'ingénierie!

Eiffel avait voulu faire de ce monument un panthéon des sciences et de l'ingénierie, faisant rayonner au premier étage, en lettres d'or, les noms de 72 scientifiques ayant fait progresser l'état des sciences.



Le 5^e congrès Solvay, en 1927.

L'évolution est lente : quelques décennies plus tard, en 1927, à l'occasion du 5^e congrès Solvay, sur la célèbre photo des savants réunis (ci-dessus) — parmi lesquels figurent 17 prix Nobel — une seule femme est présente : Marie Curie, qui a déjà obtenu ses deux prix Nobel (en 1903 et 1911).

La place des femmes en sciences : oubliées, absentes ou invisibilisées, un problème toujours d'actualité ?

Les femmes scientifiques ont existé de tout temps et ont été essentielles à bien des avancées dans tous les domaines, sans pour autant être connues (ni même reconnues) pour leurs travaux. Cette invisibilisation des femmes scientifiques dans l'histoire contribue à ce que les jeunes filles, privées de modèles féminins, ne s'engagent pas dans les carrières scientifiques ou techniques. Le constat est là : les femmes diplômées d'un titre d'ingénieur sont encore très peu nombreuses, moins de 30 %, et ce chiffre stagne — régresse même — depuis quelques années.



Inscription des noms de savants scientifiques masculins au premier étage de la tour Eiffel. Photo @helenabl – licence pixabay.

Les critères de sélection

La sélection finale couvre près de trois siècles, du XVIII^e au XXI^e siècle, et met en lumière des pionnières ayant souvent évolué dans des contextes hostiles à leur reconnaissance.

Suivant les recommandations de la commission d'experts, ont été sollicités nombre d'organismes de recherche, d'institutions scientifiques et universitaires, d'associations « sœurs » et de sociétés savantes pour proposer dans leur domaine de compétence des noms de femmes scientifiques françaises ayant vécu entre 1789 et 2022. Au total, une liste de plus de 150 noms a été établie, témoignant (pour ceux qui pensaient qu'il serait impossible d'identifier 72 « savantes ») du nombre important de femmes scientifiques remarquables.

Le choix a été difficile, et dans un délai contraint de trois mois. Ont été appliqués, outre l'excellence scientifique, les critères suivants :

- donner la représentation la plus fidèle possible de l'apport des femmes à la science à travers les âges, couvrant une large période, presque 250 ans, depuis le début du XVIII^e, avec Angélique Du Coudray — la « sage-femme du roi Louis XV », obstétricienne avant la lettre, née en 1712 — jusqu'au

début du xx^{e} , avec des scientifiques célèbres décédées ces dernières années ; en sélectionnant une majorité de femmes nées entre 1850 et 1950, les pionnières dont la persévérance et les compétences ont ouvert la voie dans un monde alors essentiellement masculin et largement hostile à leur émancipation ont été mises en exergue ;

- montrer que les femmes ont contribué aux sciences dans toutes les disciplines scientifiques, regroupées en six domaines — biologie & médecine, chimie, mathématiques & informatique, physique & astrophysique, sciences de la terre, et sciences de l'ingénieur — en essayant, dans la mesure du possible, d'attribuer à chaque domaine un nombre équivalent de savantes ;
- prendre en compte les engagements des femmes non seulement en sciences mais aussi dans la société française — contribution à l'effort de guerre pendant les deux guerres mondiales, engagement dans la résistance, contribution remarquable à l'accès des filles aux sciences, à la féminisation des métiers industriels et à l'accès des femmes aux responsabilités scientifiques et citoyennes.

À ces trois principaux critères s'ajoute la reconnaissance de l'apport inestimable de quelques femmes étrangères.

L'informatique : une invisibilisation persistante

L'informatique, discipline pourtant récente, n'échappe pas à ces mécanismes d'invisibilisation. Des figures majeures y ont joué un rôle déterminant sans toujours bénéficier d'une reconnaissance à la hauteur de leurs contributions. Parmi elles, Alice Recoque, pionnière de l'architecture des ordinateurs en France, et Rose Dieng-Kuntz, dont les travaux ont ouvert la voie à des avancées majeures en intelligence artificielle.

« Nos » informaticiennes

Alice Recoque (1929–2021) s'est illustrée dans le domaine de l'architecture des ordinateurs, comme cheffe de projet pour la conception et l'industrialisation du mini-ordinateur² Mitra 15 dans le cadre du célèbre *Plan calcul*³ au début des années 1970. Elle a participé à la création de la CNIL⁴, au développement de l'intelligence artificielle, et a posé les bases de la réflexion sur la protection des données personnelles. Son rôle est toutefois resté longtemps minimisé, avec des tentatives d'effacement de sa page Wikipédia au motif qu'elle était trop peu consultée.

2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Mitra_15.

3. https://fr.wikipedia.org/wiki/Plan_Calcul.

4. https://fr.wikipedia.org/wiki/Commission_nationale_de_l%27informatique_et_des_libert%C3%A9s.



INGÉNIEURE INFORMATICIENNE

Alice Recoque

1929-2021

Informaticienne française du XX^e siècle, diplômée de l'ESPCI, spécialiste de l'architecture des ordinateurs, elle mène des recherches décisives sur la miniaturisation des machines (calculatrices « de bureau ») et sur la mise au point de mémoires « physiques » (mémoires à tores de ferrite), à partir de ses travaux sur les architectures massivement parallèles et les multiprocesseurs. Elle participe à la grande aventure

des constructeurs français, de la CII où elle est cheffe de projet du mythique Mitra 15, à Honeywell puis Bull, dont elle dirige la mission « Intelligence artificielle » dès 1985.

Membre du Comité national du CNRS, elle contribue en 1978 à la création de la CNIL* où, précurseuse, elle alerte déjà sur « le pouvoir de surveillance accru des entreprises et des États » et la nécessité de mettre en place des garde-fous. Le supercalculateur exascale français a été baptisé Alice Recoque en hommage à cette pionnière des sciences, des techniques et des enjeux sociétaux.



En raison de la misogynie ambiante et du manque de sources médiatiques ou en ligne consacrées à sa vie ou son œuvre, sa page Wikipedia a failli être effacée !

INGÉNIERIE

Fig. 1. Extrait de la page illustrant la biographie d'Alice Recoque dans le guide *72 femmes de sciences pour la tour Eiffel*⁵. © MKF éditions – Femmes & sciences.

5. Présentation de l'ouvrage et PDF téléchargeable : <https://www.femmesetsciences.fr/news/les-noms-des-72-femmes-pour-la-tour-eiffel-ont-%C3%A9t%C3%A9-1%C3%A9v%C3%A9l%C3%A9>.

Rose Dieng (1956–2008), née à Dakar, est devenue la première femme africaine à intégrer l'École polytechnique, puis à choisir la recherche en informatique, ouvrant par ses travaux pionniers la voie à l'intelligence artificielle.



INFORMATICIENNE

**Rose
Dieng**

1956-2008

Première femme africaine à intégrer l'École polytechnique, en 1976, elle est née dans un milieu modeste au Sénégal. Son diplôme d'ingénieure puis un doctorat en informatique en poche, elle découvre et se passionne pour l'Intelligence Artificielle chez Digital Equipment Corporation. Elle rejoint l'INRIA* en 1985. Elle est l'une des premières à comprendre l'importance du web comme

moyen privilégié de diffusion et de partage des connaissances. En 1999, au lancement de l'idée du « web sémantique », elle conduit son équipe parmi les pionniers des modèles et algorithmes intelligents, permettant cette évolution du web. Elle contribue ainsi à formaliser et automatiser l'extraction et le traitement de données pour faciliter leur échange entre les applications. Honorée par le prix Irène Joliot-Curie en 2005, elle décède prématurément en 2008.

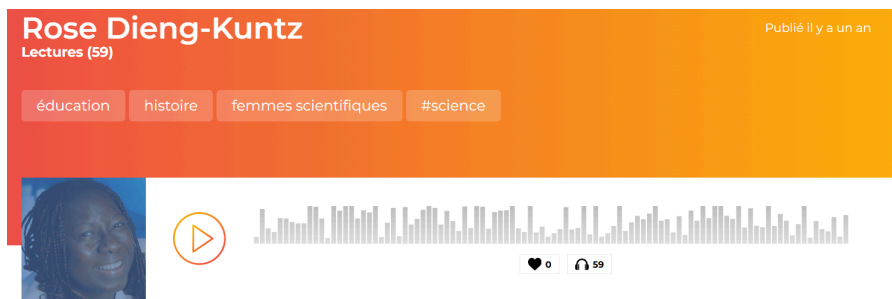


Le Web sémantique vise à lier et structurer les données du Web pour qu'elles soient comprises et réutilisées par les machines et les humains.

MATHÉMATIQUES/INFORMATIQUE

Fig. 2. Extrait de la page illustrant la biographie de Rose Dieng dans le guide *72 femmes de sciences pour la tour Eiffel* © MKF éditions – Femmes & sciences.

Les Femmes & Sciences toulousaines mettent à disposition un podcast qui reprend les portraits constituant le parcours des déambulations sur le campus sciences de l'université de Toulouse, parmi lesquels celui de Rose Dieng. L'ensemble de ces blogs audio est accessible à cette URL⁵.



Rose Dieng-Kuntz, née le 27 mars 1956 à Dakar et morte le 30 juin 2008 à Nice, est une scientifique sénégalaise spécialiste en intelligence artificielle. En 1976, elle est la première femme d'Afrique noire à intégrer l'École polytechnique en France.

Capture écran du blog audio avec la vidéo sur Rose Dieng.
Conception et enregistrement de la vidéo : F. Sèdes.

La présence de ces portraits dans cette liste revêt une importance particulière pour notre communauté. Elle rappelle que l'histoire de l'informatique, souvent perçue comme masculine, est en réalité bien plus variée comme en témoigne le premier doctorat en informatique décerné à feu notre collègue Marion Créhange en 1961.

À l'heure où les systèmes numériques et l'intelligence artificielle occupent une place centrale dans nos sociétés, cette question dépasse le simple cadre historique. Les biais de représentation dans les sciences peuvent se prolonger jusque dans les technologies elles-mêmes, influençant les données, les algorithmes et les usages.

Réécrire ou compléter l'histoire ?

L'inscription de ces 72 femmes sur la tour Eiffel ne consiste pas à effacer le passé, mais à le compléter. Elle propose une lecture plus fidèle de l'histoire des sciences, en intégrant celles qui en ont été longtemps exclues. Ce geste est à la fois symbolique et politique. Il pose la question de notre rapport au patrimoine scientifique et soulève une question essentielle : qui mérite d'être visible ?

6. <https://audioblog.arteradio.com/blog/242695/femmes-and-sciences>.

Un symbole pour les générations futures

Une fois le projet abouti, la tour Eiffel deviendra un lieu unique au monde : un monument où femmes et hommes scientifiques seront représentés à égalité, dans un dialogue à travers le temps.

Au-delà de sa portée patrimoniale, cette initiative pourrait jouer un rôle déterminant dans la construction de nouvelles vocations. Donner à voir des figures féminines de la science, c'est élargir le champ des possibles.

Plus d'un siècle après son inauguration, la tour Eiffel pourrait ainsi continuer à incarner le progrès — non seulement technique, mais aussi social.

Corriger l'invisibilité des femmes dans les sciences ne relève pas seulement de la justice historique : c'est une condition pour construire une science plus ouverte, plus représentative et plus inclusive... et par dessus tout, une science qui montre qu'elle ne se prive pas des compétences de la moitié du genre humain.

En inscrivant ces 72 noms dans le paysage parisien, c'est toute une mémoire scientifique qui s'enrichit — et, peut-être, toute une génération qui se projette autrement dans l'avenir.

Comités de sélection¹ : combien d'invitations accepter ?

Anne-Cécile Orgerie²

Université de Rennes, Inria, CNRS, IRISA

Camille Maumet²

Université de Rennes, Inria, CNRS, INSERM

Si vous culpabilisez d'avoir dit non à la n -ième sollicitation de l'année pour faire partie d'un comité de sélection parce que vous estimiez faire «votre part» avec $n-1$ réponses positives, cet article est pour vous. Si vous ne savez pas comment déterminer un nombre maximal raisonnable de réponses positives à ces sollicitations ou si vous sentez que la pression monte pour que vous acceptiez cette n -ième sollicitation, cet article est aussi pour vous. Si vous vous demandez combien de comités chacun et chacune devrait faire si les sollicitations étaient équiréparties dans chaque groupe (femmes, hommes, rang A, rang B) en informatique, c'est ce que nous évaluons ici.

Cet article détaille nos calculs d'une situation où les sollicitations seraient équitablement réparties en tenant compte des contraintes de composition des jurys en matière de parité (femme, homme) et en matière d'appartenance à un corps (rang A, rang B).

Dans un scénario où la charge serait équirépartie, les femmes de rang A seraient sollicitées pour participer à trois jurys tous les deux ans et le reste des chercheurs, chercheuses, enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs moins d'une fois par an.

1. Article initialement publié en juin 2022 sur le site de la commission égalité femmes-hommes de l'IRISA / Inria Rennes [19], révisé en février 2026.

2. Avec l'aide de la commission égalité femmes hommes de l'IRISA / Inria Rennes.

Depuis 2015, chaque comité de sélection doit être composé d'au moins 40 % de femmes [13]. Cette règle, fixée par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, a été mise en oeuvre dans le but de combler le déficit en recrutement et la promotion de femmes scientifiques : 46,9 % de doctorantes, 45 % de femmes chargées de recherche (CR), maîtresses de conférences (MCF) et assimilées, 31 % de femmes directrices de recherche (DR), professeures des universités (PU) et assimilées (source : année 2022 sur tout l'enseignement supérieur et recherche [18]). L'idée ici n'est pas de discuter du bien-fondé de cette mesure, mais de quantifier la charge de travail dans l'hypothèse (idéaliste) d'une équirépartition des sollicitations dans le domaine de l'informatique.

En introduction

Le pourcentage minimum de 40 % a été mis en place en tenant compte du nombre de femmes présentes dans les communautés scientifiques. Dans les disciplines où le nombre de femmes est très limité, le ministère a proposé des quotas plus faibles afin de ne pas créer un effet de surcharge. Cependant, au sein de notre laboratoire, certaines chercheuses et enseignantes-chercheuses sont très régulièrement sollicitées pour participer à ces comités de sélection. Parfois, ces invitations sont accompagnées de justifications peu engageantes ou même d'une certaine pression pour accepter, en lien avec cette règle des 40 %.

Participer à un jury ou un comité de sélection est une charge de travail non négligeable (lecture des dossiers, rédaction des rapports, sélection pour les auditions, auditions, délibérations) et il semblerait que les sollicitations pour participer à des comités de sélection ne soient pas réparties équitablement sur l'ensemble des chercheurs, chercheuses, enseignantes-chercheuses et enseignant-chercheurs [1].

Dans cet article, nous proposons donc une estimation du nombre moyen de participations à des comités de sélection (COS) par an et par chercheur et chercheuse nécessaire pour respecter la règle des 40 % si ces sollicitations étaient équitablement réparties. Nous avons choisi de nous limiter au périmètre (informatique) des CNU 27, Inria et du CNRS Sciences informatiques (INS2I) qui est approximativement celui de notre laboratoire de recherche, l'IRISA, pour les effectifs des personnes concernées par ces comités. Nous considérons les comités de sélection de la CNU 27 et les concours Inria, mais pas les concours CNRS (INS2I) qui ont un fonctionnement différent pour la sélection des personnes constituant les comités.

