MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE

Liberté
Égalité
Fraternité

Décrypter le numérique, transformer l'enseignement - Cahiers thématiques

ÉduNum
Thématique

Matérialités

N° 28

Mars 2026

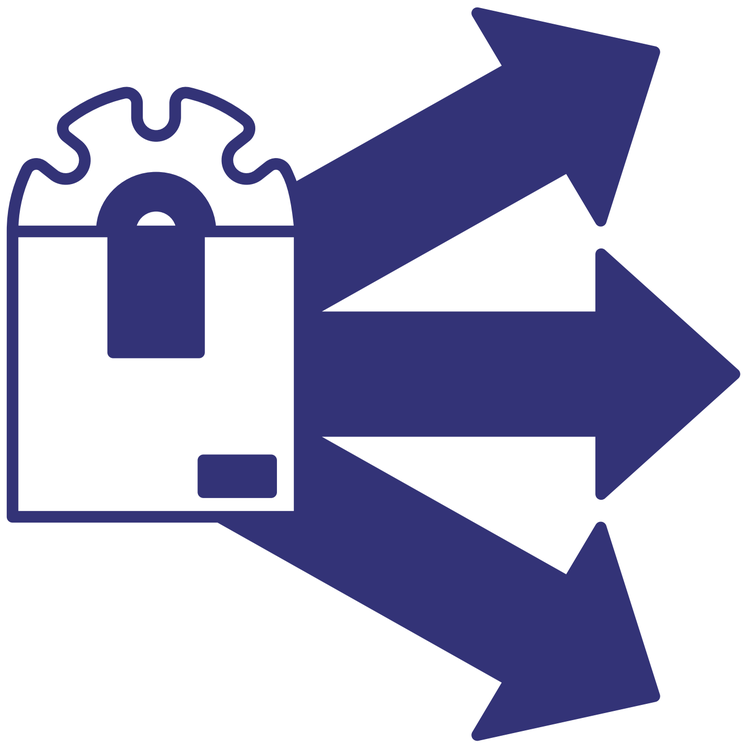
Complexe de Bayan-Obo. GeoImage du CNES. Crédit : European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery. 26 décembre 2025

J'essaie juste de comprendre le monde dans lequel nous vivons [...] La première question, ça doit être : qu'est-ce c'est ? Comment ça marche ? D'où ça vient ?

Comment l'IA peut changer le monde (et dans quel sens) ? (2024)

– Gilles Dowek

INTRODUCTION



Cette nouvelle édition thématique des cahiers d'actualités ÉduNum sur le numérique pour l'éducation explore les **matérialités du numérique**, dimension plurielle encore trop souvent noyée dans les discours sur le « cloud ». Il ne faut pas seulement prêter attention aux constellations de satellites en orbite basse ; il est tout aussi essentiel de garder à l'esprit la remarque attribuée à **Jayne Stowell**, ancienne responsable des projets de câbles sous-marins chez *Google* : « Les gens pensent que les données sont dans les nuages, mais ce n'est pas le cas. Elles sont dans l'océan ».

Le groupe de travail pluridisciplinaire *Matérialités du numérique* issu du Centre Internet et Société (CIS), centre de recherche du CNRS, met en évidence cette réalité physique (tournant matériel) en identifiant trois niveaux d'analyse interconnectés, *micro-*, *méso-* et *macro-*. Ces trois catégories peuvent servir de cadre pour mieux saisir les défis actuels et développer des solutions pédagogiques applicables dans les disciplines et les enseignements transversaux.

Il s'agit de s'intéresser, dans une « perspective métabolique » (**Loup Cellard**, **Clément Marquet**, *Matérialités environnementales du numérique.* 2025), aux flux de *matières*, d'*énergie* et d'*éléments* qui traversent et nourrissent le numérique ainsi qu'aux *enjeux géographiques* et *territoriaux*, à l'aune des discours sur l'immatérialité et la fluidité (le « nuage » et l'instantanéité) tendant encore à masquer une complexe infrastructure physique et matérielle (extractions minières, câbles terrestres et sous-marins, *datacenters*, satellites). Le vocabulaire employé participe de cette perception éthérée des objets technologiques à l'ère du déploiement des automates computationnels et d'une certaine manière à la « technorrhée » ambiante, néologisme utilisé par **Olivier Ertzscheid** pour qualifier l'alliance entre la dégradation de contenu affectant les médias sociaux et l'abrutissement numérique qui à la fois en découle ou en est la cause.
Ce cahier vise donc à effleurer cette occultation encore prégnante desdites matérialités, « la complexité des enchevêtrements techno-écologiques », les interactions continues entre couches logicielles et couches physiques, et aussi à évoquer, dans l'histoire de l'informatique, l'« invisibilisation » du travail des femmes, qualifiées à l'époque des premières machines de *computers*.

Constat curieux, parmi d'autres, on se heurte à un paradoxe, celui de l'opacité structurelle inhérente à l'ordinateur personnel et aux interfaces numériques du quotidien face à une mise en avant de leur fonctionnement censé être limpide et intuitif. Ainsi, il apparaît essentiel de distinguer les différentes strates composant le numérique : de l'extraction des matières premières minérales à la fabrication d'artefacts, en passant par les infrastructures câblières terrestres, maritimes et satellitaires, sans oublier leurs effets potentiellement perturbateurs, voire délétères, tant sur le plan anthropique que sur les écosystèmes naturels. Différents travaux cartographiques rendent compte visuellement de ces enjeux sous-jacents. Disciplines et enseignements apportent, avec le soutien de l'Inspection générale de l'éducation, du sport et de la recherche (IGÉSR), leurs éclairages didactiques et pédagogiques au sein de ce nouveau dossier.

SOMMAIRE

Immatérialité

5

- Une rhétorique de l'immatérialité
- De « l'invisibilisation » genrée à « l'hyperouranion numérique »
- Design de la transparence : illusions de lisibilité et de neutralité

Matérialités

10

- Pour une littératie numérique critique
- Le tournant matériel
- L'approche « élémentale »
- Les éléments du tableau périodique

Infrastructures en communs

27

- L'approche des communs négatifs
- Les effets féraux de l'Anthropocène
- Les infrastructures câblières benthiques : enjeux technico-juridiques
- Les centres de données
- Énergie et intelligence artificielle
- Constellations satellitaires en orbite basse

Contre-narrations cartographiques

43

- Cartographies critiques
- Des images manquantes aux images latentes
- La notion de *Stack*

Approches pédagogiques

54

- Arts plastiques - Éducation musicale et chant choral - Éducation aux médias et à l'information - Histoire des arts - Histoire et géographie - Lettres - Philosophie - Physique-chimie - SNT/NSI - Sciences et techniques industrielles - Technologie

Bibliographie

150

Postface

152

- Felipe Vilas-Boas. *Le savon des princes du Congo*, 2025

Immatérialité

C'est Monsieur qui rentre à la maison
et qui lance à Madame : « J'ai programmé
une connexion pour une visio à 19h30, je
serai en *home office* pendant une petite
heure, tu peux gérer les enfants ? »
Voilà, nous souffrons collectivement de
jargonaphasie informatique.

– ***Yann Diener***, LQI (2022)

5 Immatérialité

Les technologies numériques fonctionnent comme des dispositifs d'**occultation** et de **soustraction**. Elles tendent à cacher ou à « euphémiser » la réalité physique et matérielle, massive et tentaculaire, qui les sous-tend. Elles fonctionnent sous couvert d'une rhétorique dominante de l'immatérialité, de la fluidité et de la transparence. Derrière cet imaginaire de nuages, d'instantanéité et d'ubiquité se déploient en effet de lourdes **infrastructures câblières et satellitaires**, des **chaînes d'extraction de ressources telluriques**. Celles-ci engendrent des répercussions sociales et écologiques ainsi que la génération secondaire de ressources que des chercheurs et chercheuses qualifient de « communs négatifs ».

Une rhétorique de l'immatérialité

Un ensemble de termes et d'expressions désincarnés ont émergé dans le jargon informatique et numérique. Au-delà de l'anglicisme vaporeux « cloud », on trouve régulièrement d'autres vocables qui renforcent cette appréhension nébuleuse : « cyberespace », « sans fil », « ubiquitaire », « sans contact », « démat(érialisé) », « streaming », « en ligne », « métavers », « avatar », etc. Cette énumération, sans prétention d'exhaustivité, comprend l'expression métaphorique « changer de logiciel », répétée ad nauseam dans les organes de presse écrite et audiovisuelle, symbolisant la « jargonaphasie informatique » dépeinte par **Yann Diener**[1]. On y trouve également les *non-réunions* organisées en « distanciel » – terme technico-administratif employé par opposition lexicale à « présentiel » – grâce à des « dispositifs de facticité » où se « digitalisent » les corps et les voix à l'ère du « home office ».

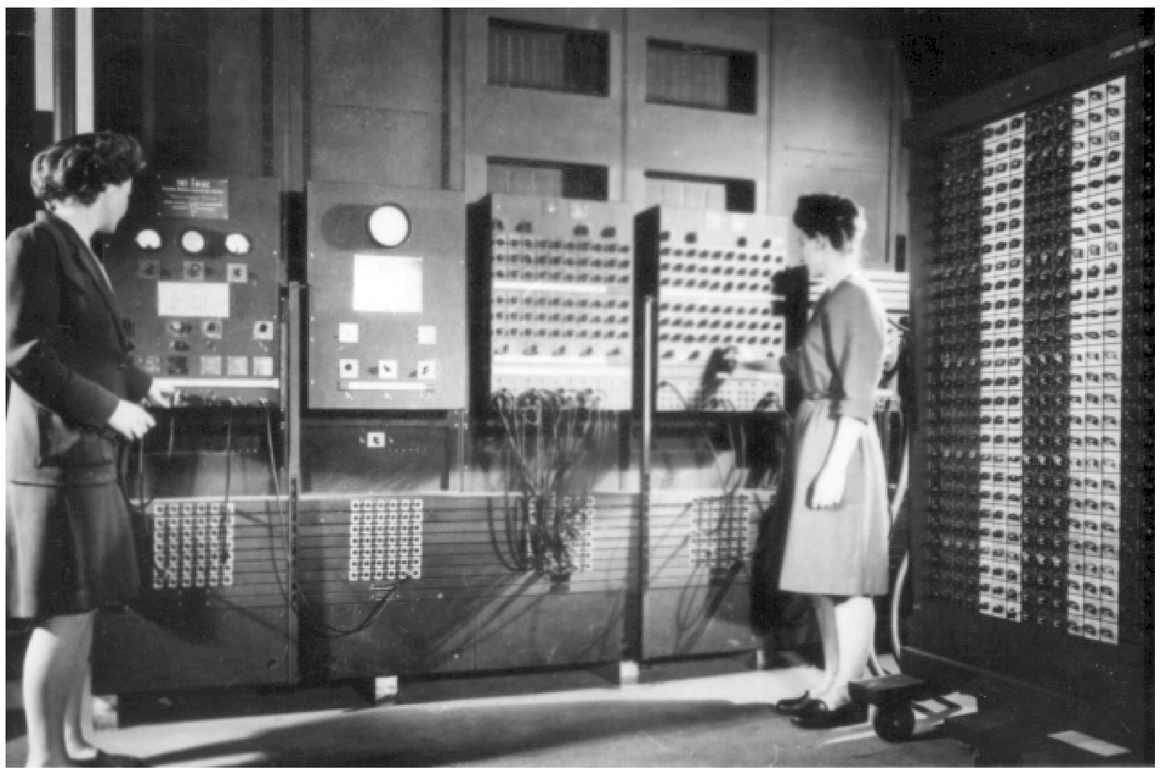
[1] Yann Diener. *LQI. Notre langue quotidienne informatisée*. Paris, Les Belles Lettres, 2022. p..87-97.

En lien avec cette frénésie langagière, **Marcello Vitali-Rosati**[2], philosophe et spécialiste d'édition numérique, évoque la figure de l'antonomase : « Les quelques logiciels propriétaires qui envahissent nos vies sont devenus les antonomases de leurs fonctions : *Word* signifie écriture, *Google* signifie recherche, *Zoom* signifie réunion. En devenant des antonomases, ces logiciels numériques achèvent le *processus de naturalisation de leur modèle et de leur vision du monde* : "googler" signifie rechercher, il n'y a plus d'autres manières possibles d'imaginer ou de faire une recherche. "On se fait un *Zoom*" devient synonyme de se voir en vidéoconférence, en suggérant, d'une part, qu'il n'y a pas d'autres manières de faire une vidéoconférence et, de l'autre, que de toute façon le logiciel est "neutre", "naturel"» (p.70, nos italiques).

[2] Vitali-Rosati, M. (2024). *Eloge du bug : Être libre à l'époque du numérique*. Zones. Lyber également accessible gratuitement en ligne et destiné à une lecture à titre personnel

De « l'invisibilisation » genrée à « l'hyperouranion numérique »

À ses origines, rappelle Marcello Vitali-Rosati l'informatique[3] est perçue comme une technologie concrète, matérielle et instrumentale, inscrite dans un ensemble de tâches techniques, manuelles et répétitives, souvent considérées comme subalternes et peu valorisantes.



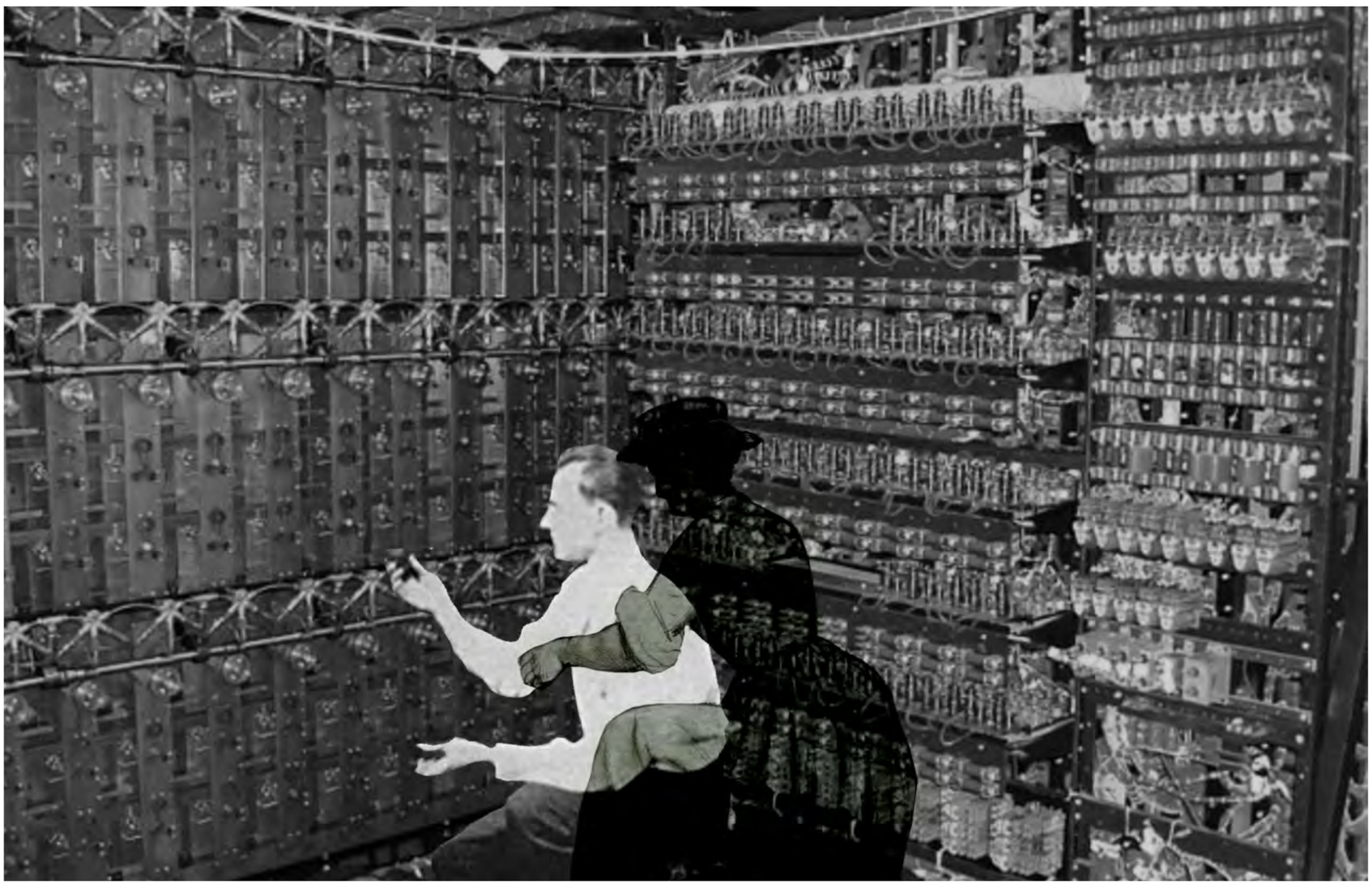
U.S. Army. *Two women operating ENIAC.* Domaine public, Wikimedia

[3] Marcello Vitali-Rosati aborde également la substantivation de l'adjectif numérique : « Numérique » devient selon l'auteur « un mot à l'usage élargi, qui n'est plus directement lié à sa signification technique et qui commence à avoir une signification culturelle globale. Comme le dit **Milad Doueihi**, "le" numérique devient une culture. Il absorbe toutes les interprétations du monde qui se produisent dans les modélisations représentationnelles ». p.56

Rembrandt Harmenszoon van Rijn. *Le philosophe en méditation*(ou *Intérieur avec Tobie et Anne*). Domaine public. Wikimedia

Ce statut devient évident pendant la Seconde Guerre mondiale grâce à l'engagement décisif des femmes dans les premiers balbutiements de l'informatique. C'est le cas des six programmeuses du premier ordinateur **ENIAC** surnommées les « ENIAC girls », Kathleen McNulty Antonelli, Betty Jean Jennings Bartik, Frances Elizabeth Snyder Holberton, Marlyn Wescoff Meltzer, Frances Bilas Spence, Ruth Lichterman Teitelbaum. Le terme « computer » signifiant « calculatrice humaine »[4], était alors utilisé pour les désigner. Elles jouent un rôle important dans le développement de la programmation de l'ordinateur électronique, sans toutefois obtenir la reconnaissance de leur apport.

Un phénomène comparable s'observe durant la même période au manoir **Bletchley Park**, siège du Government Code and Cypher School (GC&CS), agence britannique de renseignement d'origine électromagnétique, où de nombreuses femmes sont affectées à des tâches essentielles de cryptanalyse : la mathématicienne Joan Clarke ayant travaillé avec **Alan Turing** sur le décryptage d'Enigma, la décodeuse Joan Winifred Joslin Glover, les opératrices des machines électromécaniques (Bombe, Heath Robinson, Colossus) issues, pour certaines, des Wrens (Women's Royal Naval Service), telles que Jean Millar Valentine Rooker, Elsie Booker et Dorothy du Boisson.