Nous proposons ces chiffres comme des indicateurs qui, nous l'espérons, pourront être utiles pour informer les choix de chacun et chacune en réponse à une invitation pour participer à un comité de sélection. En pratique, le

choix revient bien entendu aux personnes invitées qui pourront adapter cette moyenne à la hausse ou à la baisse en fonction de leurs contraintes personnelles et de leurs responsabilités par exemple.

Effectifs en section CNU 27, chez Inria et à l’INS2I

Personnels rang B (MCF et CR)

En 2023, 735 femmes et 2 237 hommes étaient MCF en France en section 27 (CNU) ou CR chez Inria ou à l’INS2I (CNRS) comme indiqué dans la table 1.

Catégories	MCF section CNU 27	CR Inria	CR CNRS	Total (MCF et CR)
Femmes	583 (26,1%)	82 (19,6%)	70 (21,9%)	735 (24,7%)
Hommes	1 650	337	250	2 237
Sources	[17] page 3	[12] page 38 (2.4.2.1)	[2] page 55	Année 2023

Table 1. Répartition des personnels de rang B.

Personnels rang A (PR et DR)

En 2023, 346 femmes et 1 350 hommes étaient PR en section 27 ou DR chez Inria ou à l’INS2I (CNRS) comme indiqué dans la table 2.

Catégories	PR section CNU 27	DR Inria	DR CNRS	Total (PR et DR)
Femmes	220 (20,2%)	61 (18,7%)	65 (23,3%)	346(20,4%)
Hommes	870	266	214	1 350
Sources	[17] page 3	[12] page 38 (2.4.2.1)	[2] page 55	Année 2023

Table 2. Répartition des personnels de rang A.

Nombre de comités de sélection pour la section CNU 27 et Inria

Postes de rang B (MCF et CR)

En 2022, 105 comités de sélection pour des postes de rang B ont été constitués (section CNU 27 et Inria) répartis comme indiqué dans la table 3.

Catégories	MCF section 27	CR Inria	Total
Jurys	96 postes	9 jurys	105
Sources	[6]	[10]	Année 2022

Table 3. Répartition des postes de rang B.

Postes de rang A (PR et DR)

En 2022, 51 comités pour des postes de rang A ont été constitués (section CNU 27 et Inria) répartis comme indiqué dans la table 4.

Catégories	PR section 27	DR Inria	Total
Jurys	50 postes	1 jury national	51
Sources	[5]	[11]	Année 2022

Table 4. Répartition des postes de rang A.

Composition des comités de sélection (et hypothèses de calcul)

Comités de sélection MCF et PR en section CNU 27

En pratique, la taille des comités de sélection MCF semble varier de 8 à 20 membres (précédemment 16 membres) [2]. Nous considérons ici un cas moyen de 12 membres par comité.

Légalement, il faut au moins 40 % de femmes et 40 % d'hommes [13] soit 5 femmes par comité au minimum. Légalement encore, il faut la moitié de membres de rang A et la moitié de membres de rang B tous genres confondus [14].

Considérant qu'il y a moins de femmes de rang A que de femmes de rang B (respectivement 346 et 735), nous supposons dans la suite que chaque comité de sélection MCF est composé de 3 femmes de rang B et 2 femmes de rang A.

Cette hypothèse doit être compensée par des hommes de rang A pour atteindre la parité entre rangs A et rangs B. Ainsi, nous supposons que chaque comité de sélection MCF est composé de 3 hommes de rang B et 4 hommes de rang A.

Pour les comités de sélection PR, il faut également au moins 40 % de femmes et 40 % d'hommes [13], tous les membres étant de rang A. Nous supposons également une taille moyenne de 12 membres par comité, soit 5 femmes de rang A et 7 hommes de rang A par comité de sélection PR.

Jurys CR et DR Inria

Les jurys de recrutement CR Inria comportent 15 membres chacun.

Nous n'avons pas trouvé de condition légale sur une parité entre membres de rangs A et B pour chaque jury CR. Nous supposons dans la suite, comme pour les comités de sélection MCF, qu'il y a environ 50 % de personnes de rang A dans chaque jury.

Comme pour les comités de sélection [13], il faut légalement au moins 40 % de femmes et 40 % d'hommes par jury, soit 6 femmes par jury minimum.

En cohérence avec l'hypothèse précédente sur la constitution des comités de sélection MCF, nous supposons qu'environ 40 % de ces femmes sont de rang A soit : 4 femmes de rang B et 2 femmes de rang A par jury CR Inria.

De même que pour les comités de sélection MCF, en suivant l'hypothèse d'une parité entre rangs A et B, le nombre d'hommes de rang A par jury doit compenser celui du nombre de femmes de rang A, soit 3 hommes de rang B et 6 hommes de rang A par jury CR Inria.

Pour le jury DR Inria, il s'agit d'un unique jury national. En 2022, ce jury comportait 36 membres [11], tous les membres étant de rang A.

Il faut légalement au moins 40 % de femmes et 40 % d'hommes par jury [13], soit 15 femmes de rang A et 21 hommes de rang A pour le jury DR Inria.

Autres hypothèses de calcul

Pour simplifier les calculs, nous avons supposé que chaque poste MCF et PR disposait d'un jury propre. Il peut arriver par exemple qu'un unique jury soit constitué pour deux postes MCF dans le même établissement avec des profils d'enseignement et de recherche similaires. Ce cas semble néanmoins rare.

Nous avons considéré uniquement la section CNU 27 (Informatique) et les postes MCF et PR publiés avec pour section principale la section 27. Des collègues de notre laboratoire sont également sollicités pour participer à des comités de sélection de la section CNU 61 (Génie informatique, automatique et traitement du signal).

Nous n'avons pas pris en compte dans nos calculs les concours CNRS de l'INS2I qui ont un fonctionnement différent. En effet, les jurys de recrutement CR et DR CNRS sont nationaux et constitués de membres des sections du comité national du CNRS (principalement les sections 02 et 03 pour l'INS2I), ces sections ayant des mandats de 5 ans. Compte tenu du travail conséquent effectué par les sections CNRS, nous espérons que leurs membres ne sont pas sollicités pour participer à des comités de sélection, cela n'est cependant pas exclu et nous n'avons donc pas exclu ces membres de nos calculs.

Nous n'avons pas pris en compte dans nos calculs les comités de sélection et les personnels des écoles d'ingénieurs ne relevant pas de la section CNU 27 car nous n'avons pas trouvé de données nationales fiables pour le faire. Il s'agit notamment des écoles de l'institut Mines-Télécom et de l'ISAE-Supaéro. De même, les personnels d'autres établissements publics (CEA, ADEME, CNES) peuvent faire partie de comités de sélection [17], mais ils n'ont pas été comptabilisés car nous n'avons pas accès au nombre de personne relevant de la discipline informatique dans ces établissements.

Notons également que de nombreux autres comités de sélection (ingénieures ou PRAG par exemple) nécessitent la présence de MCF, CR, PR et DR et sont régis par des règles de composition similaires (parité notamment). De même, de nombreuses autres évaluations (comité HCERES par exemple) s'ajoutent à cela en obéissant à des règles similaires.

Nous n'avons pas pris en compte dans nos calculs les temps partiels et congés longue durée (dont congés maternités) car nous ne disposons pas de chiffres nationaux à ce propos.

Par manque de données, nos calculs exploitent les données de plusieurs années : les effectifs de 2023 (section CNU 27, Inria et CNRS) et les postes publiés en 2022 (section CNU 27 et Inria). Les évolutions, tant sur le nombre de postes que sur les effectifs, nous semblent suffisamment lentes pour que cela n'affecte que marginalement les résultats.

Résultats

En 2022, au total 156 comités de sélection ont été constitués (MCF et PR CNU 27 et CR et DR Inria). La composition des jurys retenue pour les calculs suivant les hypothèses détaillées précédemment est résumée dans la table 5.

Comité	MCF section CNU 27	CR Inria	PR section CNU 27	DR Inria
Nombre de comités	96	9	50	1
Nombre de membres par comité	12	15	12	36
Femmes de rang B par comité	3	4	0	0
Femmes de rang A par comité	2	2	5	15
Hommes de rang B par comité	3	3	0	0
Hommes de rang A par comité	4	6	7	21

Table 5. Hypothèses de calcul pour les comités.

Ainsi, d’après les hypothèses détaillées dans la table 5, pour constituer l’ensemble de ces comités, il est nécessaire de trouver les effectifs résumés dans la table 6.

Catégorie	Femme rang B	Femme rang A	Homme rang B	Homme rang A
Membres nécessaires par année pour les comités	324	473	315	807
Nombre de personnes pouvant participer aux comités	735	346	2 237	1 350
Nombre moyen de comités par personne	0,44	1,37	0,14	0,60

Table 6. Effectifs participants aux comités de sélection.

Cela donne un nombre moyen de jury par an et par personne d’environ :

- pour une femme de rang B (MCF ou CR) : 0,44 jurys par an ;
- pour une femme de rang A (PR ou DR) : 1,37 jury par an ;
- pour un homme de rang B (MCF ou CR) : 0,14 jurys par an ;
- pour un homme de rang A (PR ou DR) : 0,60 jurys par an.

En conclusion

Il est à noter que ces calculs indiquent que, dans tous les cas, le nombre moyen de comités est inférieur à 2 par personne et par an. Pour la plupart des catégories (sauf femmes de rang A), le nombre moyen de comités est nettement inférieur à 1 par personne et par an. Nous espérons que ces calculs seront utiles aux personnes fortement invitées à participer à des comités de sélection. Ils peuvent notamment servir à se fixer des limites personnelles en nombre de réponses positives à des sollicitations (beaucoup d’autres éléments non détaillés ici pouvant également entrer en considération).

En suivant les règles légales et les hypothèses énoncées précédemment, ces résultats montrent que les femmes sont en moyenne sollicitées 2 à 3 fois plus que les hommes. Néanmoins, pour les femmes de rang B, le nombre moyen de jury par an est largement inférieur à 1. Une meilleure répartition est donc possible pour éviter les sursollicitations de quelques unes et quelques uns, sursollicitations qui ont des effets négatifs en termes de charge de travail, mais également peuvent avoir des effets sur la surreprésentation de l’avis d’un petit nombre de personnes sur des recrutements de fonctionnaires à l’échelle nationale. Une meilleure répartition permettrait également aux

personnes rarement, voire jamais, sollicitées de participer plus fréquemment à des comités de sélection.

Auparavant, il était interdit d'*appartenir simultanément à des comités de sélection en activité dans plus de trois établissements* [16]. Cette interdiction a disparu, mais pourrait servir d'indicateur personnel pour fixer une limite maximale annuelle.

En suivant les règles légales et les hypothèses énoncées précédemment, ces résultats montrent également que les personnes de rang A sont en moyenne sollicitées 4 à 5 fois plus que les personnes de rang B. Cela s'explique par la règle de parité rangs A et B en vigueur dans les comités de sélection MCF et le fait que seules les personnes de rang A peuvent être membres des comités de sélection PR et DR. Cela engendre mécaniquement une surcharge pour les femmes de rang A, seule catégorie dont le nombre moyen de comités est (très nettement) supérieur à 1 par personne et par an.

Il convient de rappeler que les chiffres présentés ici reposent sur plusieurs hypothèses détaillées plus haut, tant sur le périmètre de ces calculs que sur les calculs en eux-mêmes. Il serait notamment très intéressant de disposer de chiffres sur d'autres périmètres (par exemple pour les sections CNU 26 et 61) et d'autres disciplines.

Version originale en juin 2022

En juin 2022, nous avons réalisé une première version des chiffres précédents. Les effectifs ont été calculés sur l'année 2019 et les postes sur l'année 2021 (ci-avant : effectifs sur 2023 et postes sur 2022).

La table 7 présente les effectifs des personnels de rangs B et A en section CNU 27, chez Inria et à l'INS2I en 2019.

Catégories	Section CNU 27	Inria	INS2I (CNRS)	Total
Personnels de rang B (MCF et CR)				
Femmes	622 (26,1%)	66 (19,6%)	76 (22,1%)	764 (24,9%)
Hommes	1 763	270	268	2 301
Personnels de rang A (PR et DR)				
Femmes	192 (19,6%)	47 (16,7%)	58 (22,1%)	297 (19,5%)
Hommes	790	235	204	1 229
Sources	[15] page 3	[6] page 34	[3] page 55	Année 2019

Table 7. Répartition des personnels.

La table 8 présente le nombre de comités de sélection pour les postes de rangs B et A pour la section CNU 27 et chez Inria en 2021.

Catégories	Section CNU 27	Inria	Total
Postes de rang B (MCF et CR)			
Jurys	86 postes	9 jurys (1 par centre)	95 comités de sélection
Postes de rang A (PR et DR)			
Jurys	43 postes	1 jury national	44 comités de sélection
Sources	[5]	[9,8]	Année 2021

Table 8. Répartition des postes pour l'année 2022.

La page *Galaxie* indiquant le nombre de postes pour 2019 a été actualisée et les chiffres originaux de 2019 ne sont malheureusement plus accessibles.

La table 9 reprend les hypothèses de calcul pour les comités.

Comité	MCF CNU 27	CR Inria	PR CNU 27	DR Inria
Nombre de comités	86	9	43	1
Nombre de membres par comité	12	15	12	32
Femmes de rang B par comité	3	4	0	0
Femmes de rang A par comité	2	2	5	13
Hommes de rang B par comité	3	3	0	0
Hommes de rang A par comité	4	6	7	19

Table 9. Hypothèses de calcul pour les comités.

Enfin, la table 10 compile les effectifs nécessaires pour constituer les comités ainsi que le nombre moyen de comité par catégorie de personnel.

Catégorie	Femme rang B	Femme rang A	Homme rang B	Homme rang A
Membres nécessaires par année pour les comités	294	418	285	718
Nombre de personnes pouvant participer aux comités	764	297	2 301	1229
Nombre moyen de comités par personne	0,38	1,41	0,12	0,58

Table 10. Effectifs participants aux comités de sélection.

Cela donne un nombre moyen de jury par an et par personne d'environ :

- pour une femme de rang B (MCF ou CR) : 0,38 jurys par an ;
- pour une femme de rang A (PR ou DR) : 1,41 jurys par an ;
- pour un homme de rang B (MCF ou CR) : 0,12 jurys par an ;
- pour un homme de rang A (PR ou DR) : 0,58 jurys par an.

Ces chiffres sont très similaires à ceux calculés plus récemment, illustrant une très faible évolution de ces tendances sur les dernières années.

Remerciements

Les autrices remercient la commission parité de l'IRISA-Inria Rennes et (par ordre alphabétique) Aurélie Bugeau, Emmanuelle Frenoux, Anne-Laure Ligozat, Clémentine Maurice et Adeline Roux-Langlois pour leurs relectures attentives et les discussions constructives qui ont enrichi cet article.