Hanna Barakat & Cambridge Diversity Fund / *Shadow Work– Decrypting Bletchley Park's Codebreakers.* https://betterimagesofai.org / https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Comme pour l'ENIAC, ces femmes sont longtemps marginalisées dans les récits historiques (effet Matilda), en dépit de leur rôle essentiel dans les avancées technologiques et la victoire alliée. Ces exemples témoignent du caractère genré de l'occultation de la dimension matérielle, cognitive et politique du travail informatique.

Prenant l'exemple des « Harvard computers » **Isabelle Collet**, chercheuse francophone, indique : « [cette histoire] montre aussi comment la division sexuée du marché du travail fonctionne. Lorsqu'un travail apporte peu de prestige et de satisfaction personnelle, parce qu'il est laborieux et répétitif, il est dévolu aux femmes, supposées être naturellement douées pour les tâches aliénantes. Ce qui permettait à des scientifiques d'utiliser une nouvelle unité de mesure du temps de calcul : le *girl-year*. Ce travail de mathématiciennes perd ses caractéristiques scientifiques pour

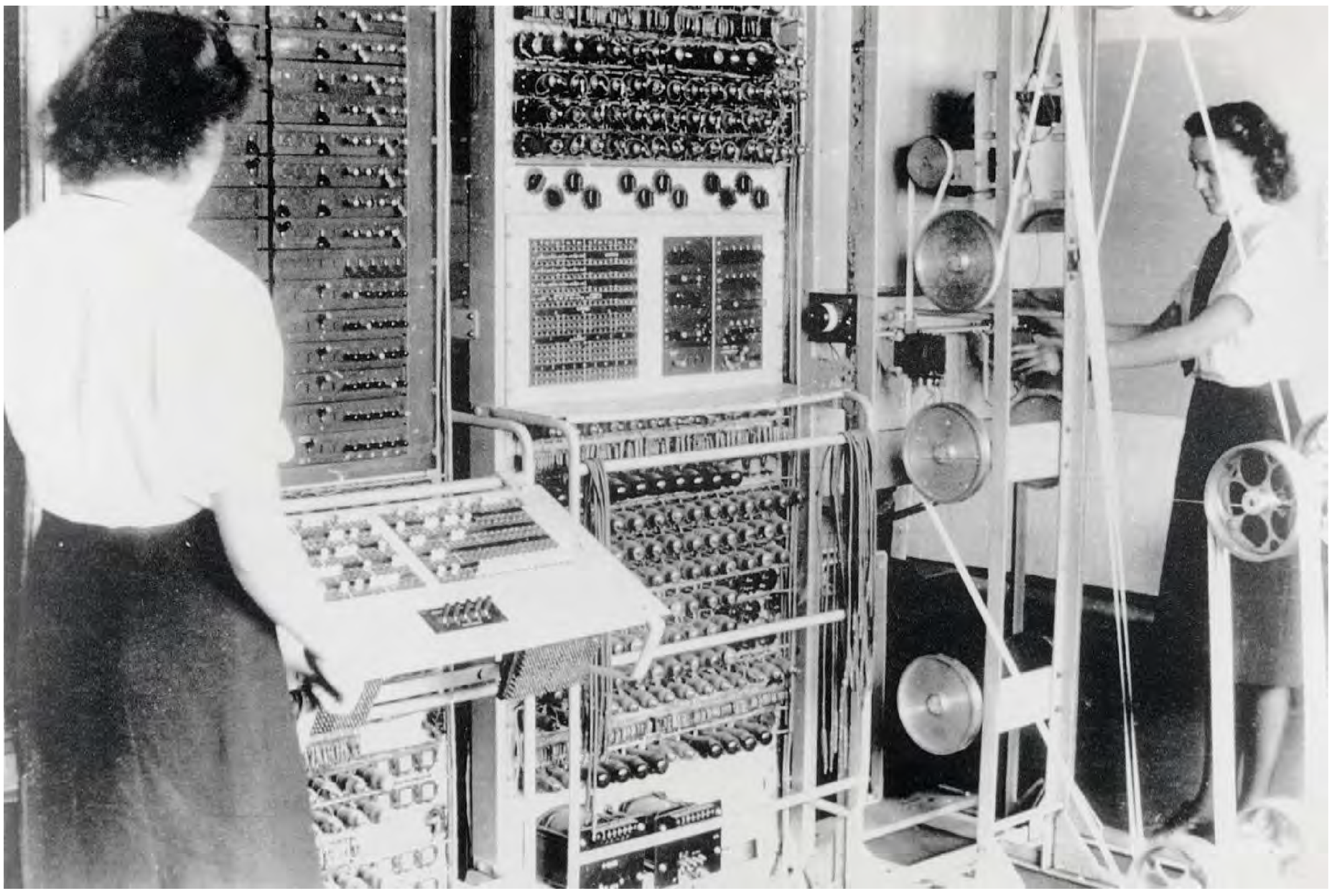
[4] Ce rôle de calculatrice avait déjà été attribué aux femmes, les « **Harvard Computers** » employées entre la fin du XIX^{e} siècle et le début du XX^{e} siècle par l'**Observatoire de l'Université Harvard** pour effectuer des calculs astronomiques. Dirigées principalement par **Edward Charles Pickering**, elles ont joué un rôle crucial dans le développement de l'astronomie moderne, en particulier dans la classification des étoiles : **Annie Jump Cannon**, **Williamina Fleming**, **Henrietta Swan Leavitt**, **Antonia Maury**, **Anna Winlock**, **Florence Cushman**, **Cecilia Payne-Gaposchkin**.

Harvard College Observatory. *Astronomer Edward Charles Pickering's Harvard computers*, domaine public, Wikimedia

On peut également citer dans ce contexte le projet *Index Thomisticus* du père jésuite **Roberto Busa** consistant à encoder l'œuvre de Thomas d'Aquin dans des cartes perforées, travail réalisé par dix-sept femmes opératrices dont **Livia Canestraro**, **Rosetta Rossi Bertolli**, **Gisa Crosta**. Voir Nyhan, J. (2023). *Hidden and devalued feminised labour in the digital humanities : On the Index Thomisticus project 1965-67*. Routledge, Taylor & Francis group.

n’être plus considéré que comme un travail mécanique d’opératrice, […] puisque ce travail est effectué par des femmes, c’est donc qu’il est de moindre valeur […] les “calculatrices” sont piégées dans la bouche générée par le système de genre »[5].

[5] Collet, I. (2025). *Le numérique est l’affaire de toutes*. Le Bord de l’Eau. p.50-52



The National Archives (United Kingdom). *A Colossus Mark 2 codebreaking computer being operated by Dorothy Du Boisson (left) and Elsie Booker (right), 1943.* Domaine public, Wikimedia

À partir des années 1980, l'informatique connaît une transformation majeure : elle est progressivement imprégnée par une *rhétorique de l'immatérialité*, étroitement liée à l'univers du virtuel, virtualité perçue comme une possibilité de liberté et d’émancipation et [déclenchant] l’émergence d’un imaginaire du numérique qui verra apparaître la figure du *hacker* – en déterminant, comme le remarque Isabelle Collet, une disparition soudaine des femmes du monde de la technologie informatique.

Cette évolution s'inscrit dans un imaginaire technolibertaire promouvant un espace numérique en opposition à la servitude matérielle à laquelle sont assujettis les êtres humains dans le monde « physique » selon la célèbre Déclaration d'indépendance du cyberespace (8 février 1996) de **John Perry Barlow** : « Gouvernements du monde industriel, géants fatigués de chair et d’acier, je viens du cyberespace, la nouvelle demeure de l’esprit […] Vos notions juridiques de propriété, […] ne s’appliquent pas à nous. Elles se fondent sur la matière. Ici, il n’y a pas de matière […] ». Dans le même temps, les grandes entreprises de la Silicon Valley développent des technologies qui, tout en répondant à un besoin fonctionnel immédiat, s'inscrivent dans une logique de solutionnisme technologique oligopolistique[6]. Les produits mis à disposition ne sont plus appréhendés comme des objets inscrits dans un monde matériel, mais comme des services dématérialisés s'intégrant à un « hyperouranion numérique », monde ubiquitaire et en apparence neutre. Cette utopie de l'immatérialité participe d'un paradigme de dissimulation systémique, où l'opacité du code, des applications, des infrastructures et des architectures logicielles contribue à neutraliser toute velléité critique, politique, sociale ou éthique. Ainsi, l'histoire matérielle, humaine et genrée du numérique, se trouve ignorée par un narratif idéologique qui naturalise les choix techniques, dans une visée prétendument intuitive, au caractère inéluctable.

[6] Benjamin Pajot. « Le solutionnisme technologique : vrais problèmes, fausses solutions ? ». *Études de l’Ifri, Ifri*, mars 2025.

Design de la transparence : illusions de lisibilité et de neutralité

La numérisation de la société engendre un impératif moral de transparence plébiscité par la majorité des citoyens. On se heurte toutefois selon **Loup Cellard**, chercheur associé au *ARC Centre of Excellence for Automated Decision-Making and Society* et **Anthony Masure**, professeur associé et responsable de la recherche à la Haute École d'art et de design de Genève (HEAD) à un paradoxe, celui de l'impénétrabilité structurelle inhérente à l'ordinateur personnel et aux interfaces numériques, face à une mise en avant de leur fonctionnement limpide et intuitif : « Les interfaces numériques dissimulent leur fonctionnement, mais fournissent dans le même temps des formes de transparence, les boîtes-noires ont toujours une façade qui peut être inspectée. Mais alors que les citoyens-usagers sont constamment aux prises avec des systèmes techniques impossibles à inspecter, la transparence des interfaces demeure paradoxalement un idéal célébré. Pour la théoricienne des médias **Wendy Chun** [...] L'ordinateur – le dispositif le moins visuel et transparent – a paradoxalement favorisé la "culture visuelle" et la "transparence" »[7].

[7] Cellard, L. et Masure, A. (2018). « Le design de la transparence. Une rhétorique au cœur des interfaces numériques ». *Multitudes*, 73(4), 100-111. https://doi.org/10.3917/mult.073.0100

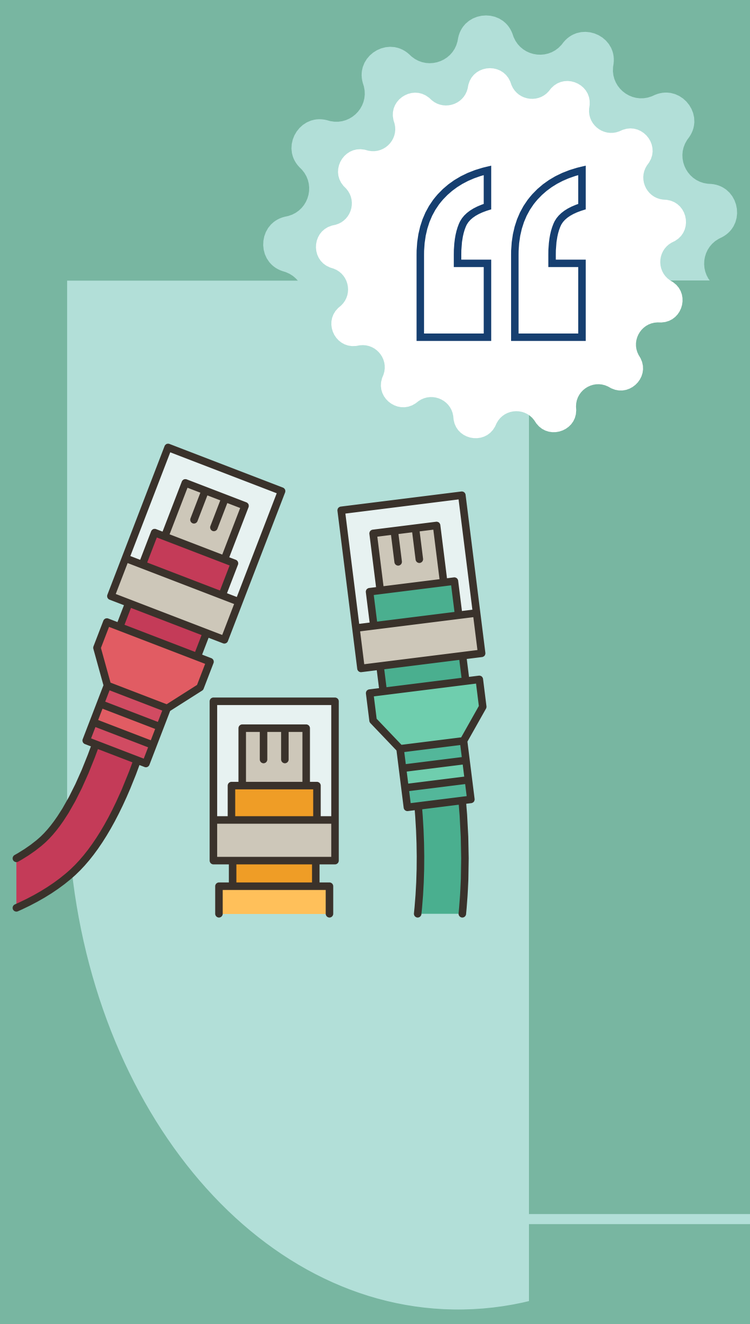
Lea Röwer, Merz Akademie. *Olia Lialina reading « Publish It On The Web ! »* CC BY-SA 4.0 Wikimedia

> Nous, utilisateurs généralistes – qui ne sommes ni hackers, ni « personnes » –, qui interrogeons, consciemment ou non, notre potentiel et celui de l'ordinateur, sommes les participants ultimes de la symbiose de l'homme et de l'ordinateur.
>
> — *Olia Lialina*

Un constat qui résonne pour les auteurs avec les méthodologies contemporaines[8] de « design centré utilisateur », « d'expérience utilisateur », et par extension de « design d'expérience » dont l'objectif est d'entretenir l'illusion d'une continuité avec le quotidien et « de présupposer que "nous" serions avant tout des utilisateurs, c'est-à-dire des êtres voués à n'entretenir que des rapports d'utilité ». En tant que designers, précisent les deux auteurs « nous soutenons qu'il n'y a pas de prise de conscience sans friction dans les usages [...] Plus que jamais nous avons besoin d'accroches, d'enquêtes et de fouilles pour négocier nos relations aux technologies : identifier les clôtures (*enclosures*) des systèmes techniques et réorienter notre capacité à inventer ».

[8] Anthony Masure « Manifesto for an Acentric Design » **version enrichie d'un chapitre de l'essai* Design et humanités numériques *(2017), traduction du français par Jesse Cohn, Berlin,* Interface Critique*, dir. Florian Hadler, Daniel Irrgang, Alice Soiné, n°2, « Navigating the Human », décembre 2019, ttps://www.anthonymasure.com/articles/2019-12-manifesto-acentric-design

Matérialités



Nous habitons Internet dans un état étrange et paradoxal. Il est partout à notre disposition, à tout moment, dès que nous le souhaitons, comme l'air que nous respirons. Mais la possibilité d'utiliser Internet sans fil nous permet d'oublier non seulement sa matérialité – des quantités infinies de métaux et de plastiques coulés et moulés dans des câbles, des routeurs, des centres de données, des serveurs, des tours et des répéteurs – mais aussi son rôle central dans nos vies. Nous sommes bercés par la croyance qu'Internet n'est qu'un moyen de communication pour les e-mails, les selfies, les réunions Zoom et les sites web qui restent trop longtemps ouverts dans les onglets non lus de notre navigateur. Ce n'est que lorsque quelque chose se brise, comme le seul câble reliant Tonga, que nous prenons conscience que l'appareil même de la vie du XXIe siècle repose sur Internet.

Samanth Subramanian

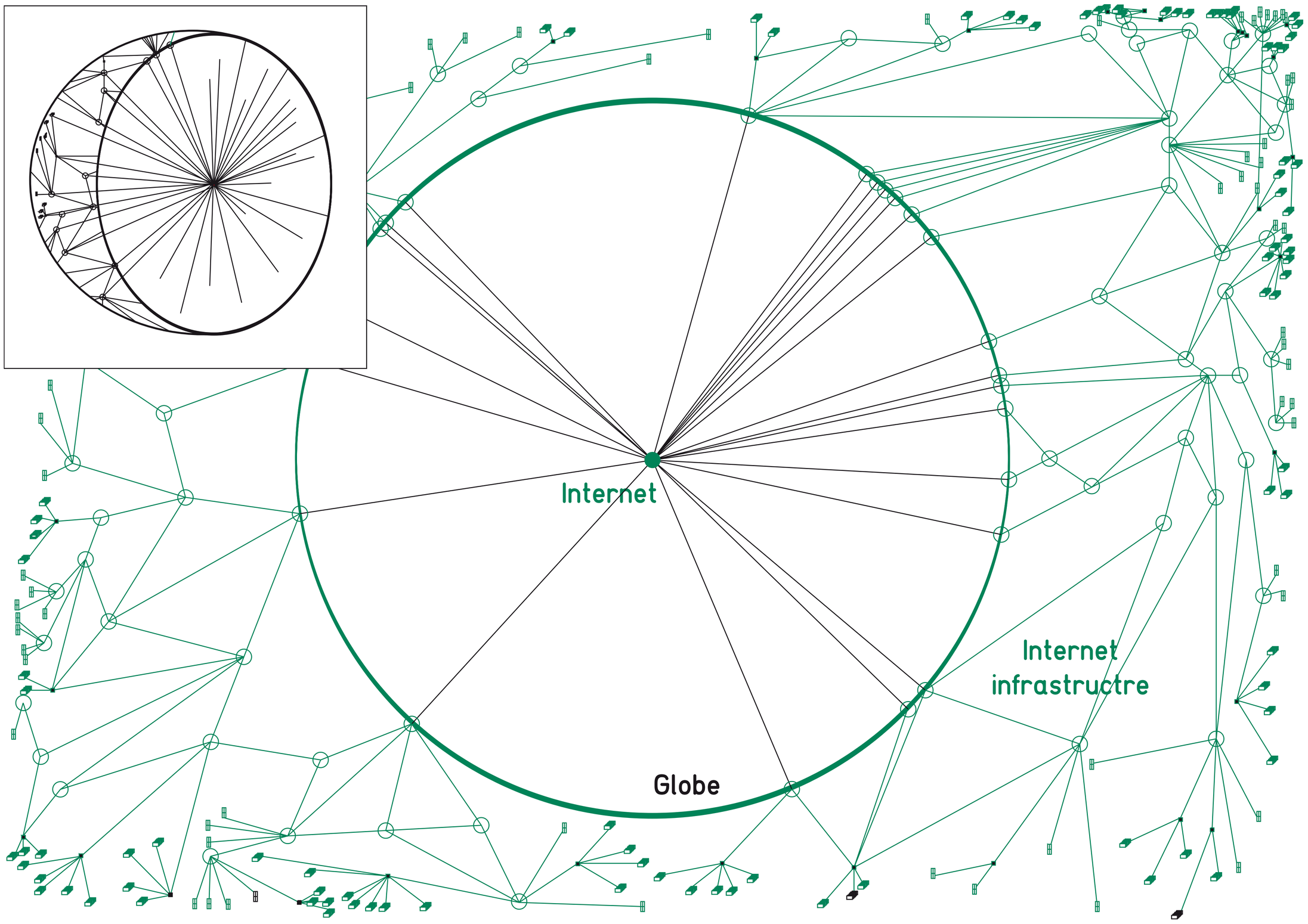
The web beneath the waves (2025)

Pour une littératie numérique critique

Cette notion de friction est à rapprocher de celle du *bug* dont Marcello Vitali-Rosati[9] élabore une typologie (l'outil cassé, l'outil complexe, l'outil inutile) et son intérêt dans l'émergence d'un esprit critique. Sans nécessairement souscrire à l'aporie numérique et à la désinformatisation radicale formulées par **Julia Laïnae** et **Nicolas Alep**[10], il demeure possible selon le philosophe d'envisager un avenir numérique alternatif, plus libre, critique et pluraliste, à condition de développer une véritable **littératie numérique** fondée sur trois piliers fondamentaux : la conscience de la multiplicité des modèles interprétatifs sous-jacents à chaque technologie et à chaque environnement, la capacité de choisir des environnements, des technologies ou des applications adéquatement complexes, la capacité à modeler l'environnement numérique pour l'adapter à ses propres besoins et éviter ainsi la mise en place d'un assujettissement ignorant, d'une dépendance totale et acritique à des technologies incompréhensibles qui sont les maîtres au lieu d'être au service des utilisateurs. Pour concourir à cette littératie il est intéressant de s'appuyer sur des représentations (carto)graphiques, voire ontocartographiques qui donnent à voir et à mieux comprendre le substrat infrastructurel des systèmes et des artefacts numériques.

[9] Vitali-Rosati, M. (2024). *Éloge du bug : Être libre à l'époque du numérique*. Zones. https://www.editions-zones.fr/lyber?eloge-du-bug

[10] Internet Actu. (2020). *Œuvrer à l'émergence d'un « autre numérique » est-il une impasse ?* Uzbek & Rica. https://usbeketrica.com/fr/article/oeuvrer-emergence-autre-numerique-est-il-impasse



Louise Druhle. *L'atlas critique d'Internet. Internet est à la fois l'infrastructure qui englobe la terre, et le lieu unique que le monde entier se partage*. CC BY-NC-SA

Le tournant matériel

Les constats effectués plus haut « entretiennent la promesse d'univers informationnels aux possibilités infinies, loin des multiples contraintes qui semblent peser sur la réalité physique. Pourtant, depuis maintenant plusieurs années, les sciences humaines et sociales se positionnent à rebours d'une telle vision du numérique en insistant sur les soubassements proprement matériels des objets, réseaux et systèmes numériques ». Dans la continuité de ce tournant dit « matériel » (*material turn*), le groupe *Matérialités du numérique* du Centre Internet et Société (CIS) • CNRS UPR 2000 / GDR 2091 organise ses réflexions autour de trois axes d'analyse évoqués en introduction et dans leur texte de présentation. L'axe n°1 est consacré aux matières premières qualifiées parfois de « rares », « critiques » ou « stratégiques » et aux composants matériels, ressources nécessaires à la pérennité des biens et services de l'industrie du numérique.

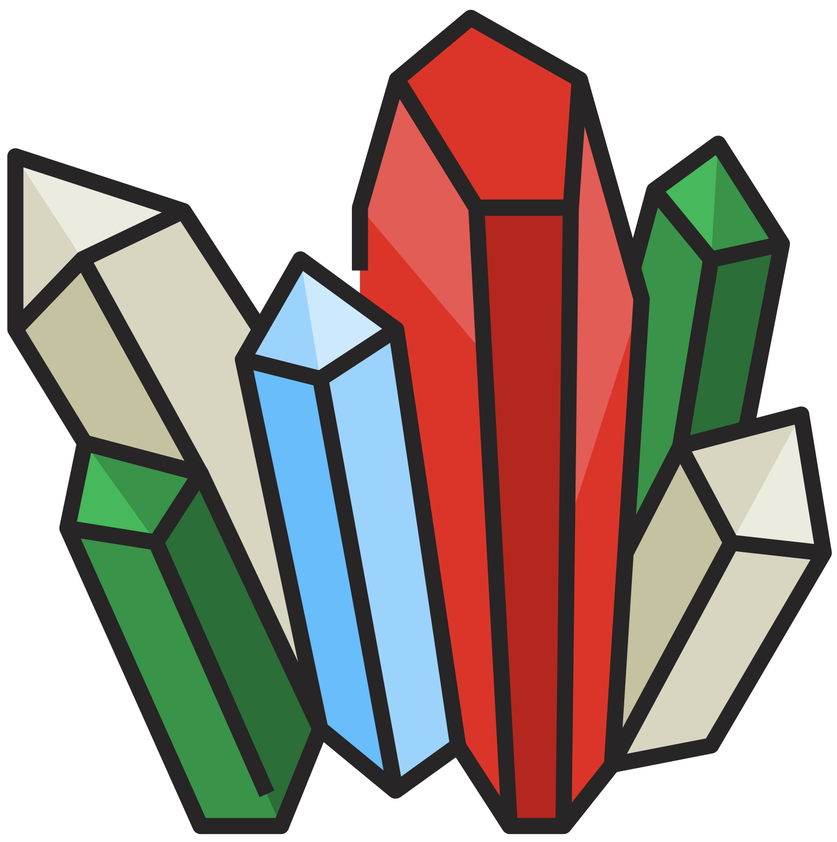
- **Échelle micro** : l'analyse à l'échelle micro s'attache d'abord aux matières premières indispensables à l'industrie numérique, qu'elles soient qualifiées ou non de « critiques » ou « stratégiques ». Ces ressources incluent le lithium des batteries, les minerais dits « de sang » comme l'étain, le tungstène, le tantale ou l'or utilisés dans la fabrication des *smartphones,* ainsi que le silicium au cœur de l'industrie des semi-conducteurs. Toutefois, l'étude des matérialités du numérique ne saurait se limiter à ces seuls matériaux minéraux. Certaines formes de matérialité, notamment organiques, demeurent sous-explorées. Ainsi, le développement historique des télécommunications a reposé sur l'exploitation de matières naturelles telles que la gutta-percha, latex végétal issu d'arbres d'Asie du Sud-Est. Ce matériau a été essentiel pour l'isolation des câbles sous-marins à la fin du XIX^{e} siècle, entraînant une surexploitation qui a conduit à la quasi-disparition de ces essences. Cet exemple met en lumière l'importance des matières organiques, végétales ou animales, dans l'histoire des infrastructures techniques.

Gutta-percha

Utilisé historiquement pour l'utilisation des câbles sous-marins de télécommunication

Silicium

Industrie des semi-conducteurs (transistors)

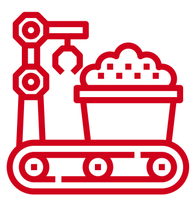


Minerais de conflits

Utilisés dans la fabrication de *smartphones* : étain, tungstène, tantale, or, etc.

Matières premières et matières premières secondaires

- Ressources minérales et organiques, naturelles et synthétiques
- Déchets d'équipements électriques et électroniques



Lithium

Batteries

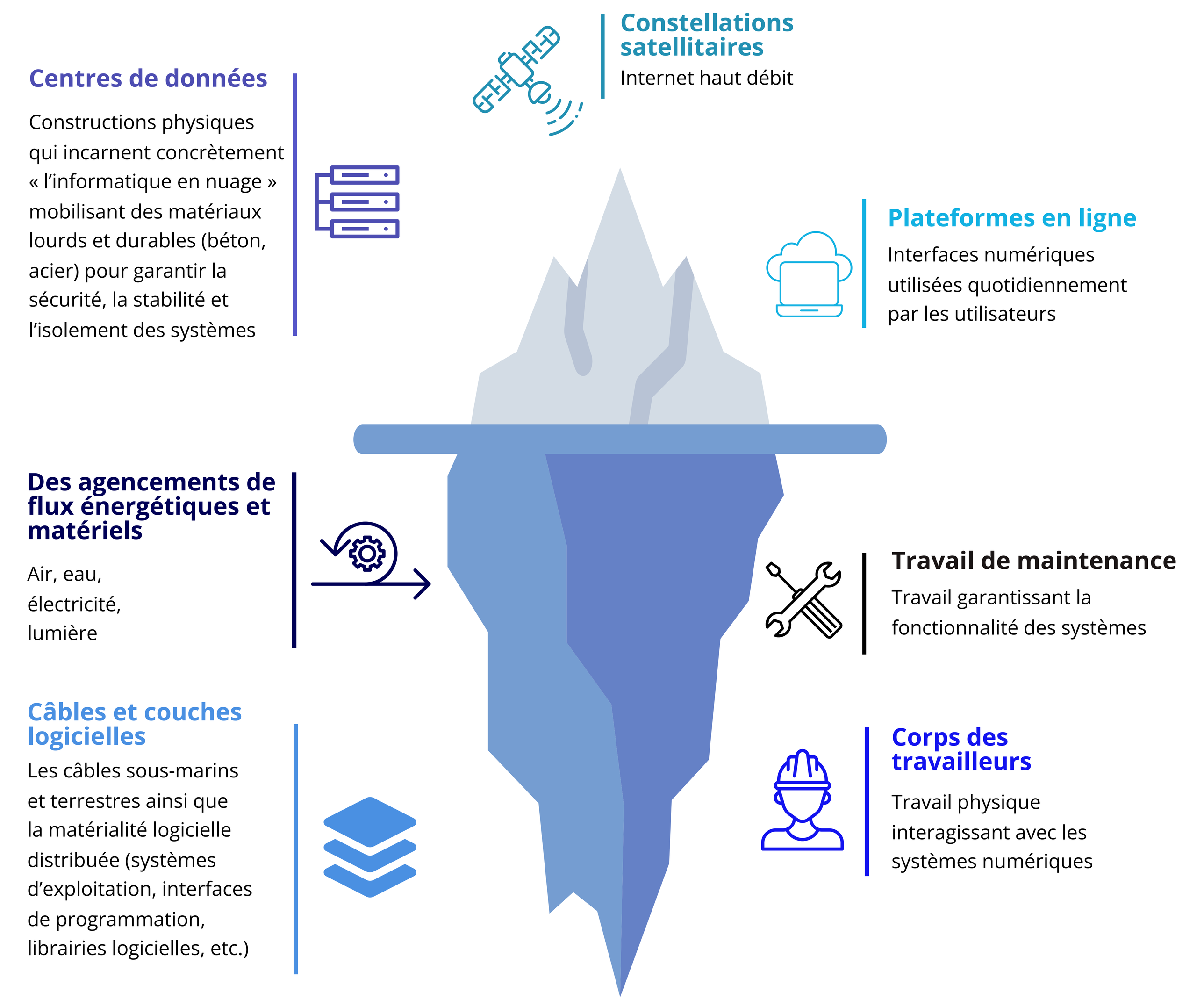
Source gallica.bnf.fr / La Cité internationale de la bande dessinée et de l'image

Les petits poissons eurent grand'peur. Ils ne furent d'ailleurs pas les seuls. Tous les poissons [...] s'échauffèrent d'effroi à la vue de cette anguille [...] Quel pouvait être ce monstre? Vous l'avez deviné, sans doute : c'était le grand câble télégraphique que l'on était en train de poser entre l'Europe et l'Amérique.
– *Hans Christian Andersen. Le grand serpent de mer. Delagrave, 1936.*

14 Matérialités

Le second axe s'attache aux dispositifs, plateformes et infrastructures.

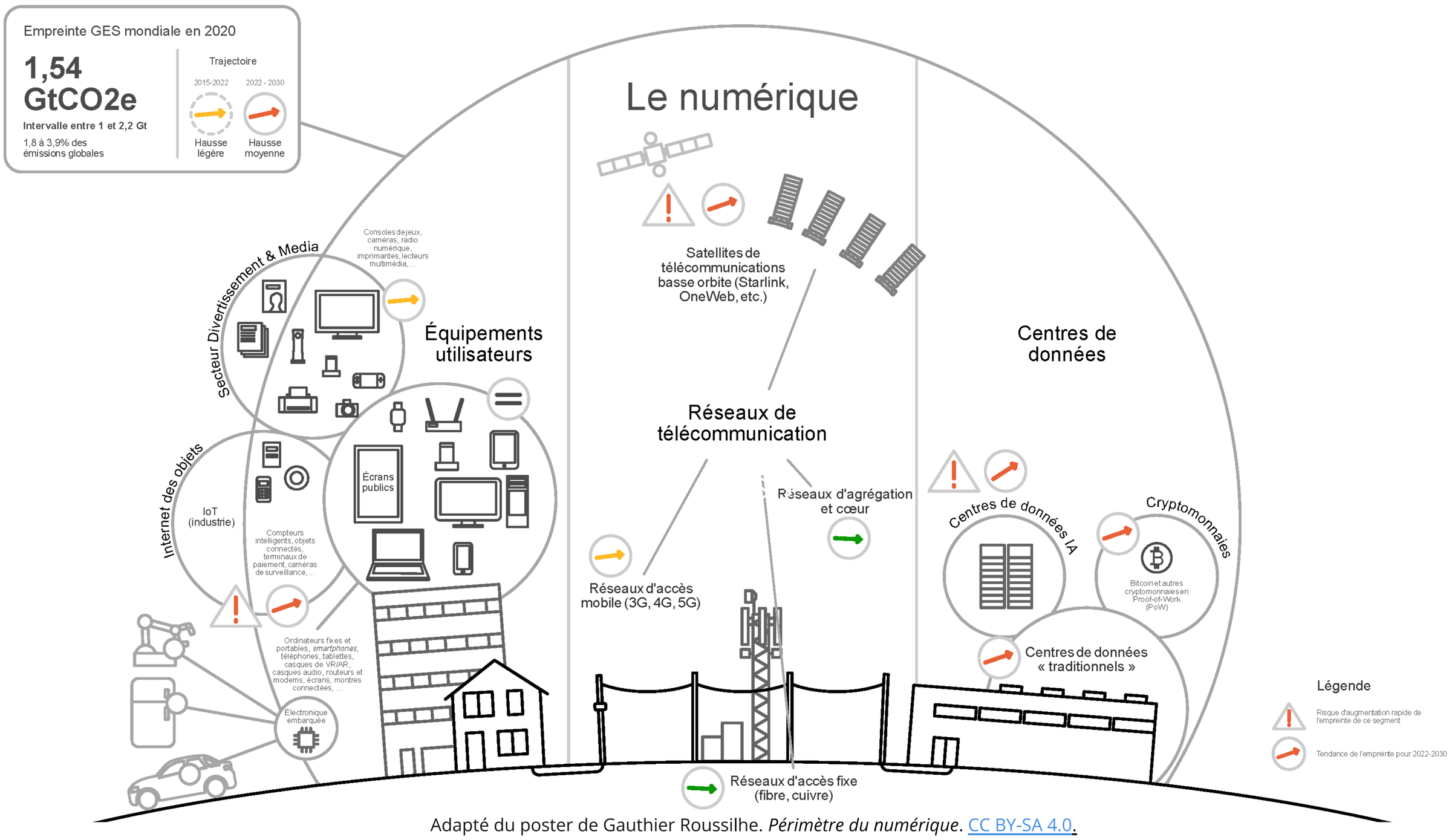
- **Échelle méso** : ce niveau examine les systèmes intermédiaires : centre de données (*data centers*), jeux de données, câbles sous-marins et terrestres de fibre optique, supercalculateurs, grilles informatiques, couches logicielles étendues, constellations de satellites de télécommunications, plateformes en ligne, etc. Invisibilisés par leur usage quotidien, ces dispositifs révèlent leur matérialité lors de pannes ou d'interruptions (*inversion infrastructurelle,* **Geof Bowker**). Le travail de maintenance est mis en lumière comme révélateur de la fragilité des infrastructures. Cette échelle met aussi l'accent sur les flux énergétiques et matériels (air, eau, électricité) et sur les corps des travailleurs qui interagissent physiquement avec le numérique.



Enfin, l'échelle macro replace les deux précédentes dans le cadre des chaînes globales d'approvisionnement et de valeur du capitalisme numérique. Elle traite des inégalités entre les régions du monde dans l'accès aux ressources, à la main-d'œuvre ou aux technologies. De nombreux cas d'étude concrets illustrent cette économie politique

matérielle : l'ambition d'un « cloud » souverain national ou européen, le déploiement controversé de la 5G, le minage des cryptomonnaies, les constellations de satellites, l'importance stratégique des câbles sous-marins et terrestres.

- **Échelle macro** : à l'échelle macro, les infrastructures du numérique révèlent des enjeux géopolitiques et économiques majeurs liés à leur ancrage matériel : les câbles transcontinentaux qui transportent la plupart des données sur Internet, sont au centre de conflits géostratégiques pour leur possession et leur protection (Google, Meta, Orange), tandis que les satellites en orbite basse (Starlink de SpaceX, Amazon Kuiper, OneWeb de l'opérateur français Eutelsat, Guowang et Qianfan pour la Chine, Sfera pour la Russie) matérialisent une course effrénée vers la connectivité mondiale suscitant des inquiétudes quant à la saturation de l'espace orbital et un possible **syndrome de Kessler**. Dans l'écosystème de la chaîne de blocs (*blockchain*) le minage de cryptomonnaies (États-Unis, Russie, Kazakhstan, Canada, Islande) coïncidant avec l'invention du Bitcoin illustre la dimension énergivore du numérique (consommation électrique). Les réseaux 5G (Huawei, Nokia, Ericsson) soulèvent des controverses sanitaires, environnementales et géopolitiques, tout comme les projets étatiques de « souveraineté numérique » (France, UE) visant à regagner une autonomie face aux « Big Tech ». Les semi-conducteurs, quant à eux, sont devenus des objets critiques en raison de leur importance cruciale dans les chaînes d'approvisionnement mondiales (*Chips Act*, tensions Chine–États-Unis). Dans ce contexte, les grands fonds marins (abysses) émergent comme un nouveau territoire à exploiter pour le numérique, avec des ressources minérales potentielles fortement convoitées (nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères, sulfures hydrothermaux, terres rares). Cependant, de profondes incertitudes écologiques et juridiques (The Metals Company et l'**AIFM, autorité internationale des fonds marins**), entourent cette exploration faisant douter de la durabilité des infrastructures numériques face aux limites planétaires.



Adapté du poster de Gauthier Roussilhe. *Périmètre du numérique*. CC BY-SA 4.0.