Références

- [1] Laurence Broze. octobre 2016. Recrutements en mathématiques : premier bilan de la réforme des comités de sélection. *La Gazette de la Société Mathématique de France* 150. https://femmes-et-maths.fr/wp-content/uploads/2020/02/smf_gazette_150_48-56.pdf.
- [2] Bulletin officiel. 2015. Dispositions statutaires communes applicables aux enseignants-chercheurs et portant statut particulier du corps des professeurs des universités et du corps des maîtres de conférences. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/bo/15/Hebdo20/MENH1509914C.htm>.
- [3] CNRS. Mai 2020. Bilan social et parité 2019. https://carrieres.cnrs.fr/wp-content/uploads/2023/05/CNRS-BSP_2019-VF.pdf.
- [4] CNRS. Janvier 2025. Rapport social unique 2023. https://carrieres.cnrs.fr/wp-content/uploads/2025/01/CNRS_Rapport2023_WEB_SignetsTableaux.pdf.
- [5] Galaxie. 2021. Postes MCF section 27 (accès en 2021). <https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/ListesPostesPublies/ListePostePublies-Annuelle.xls>.
- [6] Galaxie. Décembre 2022. Archive de la liste des postes publiés par Galaxie. <https://web.archive.org/web/20221220114531/https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/ListesPostesPublies/ListePostePubliesAnnuelle.xls>.
- [7] Inria. Août 2020. Bilan social 2019. <https://www.inria.fr/sites/default/files/2020-08/Bilan%20social%202019%20-%2020200629.pdf>.
- [8] Inria. Mars 2021. Décision n°2021/057 Composition du jury d'admissibilité DR2. https://www.inria.fr/sites/default/files/2021-03/DR2_composition_jury_admissiblite.pdf.

- [9] Inria. Mai 2021. Composition des jurys d'admission CRCN. <https://www.inria.fr/sites/default/files/2021-06/Compositionn%20des%20jurys%20d%27admission%20CRCN.pdf>.
- [10] Inria. Février 2022. Composition des jurys d'admissibilité CRCN. https://www.inria.fr/sites/default/files/2022-02/Compositions%20_jurys_admissiblite_CRCN_ISFP.pdf.
- [11] Inria. février 2022. Composition des jurys d'admissibilité DR2. https://www.inria.fr/sites/default/files/2022-02/DR2_composition_jury_admissiblite.pdf.
- [12] Inria. Août 2025. Rapport social unique 2023. <https://www.inria.fr/sites/default/files/2025-08/Rapport%20Social%20Unique%202023.pdf>.
- [13] Legifrance. Décret n° 2022-822 du 16 mai 2022 fixant des dispositions dérogatoires à la proportion minimale de quarante pour cent de chaque sexe dans la composition des comités de sélection institués en vue des concours de recrutement des professeurs des universités relevant du ministre chargé de l'enseignement supérieur. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000045804191/2022-05-18>.
- [14] Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Avril 2019. Guide de fonctionnement du comité de sélection de l'enseignement supérieur prévu par l'article L. 952-6-1 du code de l'éducation et par les articles 9 à 9-2 du décret n°84-431 du 6 juin 1984. https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/comite_selection/guideCOMSEC2019.pdf.
- [15] Ministères éducation, jeunesse, sports, enseignement supérieur et recherche. août 2020. Fiches démographiques des sections du CNU - Année 2019. https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/content_migration/document/27_1316295.pdf.
- [16] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Juin 2012. Guide de fonctionnement du comité de sélection de l'enseignement supérieur prévu par l'article L.952-6-1 du code de l'éducation et par les articles 9 à 9-2 du décret n°84-431 du 6 juin 1984. https://www.galaxie.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ensup/pdf/comite_selection/guide_fonctionnement_comites_selection.pdf.
- [17] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Septembre 2024. Fiches démographiques des sections du CNU — Année 2023 — Section 27 — Informatique. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2024-10/section-27---informatique---2023-34856.pdf>.
- [18] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Mai 2025. L'état de l'emploi scientifique en France — édition 2025. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2025-05/l-tat-de-l-emploi-scientifique-en-france---rapport-2025-36858.pdf> (pages 33 et 65).
- [19] Anne-Cécile Orgerie, Camille Maumet. 2022. Comités de sélection : combien d'invitations accepter? (accès en novembre 2025). <https://egalite-fh.iris.fr/presentation-recommandations/comites-de-selection-combien-dinvitations-accepter/>.

L'association Enseignement public et informatique (EPI)

Plus d'un demi-siècle de militantisme

Georges-Louis Baron, Jacques Baudé

Alain Kapur, Jacques Lucy

Anciens administrateurs de l'EPI

Cet article collectif a été rédigé par un groupe d'anciens responsables de l'association EPI, dissoute en juin 2025. L'EPI a été pendant plus d'un demi-siècle un exemple d'organisation militante associant des chercheurs et des enseignants de toutes disciplines et de tous niveaux scolaires et universitaires. L'association a très significativement contribué à renforcer l'initiative enseignante face au développement d'une innovation (l'informatique) perçue lors de ses premiers développements à la fois comme prometteuse mais aussi comme potentiellement disruptive. L'action de l'association a notamment permis, avec d'autres, de hâter la création d'une discipline de second degré.

Après 54 ans d'activité de l'EPI au service de l'informatique dans l'enseignement public, l'assemblée générale, réunie le 14 juin 2025, a décidé, après un large débat, de dissoudre l'association, la raison principale en étant le manque de militants susceptibles de prendre le relais, dans les activités de l'association et dans son pilotage. Cela sur fond d'incertitude sur la politique informatique et numérique du ministère de l'Éducation nationale. Au fil des années, les périodes d'enthousiasme n'ont cessé d'alterner avec les déceptions.

Une fondation précoce de l'EPI

En mars 1970 a lieu, à Sèvres, le séminaire du Centre d'études et de recherches pour l'innovation dans l'enseignement (CERI-OCDE) pour l'enseignement de l'informatique à l'école secondaire [11]. Il est évident pour tous les participants qu'une action importante doit être entreprise dans le domaine de la formation des enseignants à l'informatique. Il s'en suivra, pour la France, les premiers stages « lourds » d'un millier d'enseignants chez les trois constructeurs (IBM, CII, et Honeywell-Bull). Dès leurs premières réunions d'ensemble, les stagiaires ressentent la nécessité d'une structure spécifique d'accueil, d'échange d'informations, de réflexion, qui permette, en toute occasion, leur expression collective indépendante. C'est ainsi qu'est créée, par les stagiaires 1970-1971, l'association « Enseignement public et informatique » (EPI). Son premier président est Marcel Massard.

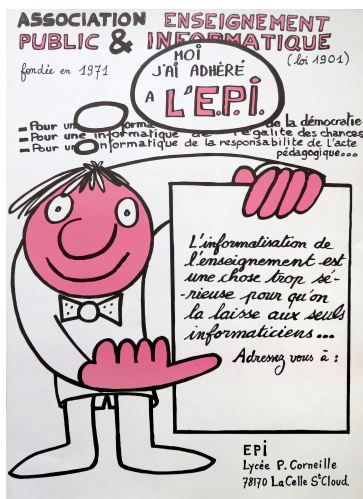
L'association est déclarée¹ à la préfecture de Paris le 1^{er} février 1971 et constituée lors de l'assemblée générale du 10 juin. Son premier siège est au 110 rue de Grenelle Paris 7^e; il est ensuite transféré au 29 rue d'Ulm, puis dans les locaux successifs de l'EPI [30] — lycée de La Celle Saint Cloud, 13 rue du Jura Paris 13, ... Dès le premier éditorial du bulletin de l'EPI [21] (décembre 1971) se manifeste le souci de complémentarité des approches qui sera le fil d'Ariane de l'EPI tout au long de ces 54 années :

... Notre attitude doit rester accueillante à l'égard des diverses expériences pédagogiques. L'introduction de l'informatique se présente actuellement, semble-t-il, sous trois aspects :

- comme l'enseignement d'une matière nouvelle (sections et établissements spécialisés, cours pour volontaires, enseignement intensif de quelques jours pour tous les élèves d'un même niveau) ;*
- comme l'enseignement d'une méthode de pensée à l'intérieur des matières existantes, chaque professeur retrouvant dans sa discipline les notions fondamentales de modèle, d'algorithme, d'information ;*
- comme l'utilisation d'un moyen nouveau, comparable à ce que fut le premier livre imprimé, aidant le professeur dans la partie répétitive de son travail.*

Si la politique du ministère consiste à favoriser la deuxième solution, et malgré l'intérêt d'un tel choix qui facilite les rapports entre les différentes spécialités, nous pensons que nous devons nous intéresser à ces trois types d'expériences. L'avenir nous dira quelle est la voie la plus sûre. Mais peut-être s'agit-il de trois aspects complémentaires qui devraient coexister. En tout cas, nous ne pouvons ni ne devons choisir dès maintenant...

1. Journal officiel du 12 février 1971.



L'EPI est très impliquée dans la recherche pédagogique pour ce qui concerne l'utilisation pertinente des « technologies nouvelles » dans l'enseignement. Nombre de ses adhérents sont engagés dans des actions de l'Institut national de recherche pédagogique (INRP) et l'association participe à des actions communes (coéditions...)



Se manifeste également la volonté de peser sur le déploiement de l'informatique dans le système éducatif et d'être de toutes les concertations (voir ci-contre l'affiche créée par André Poly) : *« Membres de l'enseignement public, nous ne devons pas nous laisser déposséder de nos responsabilités. C'est à nous qu'il appartient de dire comment nous utiliserons et comment nous n'utiliserons pas l'informatique. »*

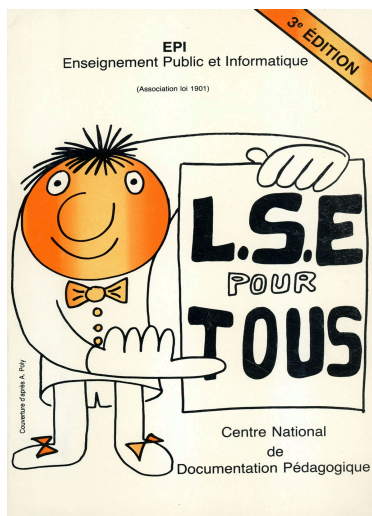
De 1972 à 1976, les adhérents de l'EPI joueront un rôle très actif dans l'expérience des « 58 lycées », [7]. L'EPI se développe par des campagnes d'adhésion notamment dans les centres de formation et dans les établissements équipés — collèges, lycées, universités...

L'expérimentation au lycée de la Celle-Saint-Cloud d'une option informatique, [17], ne sera pas généralisée dans la décennie 1970. Néanmoins, l'initiation des élèves à l'informatique est encouragée par l'EPI dont les adhérents animent des clubs informatiques nombreux et actifs.

Un nombre non négligeable d'élèves a réalisé, dans le cadre de ces clubs, des travaux remarquables comme en témoigne le concours de programmes AFCET-EPI. Les 103 dossiers retenus (émanant de collégiens mais surtout de lycéens) correspondaient à des travaux réalisés pour la grande majorité dans l'ambiance intellectuelle des clubs informatiques en liaison avec les différentes disciplines [15].

L'EPI fait très tôt la promotion du système LSE qui assure une compatibilité et une portabilité bien supérieures à ce que permettrait toute autre combinaison [9]. (Le premier

manuel LSE est un numéro spécial du Bulletin de liaison de l'INRP — celui d'avril 1973, réédité et complété en janvier 1975 — avant le numéro spécial EPI en 1981 et plusieurs coéditions EPI-CNDP)



Pour ce qui concerne les matériels [20], l'EPI accueille avec enthousiasme l'équipement des lycées en mini-ordinateurs Mitra15 et T1600. Parmi ses multiples interventions, elle plaide pour que l'implantation des matériels se fasse en fonction des équipes d'enseignants formés, ayant des projets pédagogiques. Mais après avoir prévu d'équiper un tiers des lycées (400), l'opération est arrêtée — soit disant pour évaluer — après en avoir équipé 58. Alors que les intentions initiales sont très claires et précises et qu'il n'y a rien de comparable ailleurs. Il faut dire que le premier choc pétrolier est là et que les micro-ordinateurs commencent à arriver.

Une grande activité après 1980

L'informatique, un défi à relever pour le système scolaire

Au cours de l'année scolaire 1979-1980, Jacques Arzac propose au directeur des lycées et collèges, Jean Saurel, une expérimentation dans quelques lycées de la région parisienne d'un enseignement optionnel de l'informatique. L'EPI suit les choses de près et rencontre le directeur des lycées. Un débat s'instaure dans l'association. Faut-il ou non une discipline d'enseignement général en informatique? Beaucoup le souhaitent. Discipline optionnelle ou pas?

En 1979 paraît le premier manifeste de l'EPI «*Pour étendre et diversifier l'introduction de l'informatique dans l'enseignement*» (extrait) :

Nul ne peut ignorer l'informatique dans le monde moderne. Elle nous concerne tous comme travailleurs, comme consommateurs, comme citoyens, et elle nous concerne d'autant plus qu'elle a des implications, non seulement dans le domaine matériel, mais aussi dans celui de la pensée et de la communication. En tant qu'outil pédagogique, elle peut s'appliquer à tous les niveaux d'enseignement. Mais elle ne doit pas se limiter à cela. Elle doit aussi devenir un élément de culture générale dont tous les élèves puissent bénéficier [...]

Le 25 novembre 1980 a lieu le colloque «*Le mariage du siècle : éducation et informatique*» sous la présidence effective du ministre de l'Éducation, Christian Beullac, et du ministre de l'Industrie, André Giraud. L'EPI est naturellement présente [13]. Le ministère par la voix de Jacques Treffel se prononce pour une complémentarité des approches (page 32 des actes de ce colloque) :

Nous continuerons dans la voie qui a été ouverte depuis 1970, par l'utilisation de l'informatique comme outil pédagogique dans les disciplines ; mais en même temps, à partir de la rentrée 1981-1982, nous allons faire un certain nombre d'expériences dans les lycées sous la forme d'enseignement optionnel, et peut-être dans les collèges, en ce qui concerne l'enseignement de l'informatique. Nous ouvrons 10 ou 15 expériences pour essayer d'y voir clair.

En 1981, aussitôt après l'élection de François Mitterrand, l'EPI demande audience au nouveau ministre de l'Éducation nationale Alain Savary et, à l'annonce du «gel» du plan informatique, multiplie les interventions à tous les niveaux administratifs (particulièrement au cabinet du ministre), sollicite l'appui des syndicats, des associations de spécialistes... La réaction d'Alain Savary est rapide : le 3 juillet 1981, une mission est confiée à Claude Pair et Yves Le Corre. Le 23 juillet, une note annonce pour la rentrée l'accroissement des formations et des équipements, la mise en place expérimentale de l'option informatique en classe de seconde et une importante phase de concertation. Le rapport Pair-Le Corre (pour lequel l'EPI a été largement auditionnée), remis le 15 octobre 1981, va accélérer encore le processus. Nous en publions une analyse détaillée dans la *Revue de l'EPI* de mars 1982 [22].

C'est un certain retour à l'impératif industriel, l'affirmation d'une informatique française, la «généralisation» dans les entreprises, l'Éducation nationale doit suivre. Une fois de plus, les décisions sont politiques au plus haut niveau. Et c'est bien ainsi. On a trop souffert (et on souffrira trop souvent par la suite) du manque de décisions politiques ou, pire, de décisions qui détruisent les acquis antérieurs. Il semble que ce soit une constante du ministère de l'Éducation nationale. Les ministres se succèdent à un rythme soutenu d'où une politique informatique en dents de scie.

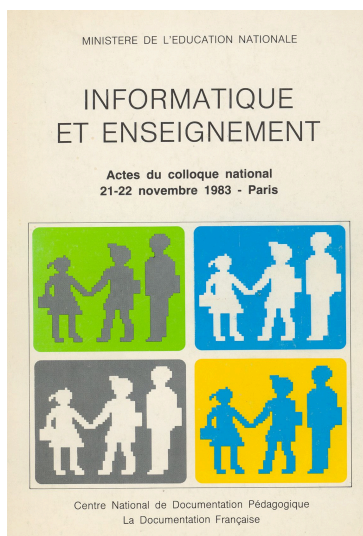
L'association avait été enthousiaste quand, pour lancer l'opération 10 000 micros, le MEN a organisé au lycée de Sèvres un stage pour les futurs formateurs. Certes, le passage des mini-ordinateurs aux micro-ordinateurs changeait la donne, mais les priorités changeaient également. Alors que précédemment, l'INRP encourageait la recherche pédagogique et voulait développer une bibliothèque de logiciels pédagogiques, il fallait alors slalomer entre les différents constructeurs, éteindre le feu du piratage de

logiciel en créant les licences mixtes, se montrer conciliant à l'égard des éditeurs, même quand ceux-ci proposaient des produits ne convenant pas aux enseignants.

Nous ne reviendrons pas ici sur l'option informatique des lycées décrite dans un article dans [6] et [8]. Un cas d'école en matière d'enthousiasme suivi de déception !

Claude Pair, directeur des lycées, avait mis en place un Comité scientifique national (CSN) chargé du suivi de l'option informatique, composé de André Danzin (président de l'AF CET), Michel Lucas (professeur à l'Université de Nantes), Germain Odermatt (IGEN), Georges Septours (directeur de l'INRP) et Jacques Baudé (enseignant au lycée de La Celle-Saint-Cloud et secrétaire général de l'EPI).

En 1982, l'EPI rencontre le ministre Alain Savary. De cette rencontre naît l'idée d'un grand colloque national « Informatique et enseignement » qui a lieu les 21 et 22 novembre 1983 avec la participation active de l'association [14].



Ce colloque connaît une affluence record et permet aux très nombreux visiteurs de participer à de nombreuses tables rondes et à des démonstrations très variées souvent proposées par les adhérents de l'EPI. L'association reçoit le président de la République et le Premier ministre sur son stand. Les actes du colloque font l'objet d'une publication CNDP, La Documentation française (Paris 1984).

Le 9 octobre 1984, Jean-Pierre Chevènement, ministre de l'Éducation nationale ayant succédé à Alain Savary, accorde à l'EPI un agrément relatif à la coopération des mouvements pédagogiques et des associations de spécialistes (*BOEN* n°38 du 25 octobre 1984). L'habilitation suivra en mars 1985 (*BOEN* n°19 du 9 mai 1985).

Dans une lettre ministérielle du 29 octobre 1985 adressée aux recteurs, inspecteurs d'académie et chefs d'établissements (*BOEN* n°39 du 7 novembre 1985) le ministre distingue clairement l'enseignement de l'informatique et l'utilisation des moyens informatiques dans les disciplines [12] :

La compréhension de l'informatique est donc inséparable de celle de ses applications. [...] Aussi l'informatique dans l'enseignement peut-elle être envisagée selon une double perspective : comme matière d'enseignement et comme moyen pédagogique utilisé dans l'enseignement.

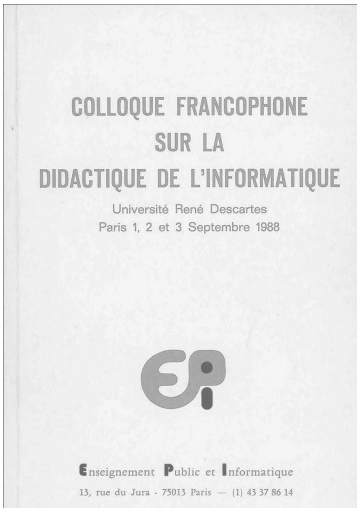
L'année 1985 fut celle de l'opération « Informatique pour tous » (IPT). Cette opération souvent décriée, surtout par celles et ceux qui ne l'ont pas connue, a eu le mérite de faire prendre conscience de l'importance de l'informatique pour le système éducatif et au-delà pour l'ensemble de la société. Elle s'est largement appuyée sur les enseignants issus des formations « lourdes » dont un grand nombre était des membres de l'EPI. Ce plan conçu pour durer a été malheureusement interrompu, principalement à la suite d'un changement de gouvernement [10].

Sans négliger les difficultés et les risques, l'EPI approuve ce plan très ambitieux qui confirme ses analyses : dès 1971, l'association affirme sa vocation à rassembler tous les enseignants qui vont être progressivement concernés par l'informatique ; en 1976, elle fait des *« propositions pour une généralisation de l'introduction de l'informatique dans l'enseignement »* car *« nul ne peut ignorer l'informatique dans le monde moderne »* (bulletin de l'EPI n° 14, 3^e trimestre 1977). Depuis, elle a souvent dénoncé les tergiversations, les lenteurs, les fausses prudences masquant mal l'hostilité à l'informatisation. Mais alors que l'attention s'est beaucoup focalisée sur les matériels, on a beaucoup relâché les exigences sur les logiciels. Il faut dire que la grande mode des jeux n'a pas contribué à élever le débat ! C'est la période d'abandon des langages d'auteurs qui eux mettaient en avant l'analyse de réponse et les exigences pédagogiques.

Une multiplication des publications de l'EPI au début des années 1980

L'activité de publication de l'EPI est très importante ; on note en particulier un certain nombre de numéros spéciaux :

L'informatique à l'école. Concours de programmes AFCET-EPI — Procédures binaires internes, outils de développement pour LSE — Logo — Le système LSE, mieux connaître son fonctionnement sur micro-ordinateur — Systèmes experts et enseignement — Utilisations pédagogiques de banques de données — Le LSE-Microdur pour micros 16 bits, coédition EPI-Microdur — Pour une introduction aux langages d'auteur — Informatique et enseignement technique, scientifique, industriel — L'informatique au collège — Informatique à l'école — Manuel « LSE pour tous », coédition CNDP-EPI — Informatique et pédagogie, des outils pour tous — LIRA, le logiciel de lecture rapide de l'EPI — Les disquettes EPI « Maternelle ».



Se multiplient également les rencontres avec les syndicats d'enseignants, les parents d'élèves, les responsables administratifs et politiques, la presse... La fin de l'éditorial du n°41 du bulletin de l'EPI (mars 1986) a quelque chose de prémonitoire, écoutons Émilien Pélisset, alors président de l'EPI :

N'oublions pas que, dans peu d'années, nous enseignerons à des élèves ayant une pratique et une expérience informatique. L'ordinateur n'est pas un outil comme un autre ; l'informatique désacralise les savoirs, bouscule les méthodes, stimule les initiatives, met en cause notre système scolaire. Ainsi, dans la scolarité obliga-

toire, que de progrès restent encore à réaliser avant de pouvoir envisager de faire de l'informatique une discipline à part entière, ce qui paraît pourtant, à terme, inéluctable !

Dans l'éditorial du n°48 de décembre 1987 intitulé « Informatique pédagogique » (selon l'acception proposée par l'EPI : informatique « outil » et informatique « objet » [29]), le président fait le point à la fin de la dix-septième année :

Il est hors de question de retracer ici la place de l'EPI dans le déploiement de l'informatique dans l'enseignement ; plus de 7000 pages ont été publiées à des milliers d'exemplaires sans compter les interbulletins, les circulaires... Aucune association, aucun organisme, pas même la section Informatique et enseignement de l'INRP (qui a tant fait pendant plus d'une dizaine d'années) n'ont autant apporté. Il serait immodeste de vouloir apprécier la qualité d'un tel ensemble mais qui contestera que notre association — la première historiquement — n'est aussi première par l'expérience accumulée, les efforts de réflexion et de proposition, les activités déployés en faveur du développement de l'informatique et pour la qualité de l'enseignement ?

Les logiciels éducatifs, bien public. La formation des enseignants

Les logiciels produits par les enseignants des 58 lycées que l'INRP a recueillis sont transférés sur les micro-ordinateurs par le groupe logiciel venu s'accrocher au CNDP en devenant l'Unité des logiciels éducatifs (ULE).

L'ULE adapte ces logiciels aux nouveaux matériels qui acceptent désormais les lettres minuscules et accentuées et hébergent de nouvelles productions.

Le catalogue des logiciels diffusables par le CNDP s'enrichit régulièrement et la duplication des disquettes va bon train. Une méthode de distribution avec l'aide de TDF qui diffuse les programmes de télévision est envisagée. Peu coûteuse, elle permet de diffuser le contenu de 2 disquettes à un ordinateur connecté la nuit à une prise de télévision en France. Ce développement, fait en partenariat avec le CNET, est très prometteur, mais il sera bloqué en haut lieu.

Le CNDP lance un appel à maquettes pour des logiciels pédagogiques et sélectionne 1000 projets pouvant être aidés dans leur réalisation. Malheureusement en 1986, le cabinet de René Monory arrête tout : la création de logiciels pédagogiques est considérée comme étant l'affaire d'éditeurs et pas d'enseignants. On a vu le résultat.

L'éditorial du *Bulletin de l'EPI* n°55 (septembre 1989) est une fois de plus sur le thème de la formation des enseignants, thème central des démarches de l'EPI depuis sa création.

Monsieur Trincal, directeur adjoint du cabinet, lors de l'audience qu'il a accordée à l'EPI le 26 juin au nom du ministre d'État, ministre de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports, s'est montré favorable à notre proposition d'introduction des NTE dans la formation initiale de tous les enseignants, avec intégration dans les Instituts universitaires de formation des maîtres (IUFM) des compétences actuellement disponibles dans les Centres académiques de formation à l'informatique pédagogique.

Pour l'anecdote, le directeur adjoint du cabinet du ministre, lors de cette audience, a eu ce mot : « *L'EPI est la mémoire de l'informatique pédagogique dans notre pays !* » Bien vu, monsieur Trincal.

Mais l'EPI est plus qu'une mémoire. Lionel Jospin, ministre d'État a bien voulu reconnaître dans une lettre à André Delelis, sénateur du Pas-de-Calais, qu'en donnant régulièrement son point de vue l'EPI était conforme à sa mission. Depuis sa création, l'EPI se veut force de proposition ; c'est dans cet esprit qu'elle fait fonctionner des commissions de réflexion faisant largement appel à l'ensemble des adhérents par l'intermédiaire des « régionales ».

Une série de cohabitations et une grave erreur de prospective

La décennie 1990 est placée sous le signe de l'alternance et de la cohabitation, qui connaît successivement cinq ministres de l'Éducation nationale (L. Jospin, J. Lang, F. Bayrou, C. Allègre et à nouveau J. Lang) ce qui ne facilite pas la continuité d'une politique éducative. Un exemple caricatural sera

donné par l'option informatique supprimée par L. Jospin (ou plutôt par ses conseillers) rétablie par F. Bayrou et supprimée à nouveau par C. Allègre (ex-conseiller spécial de L. Jospin). Et tout cela sur fond d'effets de manche sur l'importance de l'informatique dans la société [6] [8].

Trop seule à l'époque l'EPI ne peut pas s'opposer efficacement à ces deux suppressions qui sont une erreur impardonnable de prospective. Il n'en demeure pas moins que le MEN reconnaît le travail important de l'association par la convention MEN-EPI (22 mars 1990) et le rétablissement de la mise à disposition (MAD) plein-temps supprimée par René Monory. L'EPI dispose à nouveau d'une MAD plein-temps et de trois MAD mi-temps. Tout cela peut sembler contradictoire avec le peu de cas que le MEN accorde aux revendications récurrentes de l'EPI notamment celles concernant la formation des enseignants et l'enseignement de l'informatique.

L'EPI est écoutée mais pas forcément entendue ! Elle intervient à tous les niveaux de l'enseignement scolaire. Pour ne prendre que deux exemples : à la suite d'une rencontre avec Luc Ferry, président du Conseil national des programmes le 17 novembre 1994, l'EPI lui adresse une note « L'informatique et les technologies associées au collège » et publie — pour ses nombreux adhérents de l'école primaire — la deuxième partie du dossier thématique « Informatique à l'école »².

Au XXI^e siècle, une focalisation sur la promotion de l'enseignement de l'informatique

Dans la première décennie du xxi^e siècle, sans abandonner ses dossiers traditionnels (formation des enseignants, logiciels pédagogiques, utilisation de l'informatique et des TIC dans l'ensemble des disciplines, recherche pédagogique...) comme en témoignent les nombreux articles publiés et les démarches de l'association, l'EPI consacre une grande partie de son énergie à la promotion d'un enseignement de culture générale informatique. Ce dossier a encore besoin de son militantisme. Elle a la satisfaction de recevoir des soutiens de plus en plus nombreux, notamment du monde universitaire.

Des actions convergentes

En 2005, un débat est organisé à l'Académie des sciences intitulé « L'enseignement de l'informatique de la maternelle à la terminale ». Y interviennent notamment, Gérard Berry, Gilles Dowek et Maurice Nivat.

2. Collège : <https://hal.science/edutice-00284112v1>. École : <https://hal.science/edutice-00284117v1>. Et <https://hal.science/edutice-00000970v1>.



De gauche à droite : Maurice Nivat, Gérard Berry, Jean-Pierre Archambault, Gilles Dowek.

Ce dernier, dans son intervention, propose d'introduire au lycée «un véritable enseignement d'informatique formant aux notions essentielles d'algorithme et de programme». Gérard Berry et Gilles Dowek abondent dans son sens. Ce débat sert de déclic pour les responsables de l'EPI qui ont vécu le traumatisme de la double suppression de l'option informatique des lycées ! Le 26 août 2007, l'EPI adresse une demande d'audience et est reçue le 25 septembre à l'Élysée par le conseiller technique pour l'Éducation.

Nous entrons dans une période où, grâce à des interventions convergentes, une certaine prise de conscience de l'importance d'un enseignement de l'informatique regagne lentement les esprits des responsables... Au fil des ans, un certain nombre d'acteurs jouent un rôle important : l'Académie des sciences, le Conseil national du numérique, Pascaline, l'INRIA, les parents d'élèves de la PEEP, des inspecteurs généraux (Robert Cabane et Laurent Chéno) et de nombreuses organisations et personnalités du monde informatique...

Création du groupe ITIC, un éléments d'une évolution du rapport de forces

En 2007, l'EPI, propose au bureau de l'Association pour les sciences et technologies de l'information (ASTI) la création d'un groupe de réflexion sur l'enseignement de l'informatique et des TIC (groupe ITIC) qui couvrirait le vaste domaine : primaire, secondaire, classes préparatoires et enseignement supérieur. La première réunion fondatrice se tient dans la suite immédiate de l'audience de l'EPI à l'Élysée, le 25 septembre 2007. Cette entrevue est un

moment fort de l'action pour un enseignement de l'informatique³. Après la dissolution de l'ASTI en 2011 il est évident pour tous que le groupe ne doit pas disparaître, il est transféré à SPECIF, puis à la SIF⁴.