Cécile Douard. *La hiercheuse*. 1896. Domaine public. Wikimedia

L'approche « élémentale »

La revue *Les Temps qui restent* publie la traduction d'un article de **Nicole Starosielski**[11], professeure au Département de Film and Media Studies de l'Université de Berkeley. Cet article offre une réévaluation des études des médias (*media studies*) à partir de ses éléments constitutifs, matières et substrats. En s'inscrivant dans le mouvement « élémental », l'autrice avance une révision épistémologique, en traitant notamment la **terre**, l'**air**, l'**eau**, le **feu** comme des entités médiatiques à part entière, mettant aussi en évidence leur nature profondément relationnelle. Cette lecture *élémentale* permet d'envisager le numérique comme épine dorsale de la technosphère, ancrée dans des régimes géophysiques, thermiques, hydriques et politiques. Internet n'est pas simplement, selon l'autrice, un ensemble d'ordinateurs et de câbles contrôlés par des entreprises, mais il inclut aussi des éléments tels que l'eau et sa régulation ainsi que les systèmes de climatisation et les pratiques thermoculturelles, révélant ainsi les interdépendances entre technologies numériques et cycles naturels. Dans le même ordre d'idée, le domaine émergent des *wind humanities* (« humanités éoliennes »)[12] propose d'étudier comment le vent façonne l'expérience humaine, les processus de connaissance et les pratiques artistiques : il s'agit de dépasser l'anthropocentrisme en considérant les médias comme des éléments d'une écologie globale où la médiation s'opère *naturellement* au sein des processus climatiques et géologiques.

Arcimboldo. *Quatre élements*, le feu et l'air. Domaine public. Wikimedia

La température joue un rôle crucial conditionnant les dynamiques d'organisation des infrastructures digitales, vectrices essentielles des flux d'information : les centres de données, les serveurs, les dispositifs numériques émettent de la chaleur, laquelle doit être mesurée, canalisée, refroidie. Cela a une incidence directe sur l'emplacement des dispositifs médiatiques et l'accessibilité de l'information. Pour reprendre les propos de **Kenneth Patchett** (Facebook) rapportés par **Andrew Blum** : « Cela n'a rien à voir avec les nuages. Tout est une question de froid »[13]. La région du **Node Pole** qui englobe les municipalités de Luleå, Boden et Piteå à côté du cercle polaire arctique, voire plus largement le nord de la Suède, peut constituer une zone géographique stratégique

[11] Starosielski, Nicole. « Les éléments de la théorie des médias », *Les Temps qui restent*, Numéro 3, Automne (octobre-décembre) 2024. https://lestempsquirestent.org/fr/numeros/numero-3/les-elements-de-la-theorie-des-medias

Texte original : Starosielski, Nicole. 2019. « The Elements of Media Studies ». *Media+Environment*. https://doi.org/10.1525/001c.10780

[12] Hepach, Maximilian, Ryan Bishop, J. R. Carpenter, Jussi Parikka, and Birgit Schneider. 2024. « Wind humanities : an Elemental Media Approach ». *Media+Environment*. https://doi.org/10.1525/001c.127444.

[13] Blum, A. (2012). *Tubes: A journey to the center of the Internet*. New York, NY: Harper Collins. p.258

intéressante à étudier à cet égard. On y trouve des exemples d'extractivisme technologique de pointe : le minage de cryptomonnaies à Boden, l'exploitation minière à Kiruna et ses activités spatiales, Luleå et le vaste centre de données européen de Facebook, et l'usine de batteries lithium-ion pour véhicules électriques à Skellefteå avec Northvolt Ett, laquelle a toutefois déposé le bilan en mars 2025.

Arcimboldo. *Quatre élements*, la terre et l'eau. Domaine public. Wikimedia

Cette polarisation spatiale du numérique autour de la disponibilité énergétique (hydroélectricité, refroidissement naturel) et matérielle (proximité des ressources minières) matérialise l'interdépendance entre **technosphère** et **géosphère**.

Les éléments du tableau périodique

L'approche médiatique du numérique axée autour des archétypes traditionnels de l'air, du feu, de la terre et de l'eau, s'appuie sur « les briques fondamentales de la matière » du tableau périodique de Mendeleiev qui permet de nommer, classer et identifier les éléments chimiques mobilisés au sein des systèmes technologiques zombies[14] : par exemple, le silicium (Si) pour les semi-conducteurs, le cobalt (Co) pour les batteries, le cuivre (Cu) pour les propriétés thermoconductrices, et le lithium (Li), élément n°3, or blanc du XXIe siècle, pour le stockage électrochimique.

La matérialité minière

L'histoire de l'humanité rappellent **Jérémie Melleton**, **Anne-Sophie Serrand** et **Johann Tuduri**[15] est intimement liée à l'usage des ressources du sous-sol de la planète, issue d'une longue et complexe succession d'événements et processus géologiques. Les **ressources minérales** peuvent être classées en quatre grandes catégories : ressources énergétiques (charbon, gaz, uranium, pétrole), les minerais métalliques (fer, cuivre, nickel, cobalt, terres rares, etc.), les matériaux de construction (granulats, calcaire, cimentiers, etc.), les roches et les minéraux industriels comme le

[14] Monnin, A. (2020). « Au-delà du low tech : Technologies zombies, soutenabilité et inventions ». *Ritimo*. https://www.ritimo.org/Au-dela-du-low-tech-technologies-zombies-soutenabilite-et-inventions

[15] Melleton, J., Tuduri, J., & Serrand, A.-S. (2025). Ressources minérales : De quoi parle-t-on ? *Science & pseudo-sciences*, *352*. https://www.afis.org/Ressources-minerales-de-quoi-parle-t-on

talc ou le graphite dont la demande augmente avec l'essor des batteries lithium-ion indique **Éric Marcoux**[16], professeur émérite de l'université d'Orléans. Les premières mines à ciel ouvert remontent au moins à 44 000 ans avant notre ère tandis que leurs déclinaisons souterraines sont plus récentes (aux alentours de - 3 000 ans). Bien des millénaires et siècles plus tard, après l'instauration des premiers codes miniers au Moyen Âge, la révolution industrielle du XIX^{e} siècle accentue « le passage vers une industrie extractive s'organisant peu à peu à l'échelle planétaire et une explosion des sites d'extractions pour alimenter les industries toujours plus demandeuses ».

[16] Marcoux, É.. (2025). Roches et minéraux industriels : des matériaux de notre quotidien**.** *Science & pseudo-sciences*, *352*. p.32-39

Une **mine*** est « un gisement en exploitation », le gisement étant défini comme un **gîte minéral** qui « s'avère techniquement, économiquement et socialement exploitable ». Le vocabulaire minier distingue en outre les **réserves prouvées** ou **probables** (selon le degré de confiance en l'évaluation) qui désignent les gîtes minéraux identifiés et suffisamment quantifiés pour être jugés économiquement exploitables avec les technologies disponibles et les **ressources** qualifiant les gîtes minéraux identifiés et quantifiés comme potentiellement exploitables mais avec un degré de connaissance moindre que pour les réserves. Les ressources sont dites mesurées ou supposées en fonction de la confiance dans l'évaluation. Un **minerai** est « un minéral ou une roche dont on peut extraire avec profit un ou plusieurs éléments ». (Source : *Sciences et pseudo-sciences* 352, p.11, p.33)

* En France, on distingue les mines des carrières par la nature du produit extrait

Les métaux de la transition énergétique et numérique

La transition vers une économie bas-carbone va de pair avec le développement des technologies numériques qui requièrent de nombreux métaux dotés de propriétés spécifiques : résistance à la corrosion, stabilité thermique, conductivité électrique, propriétés optiques, etc. Ces métaux sont utilisés pour les réseaux de communication (aluminium, cuivre) et les biens de consommation (indium et terres rares dans les écrans, néodyme dans les disques durs, tantale dans les condensateurs électroniques et gallium dans la fabrication des semi-conducteurs)[17].

[17] Hache, É., Roche, Candice. (2025). Les métaux de la transition bas-carbone et numérique. *Science & pseudo-sciences*, *352*. p.24-31

Suraj Rai & Digit / *Continued Mining*/ https://betterimagesofai.org / https://creativecommons.org/licenses/by/4.0

Le **silicium** (Si) est l'élément chimique clé de l'industrie des semi-conducteurs. Il est obtenu après traitement sur de la silice (grès, quartzite) puis transformé par des procédés physico-chimiques complexes pour produire des galettes (*wafers*) très fines,

Ce terme n'est pas exagéré : on compterait aujourd'hui déjà 30 matières premières «critiques» qui pourraient manquer très prochainement - dont les fameuses terres rares.*

*relativement abondantes mais très faiblement concentrées.

Or, l'essor actuel du numérique et des énergies «vertes» dépendent largement de ces matières premières critiques...

En plus des appareils électroniques en tous genres, elles sont indispensables aux **batteries**

Une grosse voiture électrique nécessite jusqu'à **11 kg de cobalt**

éoliennes

17 kg de terres rares par pièce

panneaux solaires

...sans oublier **l'armement**

et la **robotique**

Utop'IA (avec Herji). (2025). EPFL Press. CC BY-NC-SA; p.37

pour pouvoir, à l'échelle nanométrique, y graver et répliquer en mosaïque des matrices (*dies)* à l'intérieur de « salles blanches » totalement immaculées : chaque *matrice* forme ainsi le noyau brut d'un circuit intégré contenant un ensemble de composants actifs (transistors, portes logiques, etc.) et devient, après encapsulation et individualisation (découpe), une puce électronique. Au sein de cette *infra-infrastructure du numérique*, le silicium, en tant que semi-conducteur, constitue donc le socle des composants électroniques, tandis que le lithium, à travers ses batteries, représente le vecteur énergétique emblématique. **Louis Bidou**, anthropologue et cinéaste, en propose une lecture fondée sur les principes d'une « matériologie profonde », distinguant trois corps (géologique, technologique et psychique) qui s'entrelacent dans une ontologie complexe et politique : « le lithium affecte aujourd'hui notre monde de multiples façons. Que ce soit au sein du monde minéral, d'un assemblage technologique ou de notre propre corps, il circule, réagit, se combine avec d'autres atomes, entraîne des effets plus ou moins contrôlés, induit une série d'expériences »[18].

[18] Louis Bidou, « Les trois corps du lithium », Les Temps qui restent, Numéro 4, Hiver (janvier-mars) 2025. Disponible sur https://lestempsquirestent.org/fr/numeros/numero-4/les-trois-crops-du-lithium

Des matières premières « critiques » et « stratégiques »

Dans le contexte de la transition énergétique, la demande pour les *terres* dites *rares* et d'autres *matériaux stratégiques* ne cesse d'augmenter. Un matériau est dit **critique** lorsque son approvisionnement est incertain, ce qui peut avoir des répercussions économiques importantes ; il est **stratégique** s'il est indispensable à la politique économique et de défense d'un pays. Les terres rares (TR ou éléments de terres rares, ETR) légères ou lourdes regroupent un ensemble de 16 élements (les lanthanides et l'yttrium) auquel s'ajoute parfois le scandium selon les classifications. Cette situation crée une pression sur les chaînes d'approvisionnement, les processus extractifs, de production et de raffinage, source à la fois de défis et d'opportunités. De nouveaux fronts géopolitiques émergent, notamment au Groenland et dans l'Arctique, qui sont des territoires *potentiellement* riches en ressources.

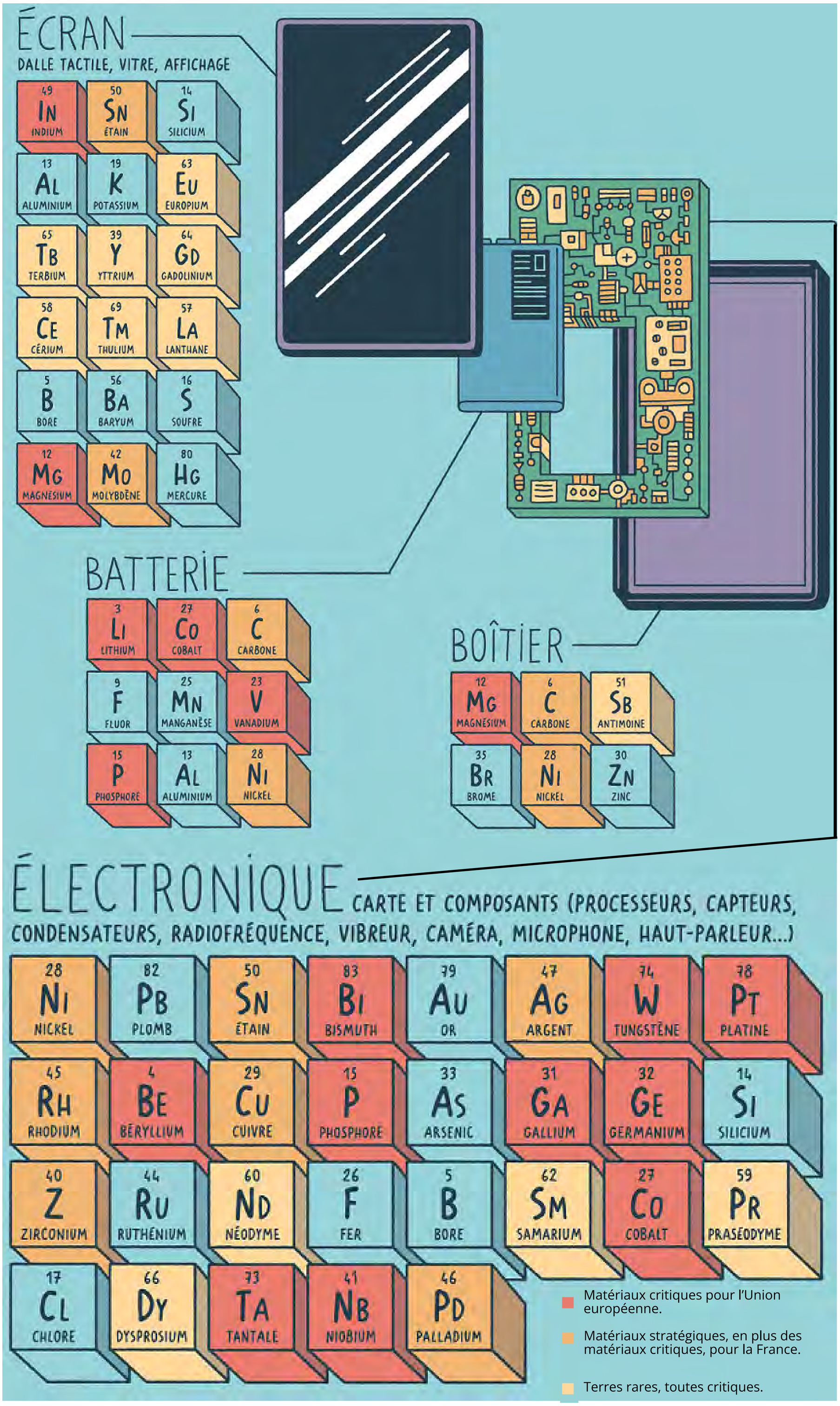
Face à cette insécurité minérale et aux diverses tensions géopolitiques, l'exploitation minière des fonds marins (*deep sea mining*) est devenue une piste complémentaire d'approvisionnement en matériaux critiques avec la présence supposée d'importants gisements de nodules polymétalliques, d'amas sulfurés ou d'encroûtements cobaltifères. Ce forage des abysses soulève moult interrogations techniques et écologiques mais aussi juridiques car l'essentiel du potentiel minier se trouve au-delà des limites des juridictions nationales (ZEE), dans ce que la **Convention des Nations unies sur le droit de la mer** (CNUDM) appelle « la Zone », et les États peinent à s'accorder sur un cadre réglementaire unifié, indiquent **Emmanuel Hache**, **Émilie Normand** et **Candice Roche**[19].

[19] Hache, E., Normand, É., & Roche, C. (2024). *E*xploitation des fonds marins : Un nouveau clivage géopolitique ? *Polytechnique Insights.* https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/geopolitique/exploitation-des-fonds-marins-un-nouveau-clivage-geopolitique/

Le téléphone portable : un métamédia emblématique

Selon le **Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives** (CEA) plus de 60 matériaux, sur les 103 éléments du tableau périodique de Mendeleïev, entrent dans la composition d'un *smartphone*. La représentation (CEA, 2021) en part de la production mondiale en matière d'extraction et de conditionnement des matériaux est la suivante : Chine (86% des terres rares lourdes et légères, 89% du magnésium, 80% du bismuth, gallium et germanium), Afrique du Sud (93% du ruthénium, 80% du rhodium, 71% du platine), Congo (59% du tantale et 64% du cobalt), États-Unis (88% du béryllium), Brésil (92% du niobium), Chili (44% du lithium), France (49% du hafnium). Pour la philosophe et journaliste **Célia Izoard**, l'extraction de ces matériaux est aussi

la cause du réchauffement climatique et provoque en outre des conflits impériaux, la destruction des sociétés autochtones et paysannes, ainsi que l'amplification de la dette écologique des pays riches. Cet extractivisme est qualifié de « barbarie numérique » par



© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives **CEA** / **J. Perrodeau**. www.cea.fr. (2021, juillet-août). Les matières premières d'un smartphone. *Les Défis du CEA*, n° 244. p.28-29. Infographie réagencée. Avec l'aimable autorisation du CEA et de l'auteur.

le sociologue **Fabien Lebrun**[20]. L'expression « minerais de sang »[21] ou « minerais de conflits » désigne surtout quatre minerais – étain, tungstène, tantale et or, regroupés sous le sigle « 3TG ». Leur production, souvent contrôlée par des groupes armés, se concentre notamment dans la région du Kivu en République démocratique du Congo (RDC), ainsi qu'au Zimbabwe, en République centrafricaine, en Birmanie et en Colombie. Le cobalt, extrait principalement dans le Katanga autour de Kolwezi en RDC, est soumis à des enjeux similaires d'exploitation et de contrôle, en raison de sa forte demande dans les technologies numériques et les véhicules électriques. Sur la pertinence du concept, **Josaphat Musamba**, doctorant à l'Université de Gand et chercheur au Groupe d'études sur les conflits et la sécurité humaine, apporte la nuance suivante : « Les récits internationaux font des minerais la cause majeure, voire unique, des conflits qui ravagent l'Est du Congo depuis plus de trente ans. Dans la réalité, on assiste à une imbrication de facteurs mêlant tensions intercommunautaires autour de la terre et du pouvoir, concurrence entre groupes armés pour le contrôle économique des territoires, manipulations politiques de l'ethnicité et stratégies d'influence régionales »[22].

[20] Lebrun, F. (2024). *Barbarie numérique : Une autre histoire du monde connecté*. L'Échappée. Préface par Alain Deneault, avant-propos de Denis Mukwege.

[21] Boltanski, C. (2011). *Minerais de sang : Les esclaves du monde moderne.* Grasset.

[22] Musamba, J. (2024). Conflits à l'Est du Congo, repenser la centralité des minerais. Dans F. Polet Congo (RDC) reproduction des prédations : Points de vue du Sud (2, p. 101-111). Éditions Syllepse. https://doi.org/10.3917/syll.cetri.2024.02.0101

Le *smartphone*, terminal sémio-technique, omnipotent et omniprésent, constitue, en particulier, selon la chercheuse **Laurence Allard**, sémiologue, maître de conférences en sciences de la communication, un cas d'usage imposant à replacer dans une perspective décoloniale du numérique. Dans *Écologies du smartphone* (2022, p.56) elle apporte cet éclairage : si on prend en considération les conditions d'extraction des matières premières dédiées à la fabrication d'un *smartphone* « menant à l'exploitation d'enfants "creuseurs" au Congo RDC à la recherche de cobalt ou de coltan utilisés pour les batteries ou les micro-condensateurs, le fait extractiviste ne renvoie plus seulement à une métaphore littéraire mais renvoie directement une violence subie. [...] entre exploitation de la vie humaine et des limites planétaires, entre technologie zombie et mortifère, entre compagnon d'existence connecté et support d'attachements en tout genre, le *smartphone* manifeste une ambivalence tendancielle. Dans un contexte d'effondrement anthropocénique, [...] il s'agit de concevoir une techno-biopolitique basée sur des scénarii de ré-création et de réparation, [ouvrant] sur la nécessité de penser un numérique décolonial dans le cadre conceptuel harawayen d'une écojustice multispécifique au sein des (s) cènes du vivre avec le trouble »[23][24].

> Everybody say, No Congo No Phone,
> All my people sing No Congo No Phone,
> yeah we cry every day, No Congo No Phone,
> All my people say, No Congo No Phone.
>
> **No Congo No Phone**
>
> — *BM* (2017)

[23] Haraway, D. (2017). Anthropocène, Capitalocène, Plantationocène, Chthulucène. Faire des parents. *Multitudes*, *4*(65), 78. https://www.multitudes.net/anthropocene-capitalocene-plantationocene-chthulucene-faire-des-parents

[24] Haraway, D. J., & García, V. (2020). *Vivre avec le trouble*. les Éditions des Mondes à faire.

Deux exemples sont mis en avant par l'autrice (p.64, p.70) : la campagne *No Congo No Phone* du rappeur BM relayée par l'association **Génération Lumière** invitant à cesser le défilement de *posts* et à se concentrer sur des images représentant des enfants des mines et *Pigeon Blog* (2006) de l'artiste ingénieure **Beatriz Da Costa** qui harnache des columbidés en les équipant de petits sacs à dos contenant capteurs de pollution, outils de géolocalisation et « téléphone portable », projet artistique de sciences citoyennes où « s'assemblent les oiseaux, les technologies et les êtres humains ». La diaspora congolaise organise régulièrement des rassemblements devant les magasins et sièges de grandes entreprises technologiques – Apple, Tesla, Google, Dell, Microsoft ou

encore Samsung – pour dénoncer le travail des enfants[25] dans les mines de cobalt en RDC. Ces mobilisations visent à interpeller les multinationales sur leur responsabilité dans leurs chaînes d'approvisionnement et à exiger davantage de transparence et de contrôle. Plusieurs plaintes ont même été déposées, notamment aux États-Unis, accusant ces entreprises de complicité dans l'exploitation infantile. Ces actions traduisent la pression constante exercée par la diaspora pour défendre les victimes et pousser les géants de la tech à assumer pleinement leurs responsabilités.

Suraj Rai & Digit. *Continued Opportunity* / https://betterimagesofai.org / https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Pressions extractives : vulnérabilités écologiques et humaines

Le film documentaire *Le Sang et la Boue* (2025) du réalisateur **Jean-Gabriel Leynaud** témoigne de cette situation : il se déroule dans le village de Numbi, situé dans la province du Sud-Kivu à l'est de la République démocratique du Congo et donne la parole à des habitants du village, hommes, femmes et parfois enfants, qui creusent à mains nues dans la boue, munis de leurs seules pelles, pour tenter d'extraire quelques grammes de coltan (colombo-tantalite), minerai composé de tantale (Ta) et de niobium (Nb) destiné, entre autres, à la conception de condensateurs miniaturisés.

Numbi est au coeur du conflit opposant l'Alliance fleuve Congo/Mouvement du 23 mars (AFC/M23) aux forces armées de la République démocratique du Congo (FARDC). Jean-Gabriel Leynaud indique : « Il était important pour moi que ce soit un film choral

[25] Selon l'ONG Amnesty international et l'Unicef, les enfants creuseurs dans les nombreuses mines artisanales de RDC ont généralement entre 5 et 14 ans, avec un âge d'entrée fréquent autour de 7 ans pour débuter les travaux. Ils effectuent des tâches très dangereuses : creuser, porter des charges lourdes et manipuler des minerais sans réelle protection. Plus de 6 200 enfants ont été identifiés dans le Haut-Katanga et le Lualaba, tandis que les estimations totales dans tout le pays peuvent atteindre 40 000. Ces enfants vivent souvent avec leurs familles dans des conditions précaires proches des mines, exposés à de nombreux dangers tels que les éboulements, les violences, et même des tirs à balles réelles par la police chargée de sécuriser les sites. Quant aux filles, elles sont nombreuses à travailler dans les mines, souvent dans des tâches similaires à celles des garçons, comme le creusement, le transport et le tri des minerais. Cependant, elles sont fréquemment oubliées ou « invisibilisées » dans les statistiques et doivent subir des risques accrus, notamment des violences sexuelles et un accès limité aux protections sociales. Ainsi, leur travail informel et précaire, souvent occulté, les rend encore plus vulnérables face à l'exploitation et aux abus.

et que le montage marie les différentes perspectives des protagonistes. Je voulais englober les étapes et les conséquences de l'extraction du coltan et montrer que chacun de ces personnages incroyables n'est qu'un rouage d'une machine qui le dépasse » (Dossier de presse, p. 13). Le film décrit ainsi, « sans esthétisation de la misère », des

> Un voyage immersif qui révèle le revers de notre confort numérique : un monde où certains enterrent leurs rêves dans la boue pour que nous puissions rester connectés aux nôtres.
> – ***Jean-Gabriel Leynaud*** (2025)

conditions de travail extrêmement précaires et dangereuses, dans un contexte d'instabilité, de violence et de conflit. Ce sont des vies humaines brisées, souvent sans perspectives, embourbées dans un système informel, artisanal et néocolonial générant des profits colossaux, au service des circuits mondialisés de la production électronique.

© Jean-Gabriel Leynaud. *Safari sur mine*. Le sang et la boue (2025). Avec l'aimable et gracieuse autorisation de l'auteur. Droits réservés.

La situation en RDC trouve un écho dans le combat mené par les communautés indigènes du nord de l'Argentine pour empêcher que leurs déserts salés ne deviennent une zone sacrifiée au service de la lutte contre le dérèglement climatique. Le film documentaire *Au nom du lithium* (*En el nombre del litio)* réalisé par les cinéastes **Tian Cartier** et **Martin Longo** et diffusé sous licence creative commons BY-NC-SA dépeint les deux visions du monde qui s'y affrontent : d'un côté, celle des communautés autochtones des *salares* défendant leurs traditions et l'écosystème (l'équilibre de la Pachamama), et de l'autre, celle du monde contemporain dans son besoin désespéré de trouver dans les gisements lithinifères (« extractivisme vert ») une alternative au pétrole.

Le film évalue, selon **Barbara Galindo**[26], le projet minier à travers un prisme éthique pachacentrique, illustrant ce que l'autrice définit comme un « cinéma cosmocentrique », dénonçant l'exploitation du lithium comme une forme de torture écosociale, susceptible d'entraîner l'épuisement environnemental de l'écosystème salin.

[26] Galindo, B. (2025). Visualising Lithium Extraction as the Decapitation of Mother Salt in Cartier and Longo's En el nombre del litio (2021). *Bulletin of Latin American Research*, 44.

La zone des Salinas Grandes des provinces Jujuy et Salta se trouve dans le « triangle du lithium », néotoponyme désignant l'espace tri-frontalier, Argentine, Bolivie et Chili, formé de bassins endoréiques contenant une concentration de sels, nommés *salares*. Chacun des « angles » de ce triangle correspond à un *salar* en particulier : en Argentine le *salar* d'Hombre Muerto, en Bolivie le *salar* d'Uyuni et au Chili le *salar* d'Atacama.

Les enjeux d'exploitation et de gestion du lithium au Chili fait par exemple l'objet d'un scénario pédagogique mené en classe de seconde en histoire-géographie au sein de l'**académie de Normandie** ; la problématique est formulée ainsi en titre : *Comment l'environnement du désert d'Atacama est-il soumis à des pressions croissantes du fait de ses ressources en lithium, sources d'enjeux majeurs et multiscalaires ?*

Francesco Mocellin. *Désert de sel d'Atacama au Chili. À l'horizon, les volcans Tumisa, Lejía et Miñiques*. Wikimedia. CC BY-SA 3.0

En parallèle des enjeux liés à l'extraction du lithium en Amérique du Sud et du coltan en Afrique centrale, l'importance stratégique du complexe minier chinois de Bayan Obo illustre à quel point la concentration des ressources critiques, quelles que soient leurs zones géographiques, conditionne désormais les dynamiques économiques et environnementales mondiales.

Bayan Obo[27] constitue un gisement d'envergure exceptionnelle, capable de fournir l'intégralité du spectre des terres rares, qu'elles soient légères ou lourdes, et utilisées dans les aimants permanents, les batteries, les écrans, les technologies de défense, etc. S'étendant sur approximativement 50 km², la mine comprend quatre principaux gisements qui produisent du minerai de fer, du niobium et, surtout, des terres rares stratégiques, totalisant plus de 175 minéraux différents. L'exploitation de ce site engendre des répercussions mondiales majeures : en 2019, il était à l'origine de 45 % de la production mondiale de terres rares, ce qui en fait une installation stratégique de premier plan. Bayan Obo alimente le socle industriel, technologique et scientifique de Baotou, aujourd'hui reconnue comme la capitale mondiale des terres rares. Toutefois, les coûts sociaux élevés et les graves atteintes écologiques soulèvent la question de la viabilité du modèle de croissance chinois dans la région.

[27] Dossier du CNES *Chine - Mongolie intérieure : les terres rares de Bayan Obo et Baotou, un enjeu technologique mondial* élaboré par **Laurent Carroué**, Inspecteur général de l'Éducation nationale, du sport et de la recherche, directeur de recherche à l'Institut Français de Géopolitique (Université Paris VIII)

Infrastructures en communs

Le continuum électrico-numérique compose une complexe infrastructure dont on peine à distinguer les rouages, trop grands, trop complexes. Pour démêler la rouerie infernale de la mégamachine, il faut revenir à la base : l'infrastructure et ses câbles.

– ***Fanny Lopez.*** À bout de flux (2022)

28 Infrastructures en communs

Le « tournant matériel » du numérique implique de reconnaître non seulement le substrat minier, mais également les exhalaisons et formes résiduelles, incontrôlées et souvent délétères produites par les systèmes technologiques. Deux concepts mitoyens, « communs négatifs » et « féralité », permettent à cet égard d'étudier cet autre revers caché de la matérialité du numérique.

L'approche des communs négatifs

Selon le glossaire de Politique des communs édité sous CC BY-SA par le collectif **Remix the commons** la notion de « commun négatif »[28] développée par **Alexandre Monnin** et **Lionel Maurel** désigne des réalités matérielles ou immatérielles perçues négativement telles que les déchets, les centrales nucléaires, les sols pollués, le « 7e continent » de plastique, les friches industrielles, les espèces invasives, voire les idéologies. L'enjeu de cette approche consiste à en prendre soin collectivement (*commoning*) sachant que tout commun est d'abord un *incommun*[29] chargé d'une conflictualité, amenant Monnin à distinguer les *ruines ruinées* des *ruines ruineuses* et à s'interroger sur le numérique comme vecteur d'utopie ou de dystopie car fondamentalement non viable.

[28] Attribuée en 2001 aux sociologues **Marie Mies** et **Veronika Bennholdt-Thomsen** dans Monnin, A. (2023). *Politiser le renoncement*. Éditions Divergences. p.32

[29] Anthropologica. Vol. 59 No. 2 (2017): The Uncommons

La production de déchets selon **Marion Ficher**[30] n'est pas qu'un simple phénomène matériel : elle s'inscrit dans des rapports mondialisés socioécologiques injustes, système désigné sous le terme *Poubellocène* par **Marco Armiero**. Ces matérialités infrastructurelles « invisibilisées » du numérique, une fois abandonnées, dépassées, non fonctionnelles, deviennent une combinaison de subtances dangereuses, polluantes et toxiques pour les écosystèmes et la santé humaine. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) constituent des vestiges industriels nécessitant une gestion collective de maintenance ou d'élimination, sans aucune capacité biogénératrice pour le système et le vivant mais pouvant toutefois servir de solution d'économie circulaire par le recyclage et devenir ainsi des communs-déchets, potentiel gisement de ressources à valoriser.

[30] Ficher, M. (2025). « Invisibilisation infrastructurelle de l'IA ». *Terrain, 82*, 187-201.

L'autrice analyse les flux et reflux de déchets à différentes échelles, macro, meso et micro, en évoquant notamment le recyclage informel[31] pratiqué dans les villages-déchets comme Guiyu en Chine ou dans des décharges telle que le site toxique d'Agbogbloshie au Ghana (officiellement « fermé » depuis 2021), celui d'Olusosun au Niger ou Old Seelampur en Inde alors que la convention de Bâle (Bâle 2025) régule fortement l'exportation ou l'importation de déchets dangereux. L'économie du numérique, conclut la chercheuse, crée finalement trois types de ruptures : paysagères (transformations créées par la surconsommation et la colonisation des espaces par les rebuts), biodiversitaires (invasion de substances toxiques et polluantes dans les écosystèmes) et métaboliques (gestion informelle à haut risque pour les populations réceptrices des déchets qu'elles n'ont pas produits).

[31] Documenté en 2017 entre autres par les photographies de **Kai Löffelbein** dans son ouvrage *Ctrl-X. A topography of e-waste.*

Ces zones anthropogènes enfrichées voient s'accumuler, se dégrader et s'épanouir des « pelures de silicones enkystées, des carcasses d'aluminium rongées, des fragmentations de céramique et de verre, des emmêlements de câbles et de cuivre érodés, des sédimentations d'innombrables géométries de polymères, de magnésium ou d'acier »[32], retour féral à la terre et au monde minéral, engendrant de nouvelles substances liées aux processus géologiques et réactions physico-chimiques (érosion,

[32] **Boissinot, G.** (2025). « Intelligences minérales ». *Terrain, 82*, 207-211.

acidification, lixiviation, réactions entre minéraux, action de l'eau, du vent, des micro-organismes). Ces agrégats et formes hybrides constituent une nouvelle matérialité issue d'une interaction complexe entre l'héritage anthropique et les forces naturelles, rejoignant le « bestiaire de l'Anthropocène » élaboré par le regretté **Nicolas Nova**[33].

[33] Nova, N. (avec Disnovation.org). (2024). *Bestiaire de l'anthropocène. Art&fiction.*

FMichaud76. *Anthropocene layer* — Travail personnel, Wikimedia CC BY-SA 4.0

Les effets féraux de l'Anthropocène

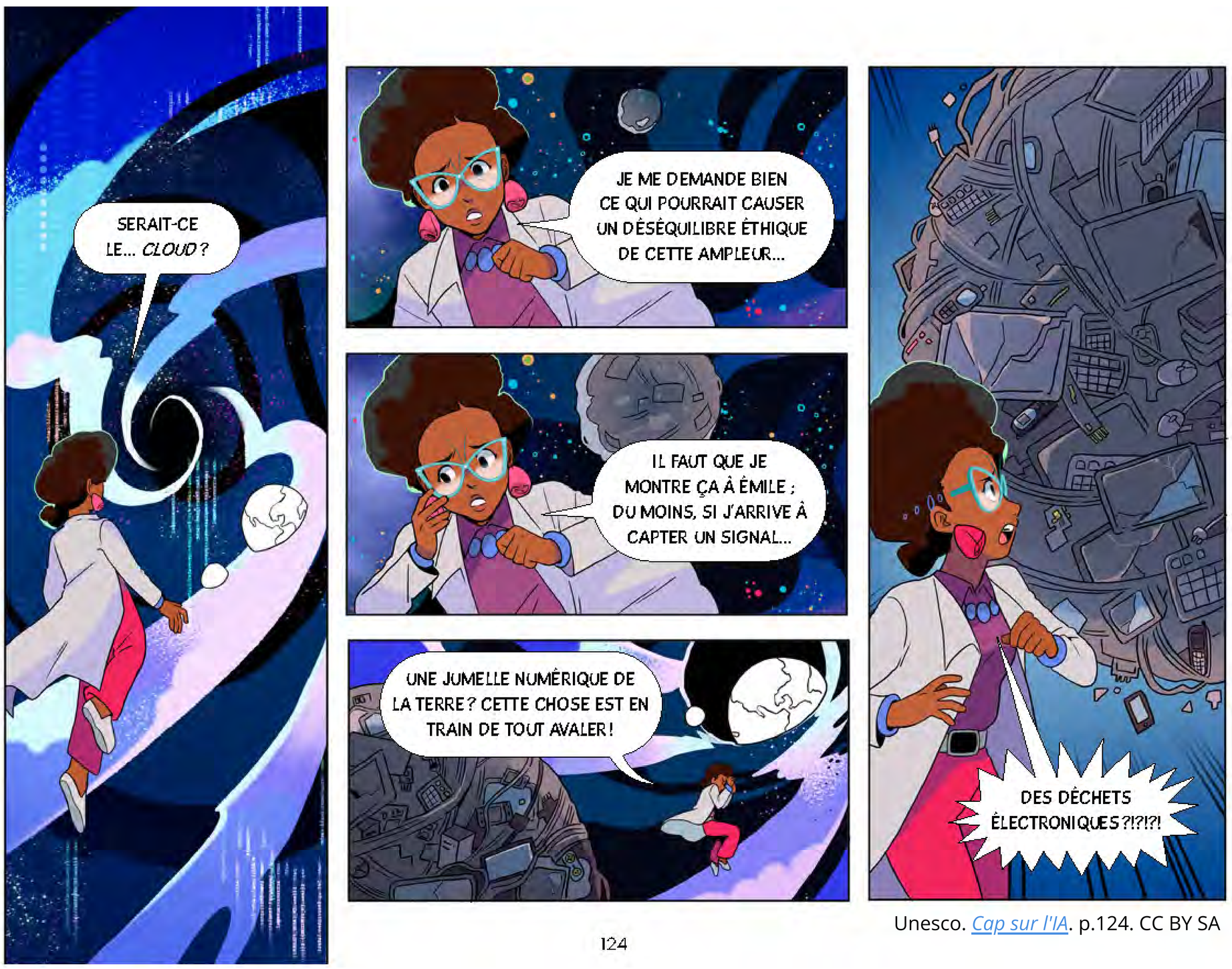
Yves Citton met à cet égard en discussion les communs négatifs avec deux notions mitoyennes, celles de féralité et de remantèlement. Selon l'auteur, s'appuyant sur le projet collectif d'*Atlas féral* conçu et édité par **Anna L. Tsing**, **Jennifer Deger**, **Alder Keleman Saxena** et **Feifei Zhou**, « la féralité permet de repérer et d'analyser des dynamiques écocidaires dans lesquelles les infrastructures techniques mises en place par une certaine civilisation déclenchent des proliférations à la fois artificielles (puisque causées par ces infrastructures) et naturelles (puisque spontanées, *non-designed*) transformant dramatiquement nos environnements, au point de les rendre inhabitables pour les espèces (humaines et autres qu'humaines) qui y subsistaient. Les études menées en termes de féralité aident donc à comprendre les causalités croisées (voire enchevêtrées) à travers lesquelles les infrastructures qui nous nourrissent pourrissent nos habitats »[34]. L'auteur préconise donc une écologie du remantèlement, « [parce] qu'il s'agit d'infrastructures (et non seulement de comportements individuels), parce que ces infrastructures relèvent désormais souvent d'échelles continentales, et parce que nous ne pouvons que sentir la disproportion paralysante entre nos puissances d'agir individuelles et les défis planétaires, il n'y a pas à s'étonner que nos subjectivités se trouvent assaillies par des "angoisses de néantisation" ».