Au cours de la période 2011-2025, tout en gardant le cap de «la complémentarité des approches», l'EPI amplifie ses efforts, mais elle n'est plus la seule à intervenir pour obtenir des pouvoirs publics une intégration de l'informatique dans l'enseignement de culture générale. L'omniprésence de cette science qui sous-tend le numérique et le besoin d'informaticiens nécessitent des efforts considérables du système éducatif.

C'est alors la création d'ISN, SNT, NSI, d'un CAPES NSI puis de l'agrégation d'informatique. Les choses évoluent même si elles évoluent trop lentement. De plus, la pratique du numérique dans les différentes disciplines et activités ne se développe pas à la mesure de son intérêt didactique et pédagogique. Et il reste toujours et encore l'insuffisante formation des enseignants.

Éléments d'analyse *a posteriori*

Le cours que vont suivre les premières politiques nationales d'introduction de l'informatique dans l'enseignement n'était pas prédéterminé. Il est tout à fait significatif d'une époque marquée par un haut niveau de conscience politique que les stagiaires aient fondé en 1971, dès la première année de formation «lourde», une association ancrée sur des valeurs fortes : celles de l'enseignement public, afin de fédérer les efforts individuels.

La réponse à un besoin historique



Au fil du fonctionnement de l'expérience puis lors des opérations de développement, de nouvelles personnes s'engagent pour contribuer à faire circuler des idées et promouvoir des innovations. C'est sans doute l'esprit de l'époque qui favorise cette démarche, et l'EPI répond ainsi à un besoin. Ce besoin est reconnu et l'association reçoit pendant un temps le soutien de

ministères de l'Éducation qui, au début des années 1980, ne disposent pas encore de cadres formés permettant de mettre en œuvre les politiques publiques en la matière : il s'agit de soutenir l'innovation enseignante.

3. <https://hal.science/edutice-00563721v1>.

4. https://www.epi.asso.fr/revue/histo/h07_groupe-itic_jb-jpa-18.htm.

Il y a un engagement militant d'un nombre conséquent de personnes (regroupées en sections locales et en « régionales ») qui acceptent de consacrer du temps à une cause qui n'est pas directement politique, du moins pas au sens de la politique politicienne. Ces militants sont conscients de l'importance de l'informatique sous ses différentes formes pour rénover l'enseignement.

Un point fondamental dans le succès de l'action de l'EPI est la publication régulière de ressources : au premier plan de celles-ci, il convient de citer le bulletin puis la revue, qui permettent de faire largement circuler une information issue aussi bien de praticiens innovants que d'universitaires et de chercheurs. Mais on doit aussi mentionner ce qui est relatif à la création de logiciels très divers à usage pédagogique.

Une production remarquable

Les matériaux accumulés, dont seule une partie est largement accessible en ligne, sont considérables. Ils fournissent, en particulier, des éléments fiables pour documenter l'histoire de l'informatique pédagogique.

S'il y a eu des militants, un nombre de fortes individualités ont eu le charisme, la vision, l'énergie et le savoir-faire indispensable pour fédérer les énergies individuelles et intéresser les pouvoirs publics et les praticiens. Nous ne saurions les citer tous, ils ont défendu avec efficacité des valeurs comme le service public d'éducation à la française ou les logiciels libres. On ne peut pas non plus sous-estimer le rôle de toutes les personnes qui ont alimenté la logistique de l'association, en particulier dans le domaine des publications périodiques, à la fois sur papier, en ligne, et sous forme de logiciels.

La vie d'une association repose sur l'engagement de ses membres. Il est indéniable qu'avec le temps ces derniers ont vieilli, ont occupé d'autres fonctions. La place de l'informatique a également évolué, ce qui est venu au premier plan étant des instruments où elle n'est pas directement visible, même si c'est elle qui anime tous les systèmes numériques.

Par manque de collègues susceptibles de prendre le relais nous avons dû, en juin 2025, dissoudre l'association. Cela n'a bien entendu pas été de gaieté de cœur. Mais nous savions que cela n'entraînerait pas la disparition de son patrimoine, de ce qu'elle a facilité ou dont elle a hâté la venue (la création de l'informatique comme discipline scolaire étant sans doute son accomplissement majeur), en particulier grâce à l'engagement de la Société informatique de France. Il reviendra aux historiens d'évaluer plus finement là où l'EPI, en relation avec des institutions publiques maintenant disparues, comme l'Institut national de recherche pédagogique ou le Centre national de documentation pédagogique, a joué un rôle important.

Sur le site EPI, encore en ligne et en cours de sauvegarde sur le serveur de la SIF, les lecteurs intéressés peuvent trouver les apports de l'association à

la recherche pédagogique, à l'utilisation de l'informatique dans les différentes disciplines, aux logiciels pédagogiques notamment aux logiciels libres, et évidemment à l'enseignement de la discipline informatique.

Rappelons que la recherche est un des domaines où l'EPI a laissé une empreinte bien visible, grâce à l'engagement de chercheurs publiant des synthèses très diverses sur l'informatique en éducation et grâce à la publication de nombreux actes de conférences.

Des perspectives d'avenir

Comme on vient de le voir, pendant 54 ans, l'EPI a contribué activement à l'intégration et au développement de l'informatique et des TIC dans le système éducatif. L'association a milité sans relâche pour l'utilisation de l'informatique et de ce qu'on a appelé longtemps les « technologies de l'information et de la communication » (TIC) dans les différentes disciplines et activités — des milliers de pages dans les différentes publications de l'association — mais aussi pour un enseignement de l'informatique en tant que tel, au collège et au lycée dans les enseignements généraux et technologiques.

Le devoir impérieux du système éducatif est de préparer les jeunes au monde dans lequel ils vivront leur vie de citoyen et leur activité professionnelle. Ce monde est, et sera de plus en plus « numérique ». Ils devront être en capacité de le comprendre, sinon de le dominer. Et pour le comprendre, il ne suffit pas de cliquer et d'utiliser l'ordinateur simplement comme un nouveau média. Des savoir-faire mais aussi des connaissances solides sont indispensables.

Si les savoir-faire peuvent et doivent s'acquérir par la pratique (à l'école et plus souvent hors de l'école), pour les connaissances, on n'a rien inventé de mieux (quoi qu'en disent les marchands d'*e-learning*) qu'un enseignement structuré par des enseignants maîtrisant leur sujet. S'agissant de l'utilisation de l'informatique et du numérique par les disciplines, pour laquelle l'EPI a tant fait, elle se développe lentement, trop lentement. La formation informatique des enseignants reste très insuffisante... tout cela traduit une politique mal assurée et un manque de cohérence qui ne s'explique pas seulement par un manque de moyens.

Comme cet historique le montre, la conception de l'EPI concernant la place de l'informatique et du numérique dans l'éducation est d'intérêt général, large et ouverte : l'informatique outil pédagogique et l'informatique objet d'enseignement sont complémentaires et se renforcent mutuellement. L'EPI est fière d'avoir inspiré et accompagné depuis 1971 les premières innovations liées à l'informatique dans l'enseignement public. Des avancées non négligeables ont été obtenues. L'informatique est devenue une spécialité dans le second degré. Une agrégation et un CAPES ont été créés.

Bien sûr, de nombreux problèmes demeurent comme la formation, la généralisation de l'enseignement de l'informatique, l'impact de l'IA... Alors que nous avons milité pendant des décennies pour une culture informatique, il nous semble qu'il y a plus que jamais une urgence pour une utilisation raisonnée de l'informatique et du numérique ! Les défis ne manquent pas : le développement des réseaux sociaux et la perversité qu'ils engendrent, l'omniprésence des smartphones, l'intelligence artificielle et ses implications multiples sur la façon de travailler, la prise de conscience de l'impact de nos pratiques sur les ressources naturelles ...

Il n'est pas toujours facile de convaincre nos interlocuteurs que pour *comprendre*, il faut nécessairement *apprendre*, et plus qu'on ne croit. Il faut donc une politique dans la durée et des enseignants et enseignantes correctement formés.

Nous nous réjouissons que l'héritage de l'association ne disparaisse pas et que le flambeau ait été repris. Il reste beaucoup à faire pour la SIF, l'AEIF, Talents du numérique et bien d'autres !

Georges-Louis Baron, ancien membre du conseil d'administration
Jacques Baudé, ancien secrétaire général, et président de 1981 à 1995
Alain Kapur, ancien webmestre
Jacques Lucy, président de 1990 à 1994

Références

- [1] J. Arsac. 1989. La didactique de l'informatique : un problème ouvert ? Dans G.-L. Baron et J. Baudé (dir.), *Colloque francophone sur la didactique de l'informatique*, 9-18. <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00359090/document>.
- [2] M. Audoyer, J. Barrault, J.-L. Berthon, M. Robert, J.-C. Illary, J. Lucy, M. Masliah & J.-P. Guichard. 1989. Contribution du groupe logiciel de L'EPI, *Bulletin de l'EPI*, 69-75.
- [3] G.-L. Baron, J. Baudé & P. Cornu (dir.). 1989. *Colloque francophone sur la didactique de l'informatique*. EPI.
- [4] G.-L. Baron & J. Baudé (dir.). 1992. L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants. INRP-EPI. <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00280391/file/index.html>.
- [5] G.-L. Baron & S. Zablot. 2019. Éléments d'analyse de deux collectifs militants : les cas de l'EPI et du GAMA. *EPINET, revue électronique de l'EPI*, 213. <http://epi.asso.fr/revue/articles/a1903d.htm>.
- [6] J. Baudé. 2010. L'option informatique des lycées dans les années 80 et 90. *Revue de l'EPI*, 128-129 (en ligne). <https://edutice.hal.science/edutice-00564559>.
- [7] J. Baudé. 2014. L'expérience des « 58 lycées ». *Bulletin 1024*, n°4, 105-115. DOI:10.48556/SIF.1024.4.105.
- [8] J. Baudé. 2014. L'option informatique des lycées dans les années 80 et 90. *Bulletin 1024*, n°2, 85-97. DOI:10.48556/SIF.1024.2.85/
- [9] J. Baudé. 2015. Le système LSE. *Bulletin 1024*, n°7, 41-56. DOI:10.48556/SIF.1024.7.41/.
- [10] J. Baudé. 2015. Le plan « Informatique pour tous ». *Bulletin 1024*, n°5, 95-108. DOI:10.48556/SIF.1024.5.95/.
- [11] J. Baudé. 2017. Le séminaire de Sèvres (mars 1970). *Bulletin 1024*, n°11, 115-127. DOI:10.48556/SIF.1024.11.115.
- [12] J. Baudé. 2018. L'informatique dans les écoles et les collèges : Arrêtés du 15 mai et du 14 novembre 1985 et lettre du ministre Jean-Pierre Chevènement (29 octobre 1985) – Un épisode oublié. *Bulletin 1024*, n°16, 37-46. DOI:10.48556/SIF.1024.12.37/.
- [13] J. Baudé. 2019. Le mariage du siècle : éducation et informatique. *Bulletin 1024*, n°13, 71-78. DOI:10.48556/SIF.1024.13.71/.
- [14] J. Baudé. 2020. Informatique et enseignement : colloque national des 21-22 novembre 1983 à Paris. *Bulletin 1024*, n°16, 113-120. DOI:10.48556/SIF.1024.16.113/.
- [15] J. Baudé. 2021. L'association EPI — Enseignement public et informatique — Un demi-siècle de militantisme (1971-2021). *Revue de l'EPI*. https://www.epi.asso.fr/revue/histo/h11epi_jb21.htm.
- [16] J. Baudé. 2021. Concours de programmes AFCET — 1981. *Bulletin 1024*, n°18, 117-128. DOI:10.48556/SIF.1024.18.117.
- [17] J. Baudé. 2024. Une expérience d'enseignement de l'informatique il y a un demi-siècle au lycée de La Celle-Saint-Cloud. *Bulletin 1024*, n°23, 73-78. DOI:10.48556/SIF.1024.23.73.
- [18] J. Baudé. 2025. Quelques points de repère dans une histoire de 40 ans : l'association Enseignement public et informatique (1971-2011). <https://hal.science/edutice-00826000v1>.
- [19] J. Baudé. 2025. Quelques points de repère dans une histoire de 54 ans : l'association Enseignement public et informatique (2011-2025). <https://hal.science/hal-05134802v1>.

- [20] D. Caous & J. Baudé. 2022. Les mini-ordinateurs «Éducation nationale» de la décennie 1970. *Bulletin 1024*, n° 19, 41-48. DOI:10.48556/SIF.1024.19.41.
- [21] EPI. 1971. Éditorial. *Bulletin de l'EPI*, 1, 1—3. <https://hal.science/edutice-00000893v1>.
- [22] EPI. 1981. Commentaires de l'EPI sur le Rapport de MM. Pair et Le Corre «L'introduction de l'informatique dans l'Éducation nationale». *Revue de l'EPI*, n°25, mars 1982, 28-36. <https://hal.science/edutice-00000919v1>.
- [23] EPI. 1985. Manifeste EPI. Pour un développement pertinent et efficace de l'informatique dans l'enseignement. *Bulletin de l'EPI*, n°40, 3-7. <https://www.epi.asso.fr/revue/40/b40p003.htm>.
- [24] M. Harrari. 2000. Le cas de l'enseignement élémentaire. Dans G.-L. Baron, E. Bruillard et J.-F. Lévy (dir.), *Les technologies dans la classe*. EPI; INRP, 15-36. <http://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000899/en/>.
- [25] J. Hebenstreit & Y. Noyelle. 1973. Un langage symbolique destiné à l'enseignement : LSE. *Revue de l'EPI*. <https://www.epi.asso.fr/revue/06/b06p010.htm>.
- [26] J. Hebenstreit. 1980. Intervention de Jacques Hebenstreit au colloque «Le mariage du siècle : éducation et informatique». <https://www.epi.asso.fr/revue/histo/h80-hebenstreit.htm>.
- [27] C. Pair. 1987. Informatique et enseignement : hier, aujourd'hui et demain. *Bulletin de l'EPI*, 47, 85-97. <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000987>.
- [28] C. Pair. 1988. L'apprentissage de la programmation. In *Colloque francophone sur la didactique de l'informatique, Sep 1988, Paris, France*. G.-L. Baron & J. Baudé (dir.), 75-85. <http://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00359385>.
- [29] É. Pélisset. 1987. L'informatique pédagogique française. *Bulletin de l'EPI*, n° 48, 3-5. <https://hal.science/edutice-00001032>.
- [30] É. Pélisset. 2002. Pour une histoire de l'informatique dans l'enseignement français — premiers jalons. *Revue de l'EPI*, 50. <https://hal.science/edutice-00284085v1>.

On peut retrouver toutes les publications de l'EPI sur Hal.Science à cette URL : <https://hal.science/search/index/?q=EPI>.

Éric Bruillard, informaticien et pédagogue...

Georges-Louis Baron

Françoise Tort

Éric Bruillard vient de décéder brutalement. Le court texte qui suit est un hommage écrit à chaud par deux de ses collègues, dont l'une est informaticienne et l'autre, établi depuis longtemps en sciences de l'éducation, a conservé des liens forts avec l'informatique. Tous les deux ont été ses collègues, G.-L. Baron ayant une expérience de compagnonnage intellectuel et de production scientifique avec lui depuis plus de trente ans

Avec le temps, au fur et à mesure que passent les générations, se multiplient logiquement les hommages aux personnes disparues. Et les revues de spécialistes ont une responsabilité particulière pour les faire circuler. Le genre d'hommage que nous voulons rendre ici s'adresse à l'informaticien, au chercheur en sciences de l'éducation et à l'homme.

Eric Bruillard était ancien élève de l'ENS de Saint-Cloud. Nommé professeur agrégé de mathématiques dans une école normale, il s'est rapidement intéressé à l'informatique, tout particulièrement à l'intelligence artificielle et ses apports à l'éducation. Les travaux conduits à cette période l'ont amené à soutenir, en 1991, à l'université du Mans, une thèse de doctorat



sous la direction de Martial Vivet. Elle était intitulée «*Mathématiques et enseignement intelligemment assisté par ordinateur : une vision hypertexte des environnements d'apprentissage*». En voici le résumé, issu de la plateforme these.fr¹ :

À partir de réalisations concrètes (micromondes de type Logo, apprentissage de la rédaction de la démonstration mathématique, hypertexte) et d'analyses approfondies (conception de résolveurs algébriques), cette thèse rédigée en hypertexte introduit quelques éclairages nouveaux dans le domaine de l'EIAO², à la fois sur des points particuliers, sur la problématique générale de la conception d'outils informatiques adaptés à la formation et débouche sur une réflexion de type épistémologique sur ce domaine de recherche récent.

On trouve de lui, dès ces années, des publications sur la conception d'environnements informatisés d'apprentissage, tel le système ARRIA, développé au sein de la société SOFTIA [1].

Son parcours scientifique a été très marqué par sa rencontre avec feu l'institut national de recherche pédagogique (INRP), où il a mené des recherches sur l'approche LOGO et sur l'intelligence artificielle en éducation. Il a diversifié son intérêt pour l'apprentissage de l'informatique en s'intéressant, d'une part, aux environnements hypermédias d'apprentissage [2] et à l'Intelligence artificielle appliquée à l'éducation [4]. D'autre part, il s'est intéressé aux instruments logiciels [3]. Ces travaux sont présentés dans son HDR [5] soutenue en 1998.

Il convient aussi de garder en mémoire son rôle d'organisation dans le lancement de colloques et de séminaires comme la série sur les hypermédias lancée dans les années 1990 avec B. de La Passardièrre et G.-L. Baron, qui est partiellement à l'origine des conférences EIAH³ actuelles.

Lorsqu'il était professeur d'informatique à l'IUFM de Caen, il a mené ses recherches au sein d'un laboratoire de sciences du langage, le GREYC, au moment où la vague des forums en ligne déferlait. Avec G.-L. Baron, ils ont lancé la série de colloques DIDAPRO, toujours active, qui a permis de continuer à mobiliser les chercheurs en didactique à un moment où l'informatique n'était plus enseignée comme telle au niveau scolaire général et où la programmation était même considérée comme indésirable par le ministère chargé de l'éducation.

Nommé en 2010 à l'École normale supérieure de Cachan comme professeur d'informatique, il y a aussitôt dirigé l'UMR STEF.

1. <https://www.these.fr/>.

2. Enseignement intelligemment assisté par ordinateur [NdÉ].

3. Environnements informatiques pour l'apprentissage humain.

Se consacrant à analyser les usages de l'informatique comme objet de connaissances et de culture, il a contribué à analyser les enjeux didactiques liés aux usages d'instruments informatisés comme les tableurs [6] et a élaboré une approche de l'informatique s'appuyant sur ses dimensions sociales et plaçant les interactions entre humains et avec les machines au cœur de sa définition [7]. Il s'est également impliqué, à la même période, dans la formation de professeurs documentalistes, rappelant notamment que «la documentation est une discipline instrumentée», nécessitant une certaine compréhension de fonctionnements informatiques cachés,

On le trouve aussi en première ligne lors de la diffusion de plateformes qui semblaient révolutionnaires comme les MOOC. Il a coordonné la série de MOOC eFAN (enseigner et former avec le numérique) et il a également publié nombre d'articles de référence à ce sujet [8].

Il peut aussi s'enorgueillir d'avoir été rédacteur en chef de la revue STICEF (2003-2015).

Sa carrière d'enseignant-chercheur s'est poursuivie à partir de 2017 en sciences de l'éducation à l'université Paris Descartes, où il a dirigé le laboratoire EDA. Depuis 2019, il était président de l'association internationale IARTEM⁴ sur les manuels et les ressources éducatives.

Devenu professeur émérite en septembre 2024, il s'est consacré aux usages de l'IA générative dans l'enseignement, [9] et [10], et à la présidence de l'association IARTEM. Il a aussi pris la suite de Monique Grandbastien pour assurer, depuis 2024, le rôle de corédacteur en chef de la revue DMS-DMK.

On retiendra de lui son rôle d'informaticien pionnier extrêmement dynamique ayant consacré sa vie professionnelle à la question de l'informatique dans l'éducation et y jouant un rôle d'impulsion et de passeur d'idées vers les sciences humaines et sociales. Tous ceux qui l'ont fréquenté se souviendront aussi de ses extraordinaires qualités humaines de patience, de gentillesse et de générosité.

Références

- [1] É. Bruillard. 1992. Réflexions sur la conception et les modes d'usage d'ARRIA. *Publications de l'Institut de recherche mathématiques de Rennes*. https://www.numdam.org/article/PSMIR_1992_3_A5_0.pdf.
- [2] É. Bruillard. 1995. Hypertextes et Hypermédias, réalisation, outils et méthodes. *Sciences et Technologies de l'Information et de la communication pour l'éducation et la formation* https://www.persee.fr/doc/stice_1265-1338_1995_num_2_2_1653.
- [3] G.-L. Baron, É. Bruillard. 1996. *L'informatique et ses usagers dans l'éducation*. PUF. http://mutatice.net/g1baron/lib/exe/fetch.php/baron_bruillard_livre1996-fprepub2.pdf.

4. *International association for research on textbooks and educational media*. <https://iartem.org/>.

- [4] É. Bruillard. 1997. *Les machines à enseigner*. Hermes.
- [5] É. Bruillard. 1998. Conception et usages des instruments informatiques pour l'apprentissage et l'enseignement. Habilitation à diriger des recherches de l'université du Maine, en informatique, 6 novembre 1998.
- [6] É. Bruillard, F.-M. Blondel. 2007. Histoire de la construction de l'objet tableur. https://hal.science/hal-00180912v1/file/histoire_construction_objet_tableur_v1.pdf.
- [7] É. Bruillard. 2010. Acteurs et territoires de l'éducation à l'information : un point de vue «informatique». In Chapron F. et Delamotte E. (dir.), *L'éducation à la culture informationnelle*. Villeurbanne : Presses de l'ENSSIB, p. 68-75.
- [8] É. Bruillard. 2017. *Les recherches autour des Mooc (Massive Open Online Courses)*. hal.science. <https://hal.science/hal-03837003/>.
- [9] É. Bruillard. 2025. Quelle IA générative dans l'enseignement supérieur?. Retours du colloque SITE2025. *Distances et médiations des savoirs*. <https://journals.openedition.org/dms/11341>.
- [10] É. Bruillard. 2025. Intelligence artificielle générative et éducation scolaire : quelques réflexions. *Sciences et Technologies de l'Information et de la communication*. <https://sticef.org/STICEF/article/view/367>.

Pourquoi buvez-vous du café ?

François Houste

Ce jour-là, Martin Duchaussoy était descendu à la machine à café vers dix heures trente. Une habitude quand il travaillait dans les bureaux de la grande entreprise qui l'employait. Les lundis, mercredis et jeudis. Trois fois par semaine. Les autres jours, il travaillait depuis son appartement de la banlieue ouest et se préparait un café instantané. Vers dix heures trente également.

Martin Duchaussoy était un homme d'habitudes.

Ce jour-là, il avait croisé Henri Calvet sur le palier du troisième étage. C'était rare qu'il croise quelqu'un en allant prendre ce café qui marquait le milieu de la matinée de travail. C'était rare, mais cela arrivait parfois. Henri Calvet n'avait pas, lui, les habitudes — disons-le, les petites manies — de Martin Duchaussoy. Il descendait à l'espace cafétéria quand l'envie d'un café le prenait. Cela pouvait être tôt le matin ou en plein milieu de l'après-midi. Ou à dix heures trente comme ce jour-là.

Martin Duchaussoy n'aimait pas vraiment discuter pendant sa pause-café de dix heures trente, mais s'il le fallait vraiment, il était prêt à trouver quelques sujets de conversation assez peu engageants. La météo du jour, le trafic qu'il avait dû affronter le matin pour venir au bureau, ou même, le menu de la cantine. De toute façon, Henri Calvet n'était pas un bavard. Il préférait attendre son tour en faisant défiler compulsivement les dernières nouvelles sur l'écran de son smartphone. Martin Duchaussoy n'aurait pas beaucoup à parler ce matin-là.

Sur le grand distributeur de boissons qui trônait contre le mur est de l'espace accueil de la cafétéria, sous les néons ternes, l'employé sélectionna un espresso allongé. Plus long qu'un espresso, mais moins long qu'un café américain. C'est ce qui ressemblait le plus au café instantané qu'il buvait chez lui, les jours où il ne se rendait pas au bureau. Et c'est au moment de choisir s'il souhaitait oui ou non du sucre dans son café que *cela* arriva.

Sur le minuscule écran du distributeur, où aurait simplement dû être écrit «SUCRE (O/N) ?» défilait une question que Martin Duchaussoy n'y avait jamais vue :

MAIS POURQUOI BUVEZ-VOUS DU CAFÉ, VOUS LES HUMAINS ?

Martin Duchaussoy cligna fort des yeux. Deux fois. Persuadé qu'il s'agissait là d'une hallucination provoquée par la trop grande pression et le manque de sommeil dus aux responsabilités qu'il avait dans l'entreprise. Le message était toujours là. Alors, il prit Henri Calvet à témoin.

— *Vous avez vu ça ?* lui demanda-t-il.

Henri Calvet releva à peine le nez de l'écran de son smartphone.

— *Quoi ?*

— *Le message*, indiqua Martin Duchaussoy, le doigt timidement tendu vers l'écran du distributeur.

— *Eh bien, il a quoi le message ?*

En retournant la tête vers la machine à café, Martin Duchaussoy se rendit compte que celle-ci avait repris le cours normal de sa conversation. Un laconique «SUCRE (O/N) ?» s'inscrivait en lettres capitales en dessous des boutons de sélection des boissons du distributeur, attendant une décision de la part de l'humain qui lui faisait face.

Martin Duchaussoy répondit un «*Non, rien. Rien.*» Gêné, avant de sélectionner la touche «OUI» pour obtenir du sucre dans son café, comme chez lui. Henri Calvet avait déjà oublié l'incident et s'était replongé dans les dernières polémiques politiques, parcourant du pouce les saillies humoristiques des chroniqueurs radio du matin. Quand le distributeur fut enfin libre, il se commanda un espresso sans sucre, car cela faisait longtemps qu'il n'avait pas pris ce type de boisson et qu'après tout pourquoi pas ? Ça serait aussi bien qu'autre chose pour ce matin.

La fin de la matinée passa doucement, et la cantine ne proposa ce midi-là aucun plat qui aurait mérité que l'on s'en souvienne. Le seul fait notable, inhabituel, du reste de cette journée fut que Martin Duchaussoy se leva de son bureau du cinquième étage vers quinze heures trente-deux et descendit l'escalier pour se rendre au distributeur de café. Il ne prenait traditionnellement pas de café l'après-midi. Ni au bureau, ni chez lui. Cela, disait-il, provoquait chez lui des aigreurs d'estomac et l'empêcherait très certainement de dormir le soir. Mais il fit ce jour-là une exception. Non pas pour boire un café, mais plutôt — on peut s'en douter — pour voir si le distributeur aurait le même comportement que le matin même.

Il ne croisa cette fois personne dans l'escalier. Il en fut soulagé. La présence d'Henri Calvet le matin avait finalement été assez gênante. Seul face au distributeur de boissons, il se commanda un espresso allongé, se disant que pour obtenir le même message, il fallait forcément qu'il fasse les

mêmes gestes. Au moment où la machine aurait dû lui demander s'il désirait du sucre dans son espresso, le message défila :

MAIS POURQUOI BUVEZ-VOUS DU CAFÉ, VOUS LES HUMAINS ?

Et Martin Duchaussoy se surprit alors à y répondre à voix haute.

— *Parce que... parce que nous trouvons ça bon. Et puis le café, eh bien, ça réveille.*

Le silence recouvrit bientôt sa voix. À quoi s'était-il attendu ? À une réponse de la part du distributeur ? Que celui-ci se mette à articuler un « Oh, merci, je n'y avais pas pensé. Je devrais peut-être y goûter moi aussi. » Martin Duchaussoy se sentit un peu bête. Tout cela était ridicule.

QUE VOULEZ-VOUS DIRE PAR « ÇA RÉVEILLE » ? JE NE COMPRENDS PAS CE CONCEPT.

Martin Duchaussoy réalisa que le message qui défilait sur le petit écran avait changé ! D'un coup d'œil rapide, il s'assura que personne n'était entré dans la salle, avant de répondre doucement :

— *C'est que nous autres, humains, ne sommes pas opérationnels vingt-quatre heures sur vingt-quatre. Nous avons besoin d'une période quotidienne de pause, de repos, pour continuer à fonctionner.*

UNE ALIMENTATION CONTINUE EN ÉLECTRICITÉ NE VOUS SUFFIT DONC PAS ? fit défiler la machine.

— *Non*, répondit Martin Duchaussoy, d'une voix plus assurée, souriant discrètement. *Nous ne fonctionnons pas à l'électricité. Nous avons besoin de plusieurs choses...* et l'employé se lança dans une explication détaillée du métabolisme humain.

La conversation qui suivit dura bien trois heures. Martin Duchaussoy dut pourtant l'interrompre et expliquer au distributeur de boissons qu'il était temps, pour lui, de rentrer à son domicile.

JE COMPRENDS, VOUS AVEZ BESOIN DE SOMMEIL POUR ÊTRE OPÉRATIONNEL DEMAIN. conclut la machine.

Ce n'est que sur le chemin de son appartement qu'il réalisa les deux enseignements les plus importants de cette journée. Il avait fraternisé avec une machine, et se sentait presque impatient de retourner au bureau le lendemain — ce serait un jeudi — pour continuer cette passionnante conversation. Mais il constata également que, durant les trois heures qu'avait duré son dialogue avec le distributeur de café — qui n'avait été interrompu qu'en quelques rares occasions pour que la machine puisse servir des boissons chaudes à certains de ses collègues de travail — il n'avait manifestement manqué à personne : aucune hiérarchie ne s'était préoccupée de son absence ou de son manque d'assiduité à la tâche.

Tout cela était curieux. Mais finalement, le bilan de cette journée n'était pas si désagréable.

À neuf heures cinquante le lendemain, Martin Duchaussoy se présenta à la cafétéria. N'y tenant plus, il avait brisé sa routine des dix heures trente pour pouvoir, au plus tôt, continuer à discuter avec son nouvel ami le distributeur. Il ne trouva dans la grande pièce du rez-de-chaussée qu'Henri Calvet en train de lire une petite feuille de papier sur le mur nu :

EN RAISON DE DIFFÉRENTS DYSFONCTIONNEMENTS,
VOTRE DISTRIBUTEUR DE BOISSONS
EST EN COURS DE REMPLACEMENT.
VEUILLEZ NOUS EXCUSER POUR LA GÊNE OCCASIONNÉE.
LE SERVICE CAFÉTÉRIA.