[34] **Citton, Y.** (2023). « Les communs négatifs entre féralité et remantèlement ». *Multitudes, 93(4)*, p.91-99. https://doi.org/10.3917/mult.093.0091.

En point de convergence, la féralité peut être confrontée au concept d'**agromine** ou d'agrominage (*agromining*®)[35], qui constitue, selon les conditions édaphiques, un champ de recherche visant à étudier l'extraction des métaux stratégiques tels que le nickel à partir de plantes comme l'alysson des murs (*Alyssum murale*) cultivées sur des sols contaminés ou minéralisés (sols ultramafiques). Plus précisément, l'agromine comprend deux parties, en amont, la **phytoextraction**, culture de **plantes hyper-accumulatrices** de métaux sur des sols ou autres ressources secondaires contenant des métaux et en aval le traitement de la biomasse des plantes pour récupérer les métaux d'intérêt sous des formes utilisables industriellement. Ces deux dynamiques[36] peuvent potentiellement coexister ou s'autoalimenter : les plantes férales peuvent en effet idéalement devenir des vecteurs de dépollution naturelle, voire inspirer des pratiques extractives plus écologiquement vertueuses.

[35] **Mollier , P.** (2020). « Extraire des métaux avec des plantes : l'agromine ». *INRAE*. https://www.inrae.fr/actualites/extraire-metaux-plantes-lagromine

[36] **Simmonot, M.-O.**, **Morel, J. L.**, **Laubie, B.**, & **Echevarria, G.** (2023). L'agromine, filière de valorisation des métaux contenus dans les sols. In *Le recyclage, enjeu pour l'économie circulaire*. ISTE éditions.



Unesco. *Cap sur l'IA*. p.124. CC BY SA

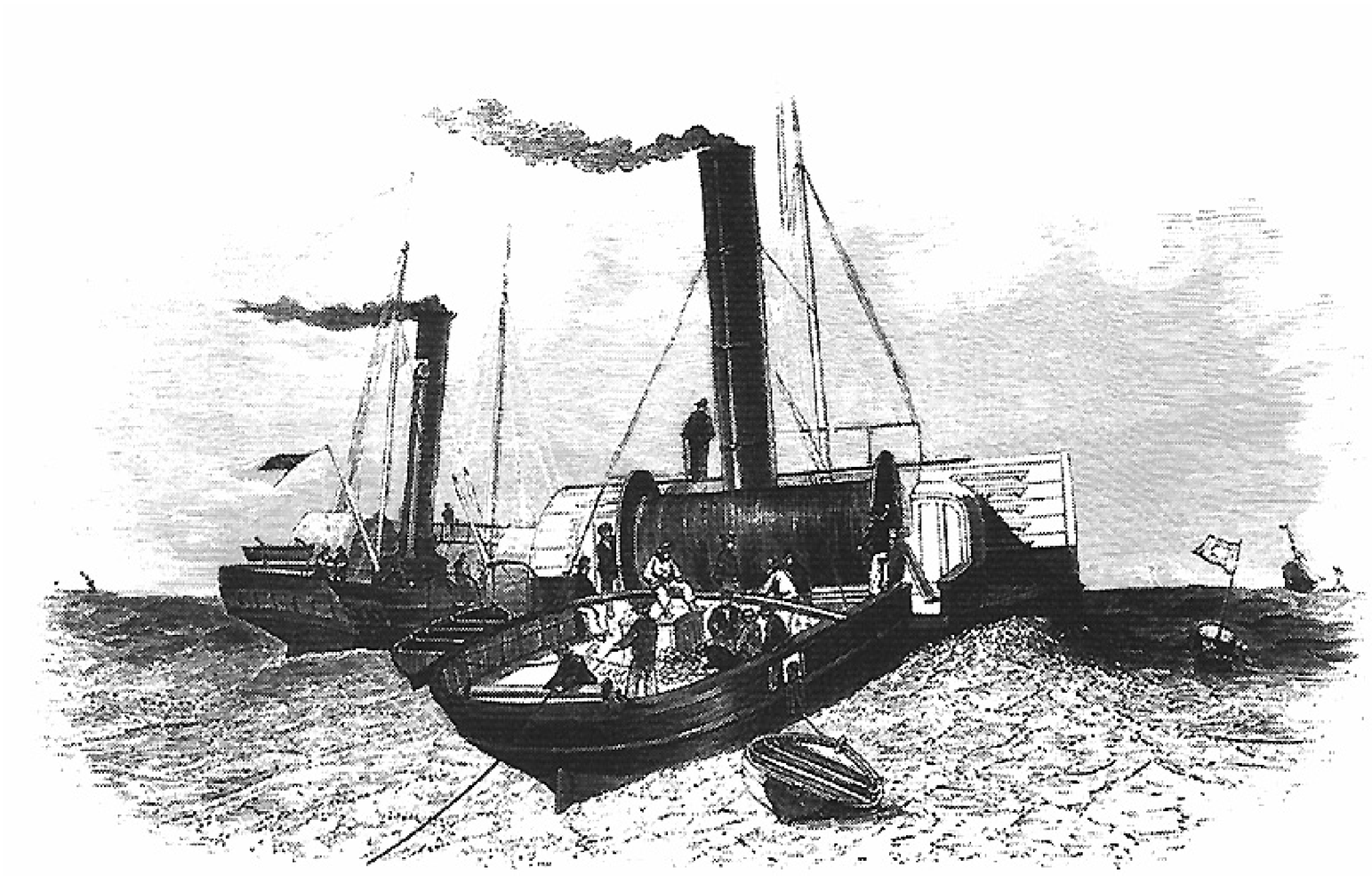
¶ Les infrastructures câblières benthiques : enjeux technico-juridiques

Les câbles de l'Internet : de l'ère télégraphique au projet « Waterworth »

L'histoire des câbles sous-marins remonte aux travaux pionniers de **John Watkins Brett**, qui fut le premier à imaginer une telle liaison. Toutefois, c'est l'invention de l'isolation à la **gutta-percha** – découverte attribuée à **William Montgomerie** en 1843 et perfectionnée par **Werner von Siemens** – qui rendit ces projets câbliers techniquement viables. Le 28 août 1850, **John Watkins Brett**, à bord du remorqueur *Goliath*, posa le premier « câble » sous-marin entre le cap Gris-Nez, en France, et le cap Southerland, au Royaume-Uni, histoire narrée dans le livre blanc d'Agnès de Cayeux. Le véritable jalon commercial durable fut établi en 1851, par le remorqueur *Blazer* avec la liaison télégraphique entre Douvres et Calais. Par la suite, **Cyrus Field**, **Charles Bright** et **John Brett** réalisèrent un véritable exploit en installant le premier câble

transatlantique en 1858, après plusieurs échecs. Ce premier succès resta cependant fragile et ce n'est réellement que dans les années 1860 que des câbles transatlantiques opérationnels furent installés, ouvrant une ère d'échanges stables à grande échelle.

Dès les premières décennies de ces déploiements, la nécessité de protéger juridiquement ces infrastructures vitales s'imposa[37]. La Convention internationale pour la protection des câbles sous-marins, adoptée le 14 mars 1884 à Paris, constitua le premier cadre normatif global en interdisant la rupture des câbles et en prévoyant des sanctions. La Convention de Genève sur la haute mer de 1958 confirma la liberté de poser des câbles et des pipelines sous-marins tout en renforçant les obligations des États en matière de protection et de réparation des dommages. Enfin, la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM), adoptée à Montego Bay en 1982, codifia l'ensemble du régime juridique international : elle garantit la liberté de poser et d'entretenir des câbles sous-marins au-delà de la mer territoriale et impose aux États de ne pas entraver ces opérations (articles 112 à 115) ; elle instaure un régime de coopération internationale pour la protection de ces infrastructures essentielles aux communications mondiales. Ces instruments, intégrés dans le droit international de la mer, assurent un équilibre entre liberté d'installation et obligations de protection.



Personnel PTT. *Goliath*. Domaine public. Wikimedia

L'ère télégraphique, fondée sur des transmissions codées en Morse, perdura jusqu'aux années 1950. Une étape majeure fut franchie avec la mise en service du câble **TAT-1** (*Transatlantic Telephone Cable System*), le 25 septembre 1956, reliant Oban en Écosse à Clarenville dans la province de Terre-Neuve-et-Labrador au Canada. Ce fut le premier câble téléphonique transocéanique, marquant l'entrée dans une nouvelle phase des communications, le tout premier de ce type ayant été ensouillé en 1891 entre Sangatte et Saint Margaret par le câblier *Monarch*. Plus tard, en 1988, le **TAT-8** inaugura l'ère des câbles sous-marins à fibre optique, reliant la France, l'Angleterre et les États-Unis, et ouvrant la voie à l'infrastructure globale d'Internet. Le XXIe siècle voit grandir la place prise par les grandes entreprises du numérique avec l'installation des câbles *Dunant* (Google), *Marea* (Meta et Microsoft) et *Curie* (Google), concurrence imposée aux propriétaires traditionnels (opérateurs de communication), même s'ils restent dépendants des équipementiers et des armateurs existants. En février 2025, Meta annonce son projet « Waterworth », câble sous-marin de 50 000 kilomètres destiné à relier les cinq continents. Les câbles sous-marins, en tant que maillons essentiels

[37] **Camille Morel** souligne que les câbles sous-marins sont très liés à la maîtrise de l'information. En 1898, L'Empire britannique censura l'information transitant par les câbles lors de la crise de Fachoda. Plusieurs câbles allemands furent également coupés au début de la Première guerre mondiale par la Grande-Bretagne.

de la connectivité mondiale, sont par nature vulnérables : au-delà des aléas naturels maritimes et géologiques (glissements de terrain, séismes, tsunamis, attaques de sélachimorphes) ou des accidents humains liés aux activités halieutiques (pêche, dragage), on assiste à des opérations de coercition et de sabotage, par exemple dans le détroit de Taïwan ou le golfe d'Aden[38]. La surveillance des câbles est désormais au cœur de la compétition géopolitique et constitue un enjeu de cybersécurité et de souveraineté.

> “ Au début de l'année 2025, on estime à **plus de 1,48 million de kilomètres de câbles sous-marins** en service à travers le monde. Bien que nous n'en entendions pas souvent parler, les **défaillances de câbles sont courantes**. Selon l'International Cable Protection Committee, environ **200 réparations sont nécessaires chaque année.** ”
>
> *- Alan Mauldin (TeleGeography)*

Les systèmes câbliers[39] portent des noms acronymes, fonctionnels, mythologiques ou historiques, et sont recensés au nombre d'environ 597 selon les dernières données publiées par Teleography (Submarine cable map 2025). Le projet **SEA-ME-WE 6** illustre parfaitement la confrontation sino-américaine sur ce marché : l'attribution du contrat à l'Américain **SubCom** a en effet entraîné le retrait forcé des opérateurs chinois du consortium (éviction de **HMN Tech**). Ces derniers ont répliqué en lançant leur propre projet alternatif baptisé **EMA** dans le but de garantir une voie de communication Asie-Europe indépendante de l'influence des États-Unis. Cette initiative laisse présager une éventuelle bifurcation, voire une fragmentation[40] accrue d'Internet – aux multiples nuances (géopolitique, juridique, etc.) – comme le suggère le mot-valise *splinternet*[41].

Le musée des télécommunications PK Porthcurno situé à l'extrémité de la pointe des Cornouailles occupe la station où convergeaient la majorité des câbles sous-marins télégraphiques de l’empire britannique. Un panneau affiché au sein dudit musée affirme qu'il faudrait 74 jours pour transmettre un livre Harry Potter par télégraphe, contre 0,000006 seconde par câble à fibre optique (Subramanian, p.32). Au-delà de l'anecdote, cela souligne la prédominance des câbles en matière de transport de données pouvant aller théoriquement jusqu'à 340-400 térabits par seconde, soit 400 000 fois le débit d'une box internet en fibre optique, tandis que Starlink envisage une bande passante descendante vers l'utilisateur d'environ 1Tb/s, soit un rapport de 1 à 400. On comprend alors mieux encore leur rôle crucial en matière de transactions financières mondiales (réseau Swift).

L'avenir d'Internet passera selon Subramanian[42], en partie, par la militarisation de ses systèmes de câbles sous-marins. Après tout, pour reprendre les mots de l'auteur, l'information est source de richesse et de pouvoir, non seulement par la manière dont on l'utilise, mais aussi par la manière dont on peut la contrôler.

[38] **Sophie Muffat** mentionne que le sabotage des câbles sous-marins, pouvant être posés jusqu'à 8000 mètres d'abysse, sont implantés à faible profondeur en mer Rouge, les rendant plus accessibles, et dont certains auraient été endommagés par les Houthis.

Muffat, S. (2025). *Géopolitique de la piraterie*. PUF. p.162-63

[39] **Subramanian, S. (2025).** *The web beneath the waves : The fragile cables that connect our world*. Columbia Global Reports 2025. p.46

[40] **Nocetti, J.** (2024) « Un Internet en morceaux ? Fragmentation d’Internet et stratégies de la Chine, la Russie, l’Inde et l’Union européenne ». *Études de l’Ifri, Ifri*.

[41] **Laugée, F.** (2023). « Splinternet ». *La revue européenne des médias et du numérique.*

[42] Subramanian, S. (2025). p. 25

33 Infrastructures en communs

Les câbles sous-marins électriques

Pour prolonger l'étude de la question câblière, la **Fondation méditerranéenne d’études stratégiques (FMES)** souligne que le développement des câbles de télécommunications occulte une autre réalité, peut-être encore moins connue, celle du réseau de plus en plus important et sensible des câbles électriques sous-marins haute tension (CCHT ou *HVDC*), les fonds marins s’imposant définitivement comme un nouvel espace de rivalités économiques et géopolitiques résumées dans cette infographie. Ces câbles sont conçus pour transporter l’énergie électrique, notamment issue de parcs éoliens *offshore* ou pour interconnecter des réseaux électriques entre continents ou îles. Ils relèvent de logiques techniques différentes mais rejoignent les premiers par leur rôle de support au système numérique mondial, en matière d’alimentation énergétique et de connectivité. Ils sont également de plus en plus exposés aux mêmes risques physiques et géopolitiques susmentionnés : accidents, catastrophes naturelles, cyber-sabotage, espionnage, ou interventions militaires.

© Hans Hillewaert. *Éoliennes sur le parc éolien de Thorntonbank*. CC BY-SA 4.0, Wikimedia

La Fondation méditerranéenne d’études stratégiques souligne à cet égard que « la crainte d’une action hostile d’un État s’est matérialisée avec la coupure récente, le 25 décembre 2024, du câble électrique sous-marin *Estlink 2* qui relie la Finlande à l’Estonie. Les autorités finlandaises ont rapidement identifié le pétrolier *Eagle S*, appartenant à la "flotte fantôme" russe, d’avoir causé ces dommages en traînant son ancre sur le fond et n’ont pas hésité à dérouter le navire vers un port finlandais ». Une visualisation cartographique est proposée par la FMES : elle permet d'apprécier la situation européenne en matière d'infrastructures sous-marines électriques. 👉

Les câbles électriques sous-marins en Europe

© Institut FMES. (2025). *Les câbles électriques sous-marins en Europe*. https://fmes-france.org/les-cables-electriques-sous-marins-en-europe.
Avec l'aimable et gracieuse autorisation de la Fondation Méditerranéenne d'Études Stratégiques. Droits réservés.

Les centres de données

Internet rappellent **Cécile Diguet** et **Fanny Lopez** s'appuie sur une infrastructure qui se décompose en trois grandes matérialités[43] :

- les réseaux (fibres optiques, réseaux cuivre, réseaux sans fil) ;
- les centres de stockage de données (*datacenters*) ;
- les terminaux des utilisateurs (*smartphones*, ordinateurs, tablettes, objets connectés, etc.).