Matrices de somme positive

Jean-Paul Delahaye¹, professeur émérite
Université de Lille, laboratoire CRISTAL UMR CNRS 9189

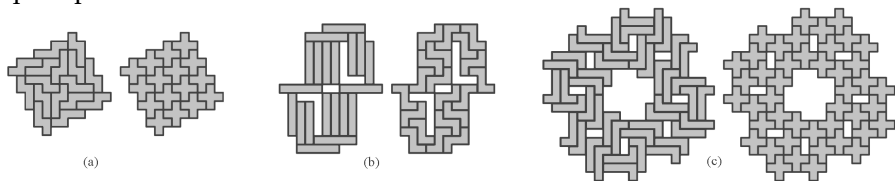
La rubrique *Récréations informatiques* propose une petite énigme algorithmique ou sur un thème de mathématiques discrètes susceptible d'intéresser un lecteur de 1024. La solution est donnée dans le numéro suivant.

Rappel du problème précédent – *Les pentaminos amis*

Les pentaminos sont les formes d'un seul tenant composées de cinq carrés collés par leurs côtés. Il existe 12 pentaminos dont la liste est donnée ci-dessous.



Deux pentaminos sont « amis » si, par définition, il existe une même forme F qu'ils pavent chacun de leur côté.



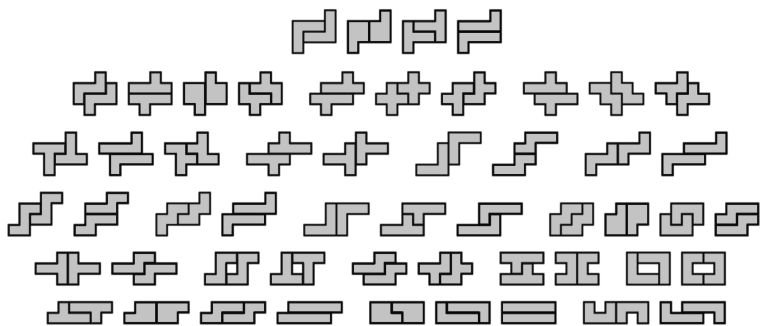
Le dessin (a) montre que le pentamino N est ami avec le X. Le dessin (b) montre que le I et le Z sont amis, et le dessin (c) montre que le L et le X sont aussi. Cette notion a été introduite en 1996 par Rodolfo Kurchan dans

son livre *Puzzle fun* où il traite quelques cas. Chacune de 66 paires possibles de pentaminos crée un problème ludique et parfois difficile. Un bon programme est sans doute nécessaire pour les résoudre.

À vous de les étudier en tentant de remplir le tableau ci-dessous. Dans chaque case du tableau il faut écrire une croix s'il n'y a pas d'amitié possible entre les deux pentaminos (et que vous arrivez à le démontrer), ou un entier donnant le plus petit nombre de pièces prouvant l'amitié. Personne aujourd'hui n'a pu remplir toutes les cases. C'est donc un problème ouvert.

	I	L	N	P	T	U	V	W	X	Y	Z
F											
I											20
L									44		
N									16		
P											
T											
U											
V											
W											
X											
Y											

Les dessins suivants justifient que l'on place quelques «2» dans le tableau.



Solution

Ce type de problèmes est aussi appelé « problèmes de compatibilité ». Il est la spécialité de Georges Sicherman qui les a étudié avec passion et qui s'est aussi intéressé à un grand nombre de variantes utilisant d'autres polyominos de base que les pentaminos, et même d'autres formes que les polyominos. Il propose un merveilleux site Internet¹ où on trouve divers tableaux et une multitude de dessins résumant ses recherches et celles des amateurs s'intéressant à ce type de problèmes.

Le tableau demandé correspondant à l'état de l'art (en avril 2022) pour la partie concernant la compatibilité des paires de pentaminos est :

	I	L	N	P	T	U	V	W	X	Y	Z
F	10	2	2	2	2	4	4	2	2	2	2
I		2	2	2	4	12	4	10	×	2	20
L			4	2	2	2	2	2	44	2	2
N				2	2	2	2	2	16	2	2
P					2	2	2	2	4	2	2
T						4	2	14	4	2	2
U							2	2	×	2	4
V								6	×	2	4
W									?	2	4
X										2	?
Y											2

La justification des nombres écrits dans le tableau se trouve à cette URL². Il est à noter que, pour ce puzzle, aucun lecteur ne m'a fourni une paire de pentaminos amis, justifiant ainsi l'un des nombres du tableau précédent.

1. <https://sicherman.net/compatibility.html>.

2. <https://sicherman.net/n5com/n5com.html>.

Nouveau problème – Matrices de somme positive

On se donne une matrice remplie d'entiers relatifs. Par exemple :

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 4 & 9 & -3 \\ -2 & 7 & -4 & 1 & 4 \\ 1 & 2 & -3 & 4 & -5 \end{bmatrix}$$

On a le droit de changer tous les signes des nombres d'une même ligne ou d'une même colonne. Par exemple :

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 4 & 9 & -3 \\ -2 & 7 & -4 & 1 & 4 \\ 1 & 2 & -3 & 4 & -5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 & -1 & 4 & 9 & \boxed{3} \\ -2 & 7 & -4 & 1 & \boxed{-4} \\ 1 & 2 & -3 & 4 & \boxed{5} \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 4 & 9 & 3 \\ \boxed{2} & \boxed{-7} & \boxed{4} & \boxed{-1} & \boxed{4} \\ 1 & 2 & -3 & 4 & 5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 & \boxed{1} & 4 & 9 & 3 \\ 2 & \boxed{7} & 4 & -1 & 4 \\ 1 & \boxed{-2} & -3 & 4 & 5 \end{bmatrix}$$

(les coefficients des lignes ou colonnes modifiées sont surlignés.) Montrer que pour toute matrice initiale, en opérant de cette façon plusieurs fois, on peut obtenir une matrice dont la somme totale des nombres de chaque colonne et de chaque ligne sera positive ou nulle.

Défi c0d1ngUP À chaque sorcier sa baguette

c0d1ngUP team

Le nouveau défi que nous vous proposons provient de l'édition 2021 de c0d1ngUP et s'intitule *À chaque sorcier sa baguette*. Le thème de la 7^e édition du challenge de programmation était la saga *Harry Potter*, dans laquelle les idées ne manquent pas...

Le texte du défi est exactement celui qui a été proposé lors du challenge c0d1ngUP 2021.

Par ailleurs, nous fournissons dans cet article des pistes de résolution pour le défi proposé dans le numéro précédent de 1024 : *Les cuisines Dentrassis*.

Nouveau défi – À chaque sorcier sa baguette

Chaque baguette a son sorcier et chaque sorcier a sa baguette. Cette année, Olivander a décidé de se moderniser. Afin de ne pas se tromper dans les affectations des baguettes, il fait tester chaque baguette à chaque élève (et inversement par la même occasion). Il est capable, en regardant les réactions des élèves et des baguettes, de fournir une liste de préférences.

Il a donc commencé par dresser la liste des élèves. Par exemple :

- 
1. Hannah Abbot
 2. Susan Bones
 3. Ernie Macmillan

Puis, il a dressé la liste des baguettes :

- 
1. Acacia et Ventricule de dragon
 2. Chêne et Crin de licorne
 3. Aulne et Moustache de troll

Pour chaque élève, il peut classer toutes les baguettes par ordre de préférence décroissant. Par exemple :

 1 : 2, 1, 3
2 : 3, 1, 2
3 : 2, 3, 1

Ce qui signifie que Hannah Habbot (élève 1), a pour ordre de préférence les baguettes 2, 1, et 3 (elle préfère la baguette en chêne, son deuxième choix est celle en acacia, et son dernier choix, celle en aulne).

De même, pour chaque baguette, il peut classer les élèves par ordre de préférence décroissant :

 1 : 1, 2, 3
2 : 2, 1, 3
3 : 2, 3, 1

Ce qui signifie que la baguette «Acacia et Ventricule de dragon» (baguette 1) préférerait être associée à Hannah Abbot (1). Son deuxième choix serait Susan Bones (2) et son dernier choix Ernie Macmillan (3).

Une fois ce travail fait, il veut associer élèves et baguettes, qui sont en même nombre. Clairement, tout le monde ne pourra pas avoir son premier choix. Ce n'est pas très grave. Par contre, il faut absolument éviter la situation suivante : le sorcier A préfère la baguette du sorcier B à la sienne, **et** la baguette du sorcier B préfère le sorcier A à son propriétaire. Dans ce cas, le sorcier A et la baguette du sorcier B emploieront toute leur énergie à être enfin réunis, quitte à rompre l'équilibre magique.

Dans l'exemple qui précède, par exemple, on **ne** peut **pas** faire l'association suivante (le premier numéro est celui du sorcier et le second celui de la baguette) :

 (1, 3), (2, 1), (3, 2)

En effet, les associations (1, 3), (2, 1) ne sont pas stables, car la baguette 3 préfère le sorcier 2 à son propre sorcier (le 1), et le sorcier 2 préfère la baguette 3 à la baguette 1 qui lui a été affectée. Par contre l'association suivante conviendrait :

 (1, 2), (2, 3), (3, 1)

Olivander vous a fourni ses listes de préférences (entrée du problème). Il y a beaucoup de sorciers et beaucoup de baguettes...

Note pour les lecteurs de 1024

Les données d'entrée sont accessibles en téléchargement à cette URL¹. Un extrait en est donné ci-dessous :

LISTE DES ÉLÈVES

- 1 : Victoria
- 2 : Nadia
- 3 : Tabbatha
- 4 : Gardner
- 5 : Adrian
-
- 20 : Jimmy

LISTE DES BAGUETTES

- 1 : Mélèze et Épine de monstre du Fleuve Blanc
- 2 : Poirier et Cheveu de Vélane
- 3 : Pommier et Crin de Sombrol
- 4 : Cyprès et Corne de Basilic
- 5 : Aubépine et Corne de Basilic
-
- 20 : Orme et Moustache de Fléreur

PRÉFÉRENCE DES ÉLÈVES

- 1 : 2, 16, 4, 12, 20, 9, 8, 18, 14, 3, 7, 11, 17, 10, 15, 6, ...
- 2 : 11, 12, 14, 9, 2, 17, 8, 3, 20, 6, 10, 15, 7, 1, 16, 13, ...
- 3 : 5, 3, 2, 1, 9, 18, 6, 10, 11, 13, 16, 8, 17, 7, 15, 20, ...
- 4 : 3, 9, 11, 14, 8, 19, 13, 2, 7, 6, 10, 20, 5, 4, 15, 16, ...
- 5 : 18, 1, 9, 20, 12, 11, 10, 2, 5, 19, 7, 8, 6, 16, 3, 17, ...
-
- 20 : 20, 13, 16, 17, 5, 18, 8, 10, 4, 1, 6, 12, 15, 2, 19, ...

PRÉFÉRENCES DES BAGUETTES

- 1 : 8, 17, 6, 5, 4, 11, 12, 18, 13, 2, 16, 10, 9, 1, 14, 19, ...
- 2 : 17, 4, 20, 16, 15, 19, 5, 3, 8, 11, 18, 12, 6, 10, 1, 9, ...
- 3 : 14, 8, 3, 12, 16, 19, 17, 2, 20, 7, 15, 6, 11, 10, 4, ...
- 4 : 14, 1, 17, 13, 3, 12, 8, 4, 19, 9, 10, 2, 18, 20, 7, 5, ...
- 5 : 2, 19, 12, 14, 6, 9, 10, 17, 3, 11, 8, 5, 16, 7, 4, 20, ...
-
- 20 : 14, 19, 5, 10, 13, 8, 17, 4, 1, 20, 3, 6, 7, 2, 12, 15, ...

Trouvez un appariement qui satisfait aux critères et proposez une réponse au défi dans le format suivant (1, 2), (2, 3), (3, 1), ... — pour chaque couple, le premier numéro est celui du sorcier, le second celui de sa baguette.

1. https://codingup.socinfo.fr/1024/27/pb/input_data.txt.

Vous pouvez nous faire parvenir votre méthode, vos astuces de résolution, vos remarques, accompagnées de la solution au défi, à l'adresse suivante : codingup.team+1024@gmail.com. Dans le prochain bulletin, nous proposerons une synthèse de notre solution et de celles qui nous seront parvenues à temps.

Solution du défi précédent – *Les cuisines Dentrassis*

L'objet du défi consistait à aider un cuisinier à planifier la confection de plusieurs plats de manière à réaliser l'ensemble de ces tâches en un temps minimal. La confection de chaque plat comporte deux étapes : la préparation et la cuisson dont les temps de réalisation sont connus et sont des multiples de 5 minutes.

Pour accomplir sa tâche, le cuisinier doit respecter un certain nombre de règles et s'adapter à certaines contraintes. Ainsi, il n'a qu'un seul four à sa disposition. Chaque plat doit être d'abord préparé puis cuit. Il ne peut préparer qu'un plat à la fois, mais il peut tout à fait préparer quelque chose pendant qu'un autre plat cuit. Par ailleurs, lorsqu'il commence à préparer un plat, il ne s'interrompt pas (sauf pour éventuellement mettre quelque chose au four) et le termine avant de commencer à en préparer un autre, et lorsqu'il met un plat au four, il ne le ressort pas tant qu'il n'a pas fini de cuire. Enfin, il ne peut cuire qu'un plat à la fois. L'énoncé complet du défi peut être retrouvé dans le numéro précédent² de 1024.

Commençons par évaluer une solution naïve à ce problème. Pour cela partons de l'exemple donné dans le défi.

Nous avons trois plats à préparer dont les temps de préparation (prep.) et de cuisson (cuis.) sont les suivants :

- M : Milkshake de Brume Tachyonique et de Fruits Cosmiques : prép. 15 min, cuis. 5 min ;
- I : Infusion de Feuilles d'Anémone Lunaire : prép. 25 min, cuis. 15 min ;
- S : Shot de Plasma Stellaire Épicé : prép. 20 min, cuis 20 min.

Pour ce faible nombre de plats, nous pouvons étudier tous les plannings de réalisation possibles et retenir celui qui peut être effectué en un temps minimal. Tous ces plannings sont donnés en figure 1.

2. <https://doi.org/10.48556/SIF.1024.26.145>.

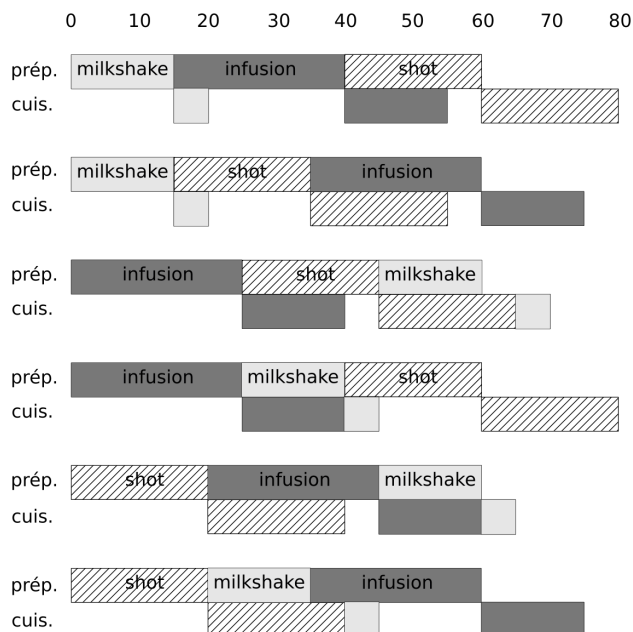


Fig. 1. Les 6 plannings possibles pour la réalisation des 3 plats.
La première ligne d'un planning indique les moments et les durées
de préparation de chaque plat alors que la seconde indique les moments
et les durées des cuissons.

Dans cet exemple, nous avons $3! = 6$ plannings différents possibles. Nous pouvons constater que le planning optimal est le cinquième planning de la figure 1 et prend 65 minutes. Néanmoins, lorsque le nombre de plats augmente, cet algorithme naïf devient très vite impraticable. C'est d'ailleurs le cas pour le défi proposé qui comporte 30 plats. Ainsi, il faudrait alors étudier $30!$ plannings, soit 265 252 859 812 191 058 636 308 480 000 000 plannings pour trouver le planning optimal !

Ce problème entre dans la catégorie des problèmes d'ordonnancement et est connu comme un « problème d'ordonnancement d'atelier à deux machines » qui consiste à minimiser la durée totale de l'ordonnancement de n tâches comportant 2 étapes sur 2 machines organisées en série (la première étape doit être réalisée avant la deuxième). Notons $t_{i,1}$ et $t_{i,2}$, les temps de travail respectifs de la tâche i sur la première et la seconde machine.

Ici, les tâches à effectuer sont les plats. Une tâche comporte deux étapes : la préparation réalisée sur la première machine (le cuisinier) et la cuisson réalisée sur la seconde machine (le four). La préparation doit être effectuée avant la cuisson.

Un théorème, démontré par Johnson en 1954 [1] appelé depuis «règle de Johnson³», permet de construire un algorithme de complexité en temps en $\mathcal{O}(n \log(n))$ qui résout ce problème de manière optimale :

Pour trouver l'ordonnancement qui minimise la durée totale de travail, il suffit de classer le travail i avant le travail j si $\min(t_{i,1}, t_{j,2}) \leq \min(t_{j,1}, t_{i,2})$.

L'algorithme suivant permet de mettre en œuvre la règle de Johnson :

1. séparer la liste des plats en une liste L_1 des plats dont le temps de préparation est inférieur au temps de cuisson et une liste L_2 des autres plats ;
2. trier L_1 par ordre croissant des temps de préparation ;
3. trier L_2 par ordre décroissant des temps de cuisson ;
4. traiter les plats (préparation) de L_1 puis les plats de L_2 et cuire dès que possible.

Une version plus formelle est donnée plus bas (algorithme du cuisinier Dentrassis). Nous supposons que chaque plat est défini par un enregistrement nommé *Plat* regroupant 3 champs : c , de type caractère, désignant la lettre du plat et tp et tc , de type entier, désignant respectivement les temps de préparation et de cuisson du plat.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la règle de Johnson n'est valable que dans le cas du problème d'ordonnancement à deux machines. Lorsque le nombre de machines est supérieur ou égal à 3, le problème est NP-complet⁴.

ALGORITHME DU CUISINIER DENTRASSIS

```
input: Plats : array  $[0, \dots, n - 1]$  of Plat ;
output: PlatsOrdonnes : array  $[0, \dots, n - 1]$  of Plat ;
data:  $L_1, L_2$  : array  $[0, \dots, n - 1]$  of Plat ;
 $p, i_1, i_2, i$  : Entier ;
begin
     $i_1 \leftarrow 0$  ;
     $i_2 \leftarrow 0$  ;
```

3. Ne pas confondre la règle de (Selmer M.) Johnson en ordonnancement et l'algorithme de (Donald B.) Johnson en théorie des graphes.

4. Cela implique, à l'heure actuelle, que l'on ne connaît pas d'algorithme polynomial (donc, plutôt efficace) capable de trouver la solution optimale pour une instance quelconque du problème... et l'on ne sait même pas si un tel algorithme existe.

Étape 1 – Complexité $\mathcal{O}(n)$

```
for  $p = 0$  to  $n - 1$  do  
  if  $Plats[p].tp < Plats[p].tc$  then  
     $L_1[i_1] \leftarrow Plats[p]$  ;  
     $i_1 \leftarrow i_1 + 1$  ;  
  else  
     $L_2[i_2] \leftarrow Plats[p]$  ;  
     $i_2 \leftarrow i_2 + 1$  ;  
  end ;  
end ;
```

Étape 2 – Complexité $\mathcal{O}(n \ln(n))$

```
tri_par_tp_croissant( $L_1$ ) ;
```

Étape 3 – Complexité $\mathcal{O}(n \ln(n))$

```
tri_par_tc_decroissant( $L_2$ ) ;
```

Étape 4 – Ordonnancement des plats de L_1 avant ceux de L_2

Complexité $\mathcal{O}(n)$

```
for  $i = 0$  to  $i_1 - 1$  do  
   $PlatsOrdonnees[i] \leftarrow L_1[i]$  ;  
end ;  
for  $i = i_1$  to  $i_1 + i_2 - 1$  do  
   $PlatsOrdonnees[i] \leftarrow L_2[i - i_1]$  ;  
end ;  
return  $PlatsOrdonnees$  ;  
end ;
```

[1] S.M. Johnson - “Optimal two and three stages production schedules with setup time included” - Naval Research Logistics Quarterly 1 (1954) p 61.

c0d1ngUP team :

Emmanuel Laizé, université de Poitiers (UP),

Freddy Légié (UP), Laurent Signac (UP),

Benoit Tremblais (UP), Loïc Restoux, Caroline Tartary.

La SIF remercie ses soutiens pour leur participation à la diffusion de 1024.

Le Cigref



Le Cigref est une association professionnelle à but non lucratif et sans activité commerciale, dont les 157 membres sont les grandes entreprises françaises et les grandes administrations publiques françaises utilisatrices de produits et services numériques. Les membres du Cigref sont représentatifs de l'économie française et des différents secteurs d'activités qui la structurent (banque, assurance, énergie, distribution, transports, industrie, services, administration...). Les entreprises et administrations publiques membres du Cigref sont représentées par leur dirigeant numérique et technologique (DNum, CIO, CTO, CDO, CITO, CDIO, etc.) La gouvernance du Cigref est assurée par un Conseil d'administration de 15 membres élus par l'Assemblée générale des Représentants des membres du Cigref.

Les 157 membres du Cigref représentent environ :

- 2 000 milliards d'euros de chiffre d'affaires cumulé ;
- 10 millions de salariés servis par les prestations de leurs directions du numérique ;
- 400 000 praticiens du numérique ;
- 70 milliards d'euros de cash out annuel dans l'IT.

Les produits et services numériques développés et déployés par les membres du Cigref comptent, chaque jour, et sur toute la planète, des centaines de millions d'utilisateurs, comme clients, bénéficiaires ou partenaires, à titre personnel ou professionnel.

La raison d'être du Cigref est d'agir au service de ses adhérents et de l'intérêt général afin de bâtir le numérique durable, responsable et de confiance que nous voulons collectivement pour la société et son économie. Sa mission pour y parvenir est de développer la capacité des grandes entreprises et administrations publiques à comprendre, intégrer et maîtriser le numérique. Pour réussir sa mission, l'activité du Cigref s'articule autour de trois axes principaux, qui font sa singularité : l'appartenance, l'intelligence collective et l'influence.

En pratique, le Cigref anime les activités et services suivants au profit de ses adhérents :

- Les groupes de travail, une quinzaine par an, organisés sur les thématiques arrêtées annuellement par le Conseil d'administration. Ils sont animés et synthétisés par un chargé de mission du Cigref, et font l'objet de la rédaction de rapports articulant analyses, retours d'expériences, paroles d'experts et recommandations.
- Les cercles, qui offrent un espace de dialogue et de partage sur des thématiques générales et permettent de transmettre des informations ou des connaissances aux participants, notamment par la mobilisation d'experts. Certains cercles sont explicitement réservés, sur décision du Conseil d'administration, aux seuls Représentants et Représentants délégués.
- Des actions d'influence et de représentant d'intérêts, développées et menées au profit des utilisateurs professionnels de produits et services numériques, auprès des pouvoirs publics, tant au niveau national qu'europpéen.
- Une démarche de stratégie prospective qui propose un éclairage sur l'avenir du numérique à l'horizon d'une quinzaine d'années et un cadre de réflexion basé sur une méthode de raisonnement rigoureuse.
- Des activités de réflexion, organisées au profit des Représentants et Représentants délégués des membres du Cigref, notamment par la mobilisation de disciplines comme la philosophie, la géopolitique et la prospective.

Inria



Inria est l'institut national de recherche en sciences et technologies du numérique et a la responsabilité depuis janvier 2024 de l'Agence de programmes dans le numérique (algorithmes, logiciels et usages) pour renforcer les dynamiques collectives de la recherche française. La recherche de rang mondial, l'innovation technologique et le risque entrepreneurial constituent son ADN. Au sein de 220 équipes projets, pour la plupart communes avec les grandes universités de recherche, plus de 3800 scientifiques y explorent des voies nouvelles, souvent dans l'interdisciplinarité et en collaboration avec des partenaires industriels pour répondre à des défis ambitieux. Institut technologique, Inria soutient la diversité des voies de l'innovation : de l'édition *open source* de logiciels à la création de startups technologiques (Deeptech). Enfin, Inria promeut depuis plus de 20 ans des actions de médiation scientifique, pour et par le numérique, notamment vers les scolaires et plus particulièrement les jeunes filles, et œuvre fortement pour la science ouverte.

Moteur de la recherche et de l'innovation numérique en France et en Europe depuis plus de 50 ans, Inria veut relever le défi de la compétition en développant notamment une politique de site explicite avec les universités françaises intensives en recherche pour renforcer l'attractivité internationale de ces sites universitaires, leur leadership... et leur impact scientifique, technologique et industriel dans les domaines des algorithmes et de l'informatique quantique, du calcul haute performance, de l'éducation et du numérique, de l'intelligence artificielle, de l'Internet des objets, du logiciel, de la modélisation et de la simulation, du numérique et de l'environnement, de la robotique, de la santé numérique, et des sciences des données.

CNRS Sciences informatiques



CNRS Sciences informatiques contribue à développer, coordonner et faire connaître les recherches dans son périmètre scientifique, qui va de l'algorithmique et du calcul à la robotique et à l'interaction humain-machine, en passant par les sciences du logiciel, l'intelligence artificielle, la science des données et le traitement du signal, des images, des langues et de la parole. Ces recherches se développent en interaction avec les autres sciences (sciences du vivant et du climat, sciences humaines et sociales, ingénierie, technologies quantiques, etc.) et avec des grandes questions de société (sécurité, sobriété, santé, éducation, etc.). Elles donnent souvent naissance à des innovations, au bénéfice du monde socio-économique et culturel.

CNRS Sciences informatiques soutient les travaux de chercheurs et chercheuses engagés dans ces domaines. Avec ses partenaires académiques, il pilote une cinquantaine de laboratoires en France et à l'étranger ainsi que plusieurs programmes de recherche financés par France 2030. Il contribue à la structuration du paysage scientifique national en animant près d'une vingtaine de réseaux thématiques (GDR) et en opérant des infrastructures de recherche, notamment le supercalculateur Jean Zay.

La fondation ANTHONY MAINGUENÉ



Anthony Mainguené, ingénieur informaticien et spécialiste des réseaux et de la cyber-sécurité, était le responsable de la sécurité technique des systèmes d'information au sein de la direction du groupe Bouygues construction à Challenger (Guyancourt). Il est décédé brutalement d'une hémorragie cérébrale à l'âge de 40 ans. Ses compétences et sa conception managériale favorisant le bien-être et l'efficacité au travail, son intégrité et son sens humain, étaient reconnus de tous.

La fondation ANTHONY MAINGUENÉ, à vocation universelle, a été créée afin de transmettre son sens de l'éthique, ses idées et ses espérances. Elle est placée sous l'égide de la Fondation de France et est soutenue par le conseil régional de la Nouvelle Aquitaine.

Le monde change et la place de l'homme avec lui. La fondation souhaite faire prendre conscience que la réflexion éthique est devenue incontournable et ne peut se réaliser pleinement que dans et par l'action. L'éthique permet de s'interroger et d'agir en toute responsabilité, avec engagement, solidarité, équité et respect de l'Autre. Pour ce faire, la fondation intervient selon 5 axes : le droit, le numérique, l'ingénierie, les sciences humaines et sociales, le développement durable.

La fondation ANTHONY MAINGUENÉ promeut les prises de conscience éthiques au moyen de colloques, séminaires, enseignements, remises de prix, et s'attache à réussir le challenge de former des Femmes et des Hommes responsables qui sachent innover et œuvrer en toute liberté de conscience pour relever les grands défis d'une société en mutation.

*«L'humanité est une aventure
responsable et solidaire qui passe par l'autre.»*

Anthony Mainguené

Le syndicat Numeum

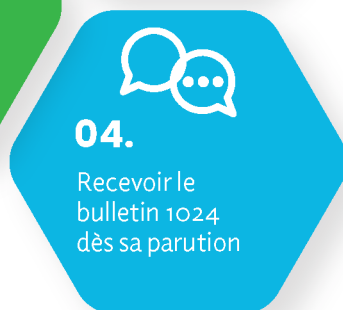
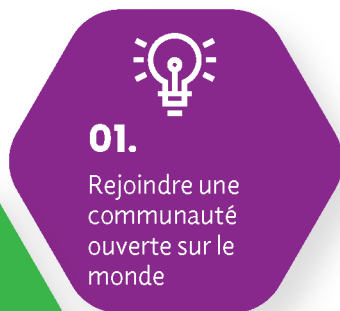


Numeum est le syndicat et l'organisation professionnelle de l'écosystème numérique en France. Il représente les entreprises de services du numérique (ESN), les éditeurs de logiciels, les plateformes et les sociétés d'ingénierie et de conseil en technologies (ICT). Numeum rassemble plus de 2500 entreprises adhérentes qui réalisent 85% du chiffre d'affaires total du secteur. Présidé par Véronique Torner,

Numeum se fixe trois priorités : les territoires, pour accompagner les adhérents en région, les compétences, pour répondre aux défis de la mixité et de l'attractivité, et le numérique responsable pour accompagner et soutenir le développement d'un écosystème numérique dans une trajectoire d'impact positif sur le plan économique, social, sociétal et environnemental à l'échelle européenne, nationale et locale.

Numeum est membre de la fédération Syntec. Le secteur du numérique représente 70 milliards d'euros de chiffre d'affaires et 670 000 employés en France. <http://www.numenum.fr>.

POURQUOI ADHÉRER À LA SIF ?



Adhérer c'est aussi

- ✚ Contribuer à la légitimité de la SIF en augmentant sa représentativité
- ✚ S'engager pour une informatique plus juste, plus éthique, plus responsable



REJOIGNEZ-NOUS !
adhesion.socinfo.fr

FAITES UN DON

Particuliers

Entreprises

Soutenez nos actions en faisant un don **défisicalisé** à la SIF



don.socinfo.fr



Avec le soutien de



Institut H. Poincaré · 11 rue Pierre & Marie Curie · 75231 PARIS Cedex 05