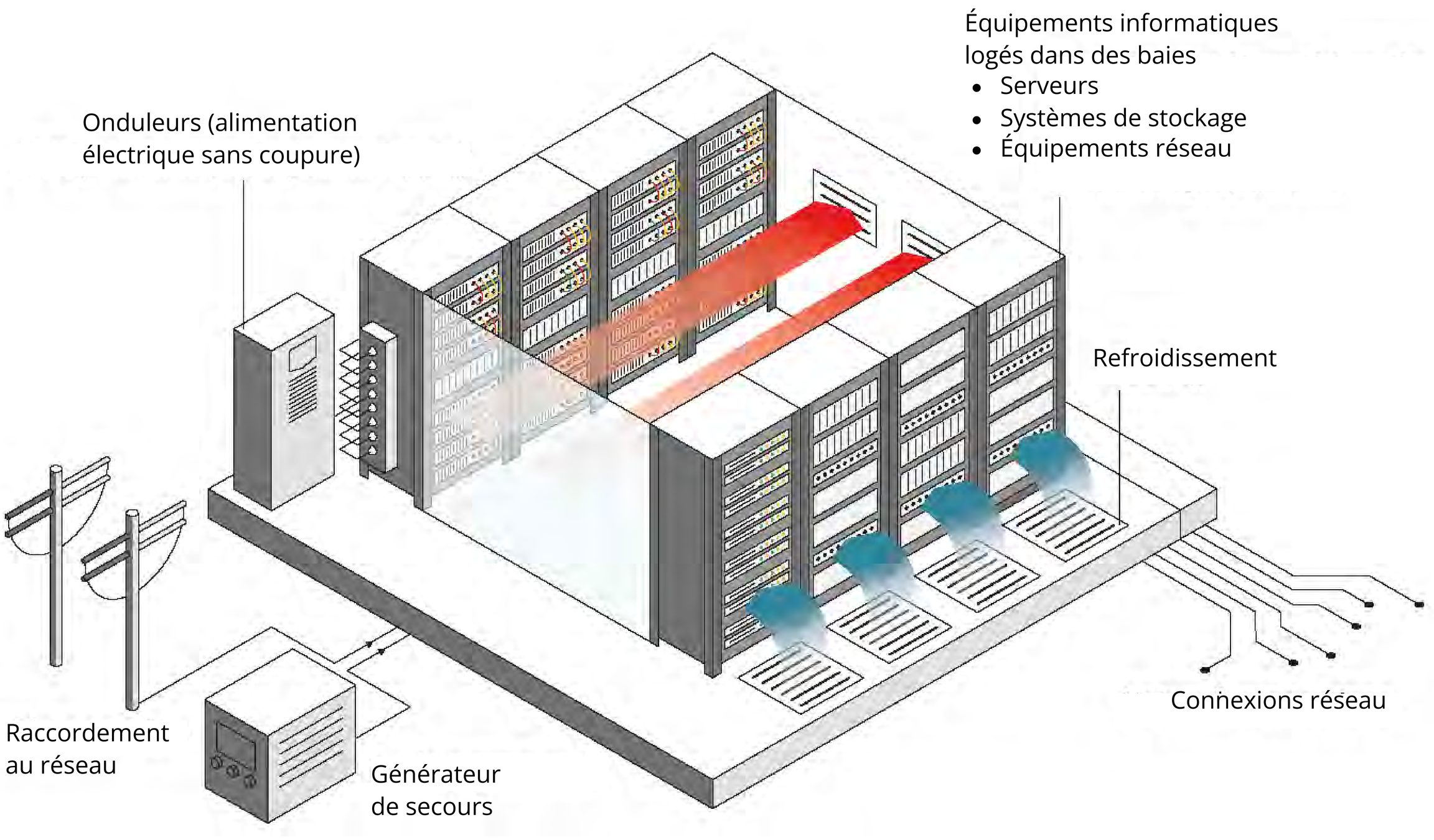
[43] **Diguet, C.**, **Lopez, F.** (2019). *L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires*. Rapport Ademe. p.8

Fanny Lopez souligne que l'infrastructure numérique a un double, l'infrastructure électrique, et que ce continuum electrico-numérique[44] nécessite toujours davantage de centres de données pour interconnecter et traiter lesdites données ainsi que des infrastructures de production et de distribution électrique pour les faire fonctionner.

[44] **Lopez, F.** (2022). *À bout de flux*. Éditions Divergences. p.12

Les centres de stockage de données (*datacenters*) se définissent selon les autrices précitées comme des bâtiments-machines d'hébergement qui accueillent un ensemble d'infrastructures numériques (équipements de calculs, de stockage, de transport de données) mais aussi des systèmes de secours et de sécurité, source de redondance infrastructurelle et de déstabilisation territoriale[45]. Le *datacenter* est en effet doté de systèmes de refroidissement, de récupération de chaleur (chaleur fatale) ainsi que des équipements visant à assurer une continuité de service : batteries, onduleurs (*UPS* ou ASI), groupes électrogènes au fioul, au diesel ou au gaz. Un *datacenter* peut contenir différentes technologies selon les exigences applicatives, par exemple des serveurs dédiés pour le calcul haute performance (*HPC*), des baies de stockage ou des équipements réseaux pour des centres d'opérateurs télécoms comme les « salles de rencontre » *meet-me-room* ou *MMR*.

[45] **Lopez, F.** (2022). « Non seulement l'infrastructure numérique influe sur la production électrique mais elle en perturbe tout autant la transmission et la distribution car [elle] s'approvisionne en se branchant sur les réseaux historiques de l'électricité ». p.63



Agence internationale de l'énergie. *Composants du centre de données*. IEA. Energy and AI. CC BY 4.0. p.52 (traduit de l'anglais)

Des infrastructures centripètes

Différents types de *datacenters* existent et diffèrent selon les usages :

- Les *datacenters* d'exploitation, d'entreprises ou de ministères par exemple, hébergent et gèrent leurs propres serveurs de données sur site dans un bâtiment qui leur est réservé, ce qui offre un meilleur contrôle en matière de sécurité des informations et de conformité réglementaire comme le respect du règlement général sur la protection des données (RGPD) ;

- Les *datacenters* dits d'infrastructure ou de colocation, offent plusieurs options : hébergement des équipements numériques d'entreprises clientes (l'opérateur fournit l'espace et l'électricité, *power and shell*), mise à disposition de serveurs et équipements informatiques de l'hébergeur pour ses clients (*bare-metal provisioning*), réservation en mode *Cloud* (machines virtuelles sur les serveurs des *data centers*) ;

- Les *datacenters hyperscale* de très grandes dimensions opérés notamment par les « Big Tech » (Amazon Web Services, Google Cloud Platform, Microsoft Azure, etc.) ;

- Les centres de données périphériques (« Edge Data Centers » ou EDC) axés sur une architecture informatique distribuée (ou décentralisée) dans laquelle les données client sont traitées à la périphérie du réseau, à proximité de la source générant lesdites données (latence réduite).

> La *data* va où est la *data*, comme des aimants qui s'attirent [...]
>
> – *Fanny Lopez*. À bout de flux

Dans le rapport final de l'association **The Shift Project**, les choix actuels de conception et de déploiement dans la filière centres de données à l'échelle mondiale placeraient la filière à l'horizon 2030 dans une position insoutenable au regard de la contrainte climatique. Cécile Diguet résume les différents enjeux en quatre axes[46] :

- Enjeu de sobriété foncière et de préservation de la pleine terre (réutilisation des sites existants et des friches en milieu urbain) ;

- Enjeu d'intégration urbaine (mixité ou hybridation des usages, préservation et requalification des paysages urbains, périurbains et ruraux) ;

- Enjeu de prévention des risques, pollutions et autres nuisances (pédologique, hydrique, aérienne ou atmosphérique, risques thermique et incendiaire) ;

- Enjeu de résilience, de sobriété et d'efficacité énergétique

Ces problématiques sont d'autant plus prégnantes à l'ère du déploiement des automates computationnels, hautement énergivores, selon The Shift Project.

[46] **Diguet, C.** (2024). *Data centers : enjeux énergétiques et territoriaux.* https://video.cnil.fr/w/fsbmspMHCru5i4PJtsHF9S

37 Infrastructures en communs

Énergie et intelligence artificielle

Un autre rapport spécial sous CC BY 4.0 (avril 2025), l'**AIE, Agence Internationale de l'Énergie**, indique que la demande d'électricité provenant des centres de données du monde entier devrait plus que doubler d'ici 2030, en lien avec l'IA. Les systèmes et applications désignés sous ce terme-parapluie, tels que les *chatbots*, reposent souvent sur une combinaison de techniques relevant de l'IA symbolique, des apprentissages automatique et par renforcement, des réseaux neuronaux et de l'apprentissage profond. Un classement peut aussi être opéré en fonction des types de tâches accomplies bien qu'il existe là encore des recoupements entre ces catégories (p.29-30) :

- L'IA prédictive désignant l'utilisation de systèmes pour la modélisation scientifique (AlphaFold), les prévisions météorologiques (GraphCast), la maintenance prédictive des infrastructures énergétiques et la finance ;

- L'IA générative et sa pléthore d'applications se concentrant sur la génération de nouveaux contenus textuels, visuels, audio et vidéo et relevant de sous-catégories : modèles de langage, modèles multimodaux, grands modèles de raisonnement ;

- Vision par ordinateur : elle vise à permettre aux machines d'interpréter et de comprendre les données visuelles, telles que les images et les vidéos pour la détection d'objets, la reconnaissance faciale et la classification d'images (voitures autonomes, imagerie médicale, sécurité, réalité augmentée) ;

- L'IA physique ou incarnée désigne les systèmes qui interagissent physiquement avec le monde réel, tels que les voitures autonomes, les robots et les drones ;

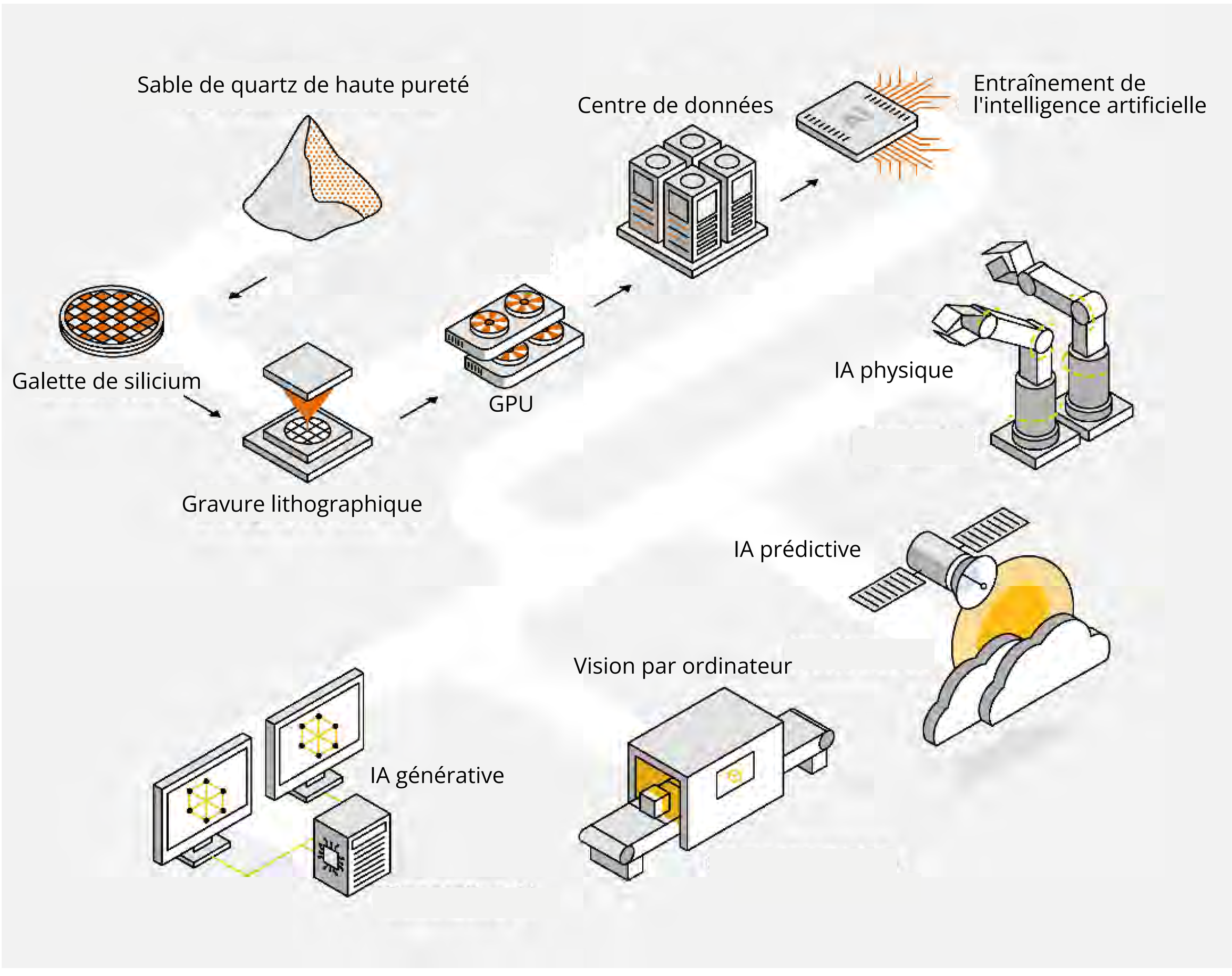
- L'IA agentique englobe les « agents » autonomes conçus pour exécuter des tâches spécifiques, en particulier dans des environnements virtuels. Elle permet d'automatiser les flux de travail et les processus opérationnels (assistants vocaux virtuels, systèmes de contrôle dynamique de la consommation d'énergie dans les bâtiments ou la recharge des véhicules électriques.

La chaîne d'approvisionnement qui conduit finalement à l'application et au déploiement de l'intelligence artificielle est très complexe, concentrée géographiquement et pourtant très internationale. Elle comprend plusieurs composantes, notamment des centres de données gigantesques qui peuvent consommer autant d'électricité qu'une petite ville ; des minéraux critiques et rares nécessaires à la fabrication des composants utilisés dans ces centres ; des puces individuelles pouvant contenir des dizaines, voire des centaines de milliards de transistors (ou commutateurs) ; et des machines de lithographie complexes coûtant des centaines de millions de dollars qui gravent des motifs microscopiques à l'échelle atomique sur des puces en silicium, elles-mêmes fabriquées à partir de sable de haute pureté (p.30-31).

Les composants physiques fondamentaux de l'infrastructure de l'IA sont les puces informatiques. L'informatique traditionnelle des ordinateurs portables et de bureau est dominée par les unités centrales de traitement (CPU). L'informatique liée à l'IA s'est construite autour des unités de traitement graphique (GPU) et d'autres puces

spécialisées, telles que les unités de traitement tensoriel (TPU). La plupart des puces utilisées dans les centres de données axés sur l'IA sont fabriquées dans des fonderies basées au Taïwan (TSMC) et en Corée du Sud (Samsung). Ces dernières, selon la revue *Curseurs*, « concentrent à elles deux près de 70 % de la production mondiale de semi-conducteurs. Elles sont aussi les seules à produire industriellement des puces inférieures à 10 nanomètres. Sur l'île de Taïwan, le cycle des typhons qui abreuvent normalement l'île connaît des perturbations. L'inconstance des ressources en eau couplée à la demande toujours grandissante des industries laisse présager une augmentation des conflits d'usage entre la population, les secteurs de l'industrie et de l'agriculture »[47].

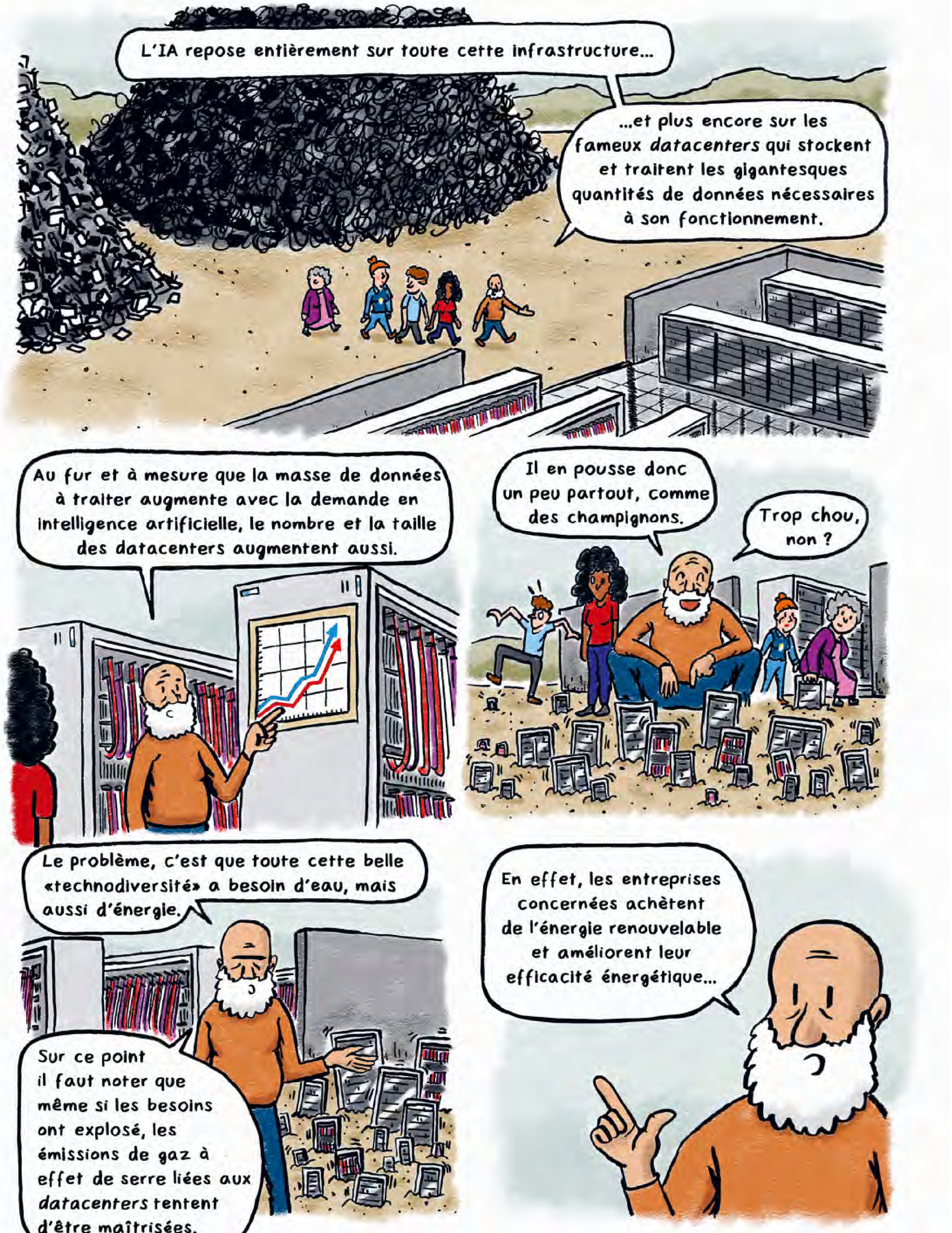
D'autres éléments interviennent dans la chaîne comme les machines de photolithographie déjà évoquées : ASML (acronyme d'*Advanced Semiconductor Materials Lithography*)[48] basée à Veldhoven aux Pays-Bas domine le marché de sa fabrication tandis que les systèmes optiques, comptant parmi les composants essentiels des machines de lithographie d'ASML, sont quant à eux fabriqués par la société allemande Carl Zeiss SMT (*Semiconductor Manufacturing Technology*) située à Oberkochen et l'entreprise Trumpf de Ditzingen. Les autres maillons de la chaîne d'approvisionnement telles que les plaquettes de silicium et les systèmes de refroidissement des centres de données, s'inscrivent dans cette dimension internationale. L'IA forme donc une entreprise mondiale, même si certaines de ses composantes sont fortement concentrées dans des régions spécifiques.



L'IA s'appuie sur une chaîne d'approvisionnement mondiale extrêmement complexe.
Agence internationale de l'énergie. IEA. *Energy and AI*. CC BY 4.0. p.32 (traduit de l'anglais)

[47] **TACTIC** (Éd.). (2024). « La matérialité du numérique ». *Curseurs, 4.*

[48] **Aresu, A.** (2023, mai 10). « Le centre invisible de la technologie mondiale : Percer le secret d'ASML ». *Le Grand Continent*. https://legrandcontinent.eu/fr/2023/05/10/le-centre-invisible-de-la-technologie-mondiale-percer-le-secret-dasml



Utop'IA (avec Herji). (2025). EPFL Press. CC BY-NC-SA. p.35

Constellations satellitaires en orbite basse

Contre-intuitivement, rappelle **Xavier Pasco**[49], on pensait au départ que les satellites géostationnaires assureraient les communications intercontinentales, tandis que les réseaux terrestres resteraient locaux. L'évolution technologique a inversé en réalité cette logique : les câbles sous-marins et la fibre optique relient aujourd'hui l'essentiel des communications mondiales, tandis que les satellites géostationnaires servent surtout à la diffusion régionale de la télévision. Ainsi, les échanges planétaires actuels s'appuient sur des infrastructures terrestres et marines plutôt que spatiales[50].

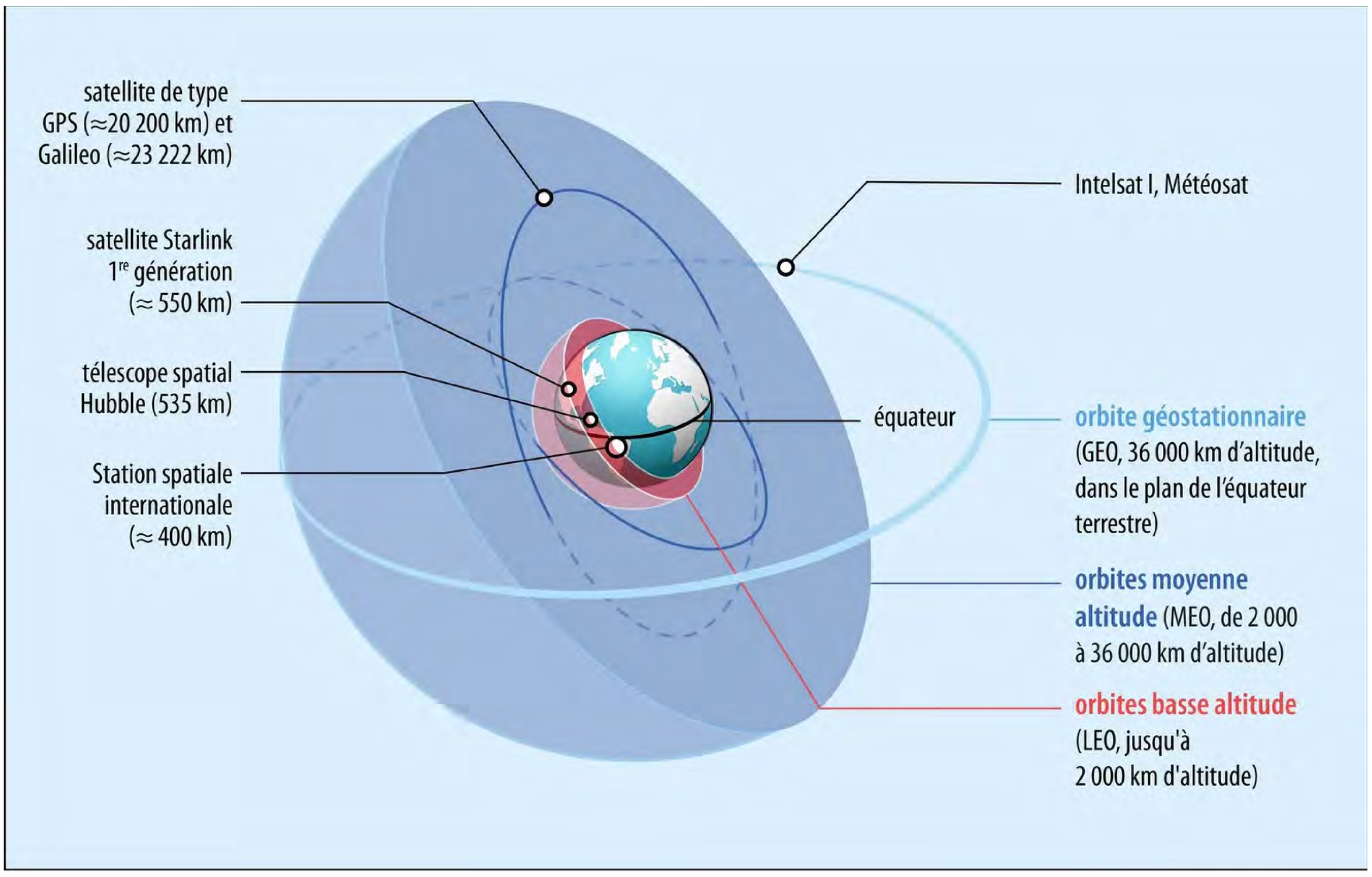
Au début du XXIe siècle, l'industrie spatiale connaît toutefois une profonde mutation avec l'émergence de nouveaux acteurs privés, ne se limitant plus au rôle de fournisseurs pour les États ou de simples fabricants de satellites. Ce mouvement baptisé « New Space » trouve son berceau dans les États-Unis, où la dérégulation du secteur spatial a donné naissance à des entreprises capables de maîtriser toute la chaîne de valeur, depuis la conception des propulseurs et des fusées jusqu'au déploiement des satellites. Leur objectif est de réduire les coûts et de démocratiser l'industrie spatiale. Des projets d'ambitieuses constellations ont ainsi vu le jour : chacune d'elles consiste à placer sur orbite plusieurs dizaines de milliers de satellites afin d'offrir une connexion Internet à haut débit et la téléphonie mobile à l'échelle mondiale. Les constellations sont placées sur des trajectoires allant des orbites basses, jusqu'à 2 000 km d'altitude (LEO pour Low Earth Orbit), aux orbites de moyenne altitude, comprises entre 2 000 et 35 786 km (MEO pour Medium Earth Orbit), cette dernière altitude correspondant à celle de l'orbite géostationnaire (GEO pour Geostationary Earth orbit)[51]. Cette frénésie de projets laisse entrevoir

[49] *Des câbles aux satellites, l'Internet sans fil*. (2025). [Émission]. Avec Xavier Pasco et Ophélie Coelho. France Culture

[50] **Ophélie Coelho** rappelle à ce niveau le projet otanien HEIST (*hybrid space-submarine architecture ensuring infosec of telecommunications*), de détection rapide des dommages aux câbles sous-marins et de réacheminement des flux de données par satellite.

Des câbles aux satellites, l'Internet sans fil. (2025). [Émission]. France Culture

[51] Les satellites placés sur des orbites de transfert interplanétaire échappent à l'attraction terrestre pour aller explorer d'autres objets du Système solaire, comme la planète Mars. Source : CNES



Encyclopædia Universalis France. *Classification des différentes altitudes d'orbites terrestres*. CC BY-NC

une possible flambée à l'horizon 2030, celle d'une estimation de 100 000 satellites, extrapolation du nombre de dossiers déposés auprès de la structure onusienne **UIT**, **Union internationale des télécommunications**, seule habilitée à délivrer des autorisations de mise en orbite, précise Xavier Pasco. Malgré les pratiques baptisées de « satellites de papier » relevant de la spéculation orbitale[52], les opérateurs de systèmes géostationnaires (GSO) s'alarment toutefois du nombre de ces initiatives et de la présence effective de grandes constellations (NGSO) invoquant leur crainte de brouillage de leurs propres signaux (pollution électromagnétique).

La problématique est double selon **Irénée Regnauld** et **Arnaud Saint-Martin**[53] : les satellites des constellations nuisent aux observations astronomiques depuis les télescopes terrestres (pollution lumineuse) et les débris orbitaux (étages supérieurs de fusées, moteurs d'appoint, adaptateurs, sangles, goupilles, fragments de dispositifs pyrotechniques, caches d'optiques) ne cessent d'augmenter : le centre national d'études spatiales (CNES) estime à environ 34 000, le nombre d'objets supérieurs à 10 cm en orbite, dont 9 000 sont des engins actifs (masse globale évaluée à environ 13 000 tonnes). Le nombre de débris spatiaux[54] dont la taille est supérieure à 1 mm est quant à lui estimé à environ 128 millions. Le risque de collision (syndrome de Kessler) est particulièrement élevé dans certaines zones, notamment l'orbite terrestre basse, où se concentrent beaucoup de satellites, d'où la nécessité de prendre des mesures préventives de désorbitation, de limitation et de dépollution.

[52] « Le Royaume des Tonga est représentatif de cette pratique, lui qui, entre 1988 et 1990, a, via son agence nationale des fréquences, Tongasat, soumis à l'UIT un projet d'inscription de seize positions orbitales en orbite géostationnaire au-dessus du Pacifique ». Hainaut, B. (2025) La guerre des fréquences – Vers une marchandisation de la ressource spectre/orbite ? *Étude 123*, IRSEM. p.43

[53] Régnauld, I., & Saint-Martin, A. (2024). *Une histoire de la conquête spatiale : Des fusées nazies aux astrocapitalistes du New space.* La Fabrique éditions.

[54] *Les débris spatiaux.* CNES. https://cnes.fr/dossiers/debris-spatiaux

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

cnes

DES NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR LIMITER LES DÉBRIS

Pour limiter la prolifération de débris et assurer la pérennité des activités spatiales, le cadre légal se durcit. Avec la Loi sur les opérations spatiales, la France a été précurseur. Mais comment, dans ce contexte, permettre aux entreprises et industries françaises de rester compétitives en faisant face à ces nouvelles contraintes ? C'est l'objectif du CNES à travers le dispositif Tech4SpaceCare (T4SC) : depuis 2023, le CNES développe de nouvelles technologies qui feront la différence : limiter les débris tout en soutenant l'écosystème français.

LE DÉTUMBLER
pour stabiliser l'attitude des débris

Objectif :
éviter qu'un satellite épave ne se mette en rotation aléatoire et devienne difficile à approcher / réparer / évacuer.

EOLTS
pour localiser précisément les satellites

Objectif :
mieux prévoir la trajectoire des satellites pour gérer plus précisement le trafic spatial.

UN BOUCLIER IMPRIMÉ EN 3D

Objectif :
protéger les zones sensibles des satellites face à des débris jusqu'à 3 mm.

EPASS
passiver les satellites en fin de vie

Objectif :
éviter l'explosion des batteries de satellite en les déchargeant à la fin de leur vie.

UN SYSTÈME DE PROPULSION ULTRA-AGILE

Objectif :
donner la mobilité nécessaire à tous les satellites pour réaliser des manœuvres anticollisions.

UNE PUCE RFID
interrogeable depuis le sol

Objectif :
faciliter l'identification des satellites et débris depuis le sol, comme une voiture au télépéage.

cnes.fr | YouTube

CRÉDITS CNES, 2024
nun {design & arts graphiques}
cc by-sa 3.0 | 2024

Les nouvelles technologies de T4SC pour limiter les débris © CNES, 2024. CC BY-SA 3.0

Le narratif dit « astrocapitaliste » selon les auteurs précités se définit comme « la fusion consommée des modes de production issus de l'économie numérique *made in Silicon Valley* et des capacités industrielles et ressources humaines héritées des périodes précédentes [...] » et s'incarne de manière emblématique dans la société Space X, de son nom officiel, Space Exploration Technologies Corporation, fondée le 6 mai 2002 par **Elon Musk** et spécialisée dans le domaine de l'astronautique et du vol spatial. L'histoire de l'entreprise, de son programme de développement de lanceur réutilisable, du lanceur spatial entièrement réutilisable Starship (pour permettre la colonisation de la Lune ou Mars et développer le tourisme spatial), ou encore de Starlink (constellations de satellites) a valeur de syndrome aux yeux des deux chercheurs français, « celui d'un capitalisme aventuré dans l'espace, sauvage et brutal, d'une redoutable efficacité dans ses stratégies de déploiements dans tous les segments de l'industrie, et d'accaparement au service d'une vision autoritaire et sans compromis de la croissance marchande »[55].

[55] Régnauld, I., & Saint-Martin, A. (2024). *Une histoire de la conquête spatiale : Des fusées nazies aux astrocapitalistes du New space.* La Fabrique éditions. p.131

Du point de vue juridique, il est aussi rappelé que les droits internationaux, maritime et spatial, reposent sur des principes analogues de non-appropriation, en permettant toutefois l'exploitation économique de ressources situées dans ces espaces. Ainsi, le **Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes** (1967), stipule dans son **article II** que *L'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, ne peut faire l'objet d'appropriation nationale par proclamation de souveraineté, par usage ou occupation, ni par aucun autre moyen* et

ArchaiOptix. *Artemis and Kallisto* - Pompeii, Wikimedia, CC BY-SA 4.0

dans son **article IV** que *Les États parties au Traité s'engagent à ne mettre sur orbite autour de la Terre aucun objet porteur d'armes nucléaires ou de tout autre type d'armes de destruction massive, à ne pas installer de telles armes sur des corps célestes et à ne pas placer de telles armes, de toute autre manière, dans l'espace extra-atmosphérique*.
Ce traité est complété, voire sensiblement modifié par les accords Artemis.

Malgré les incertitudes géopolitiques, Xavier Pasco, tient un discours qui se veut a priori rassurant : « De nombreux observateurs font ainsi valoir que l'espace, même aux moments de tensions les plus extrêmes, demeure le lieu de la coopération. [...] Aujourd'hui comme hier, l'alchimie de la coopération spatiale dans l'espace est indissociable de l'idée de hiérarchie internationale et demeure l'essence même des politiques spatiales des nations leaders. Qui finissent implicitement par s'entendre. L'une des arènes où se joue la compétition internationale, l'espace est aussi un théâtre où des récits se donnent à voir qui se complètent et se répondent »[56].

[56] Pasco, X. (2024). *La ruée vers l'espace : Nouveaux enjeux géopolitiques*. Tallandier. p.324-325

Contre-narrations graphiques

> C'est pourquoi chaque chose a sa géographie, sa cartographie, son diagramme.
>
> - *Gilles Deleuze*. Pourparlers

Fragments du papyrus de Turin - ancienne carte minière égyptienne (moitié gauche) pour l'expédition minière de Ramsès IV, XIIe siècle av. J.-C. Domaine public. Wikimedia

Fragments du papyrus de Turin - ancienne carte minière égyptienne (moitié droite), pour l'expédition minière de Ramsès IV, XIIe siècle av. J.-C. Domaine public. Wikimedia

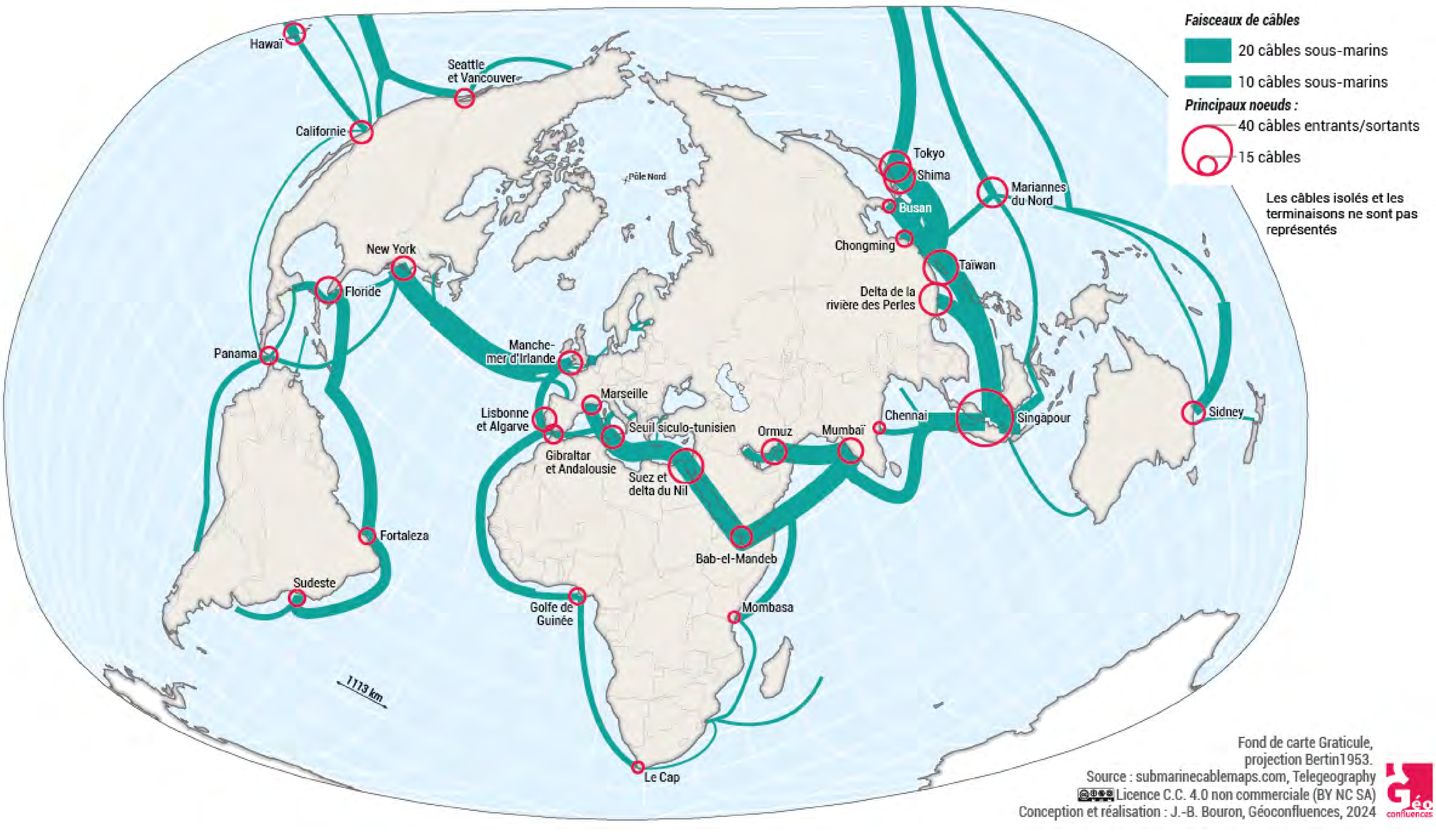
45 Contre-narrations graphiques

Rendre visible ce qui sous-tend et structure *matériellement* le numérique est facilité par la cartographie d'information qui ne se limite pas à une simple esthétique de la représentation mais constitue un réel outil de compréhension. Diverses visualisations permettent de saisir les réseaux autrement que comme un *cloud* d'interconnexions, en donnant à voir une infrastructure complexe, tangible, en proie à des tensions multiples.

¶ Cartographies critiques

Dans *The Undersea Network,* dès 2015, Nicole Starosielski[57] entreprend une enquête détaillée sur les câbles sous-marins transocéaniques, montrant comment « les flux numériques actuels circulent sous terre et sous la mer, plutôt que dans les airs [et suivant] les signaux qui se déplacent à la vitesse de la lumière, [...] à travers des câbles sinueux de la taille d'un tuyau d'arrosage ». Cet ouvrage s'accompagne d'une expérience immersive baptisée *Surfacing*. Elle peut être en cela rapprochée du projet World Brain mené la même année par **Stéphane Degoutin** et **Gwenola Wagon**.

[57] **Starosielski, N.** (2015). *The undersea network.* Duke university press. p.2



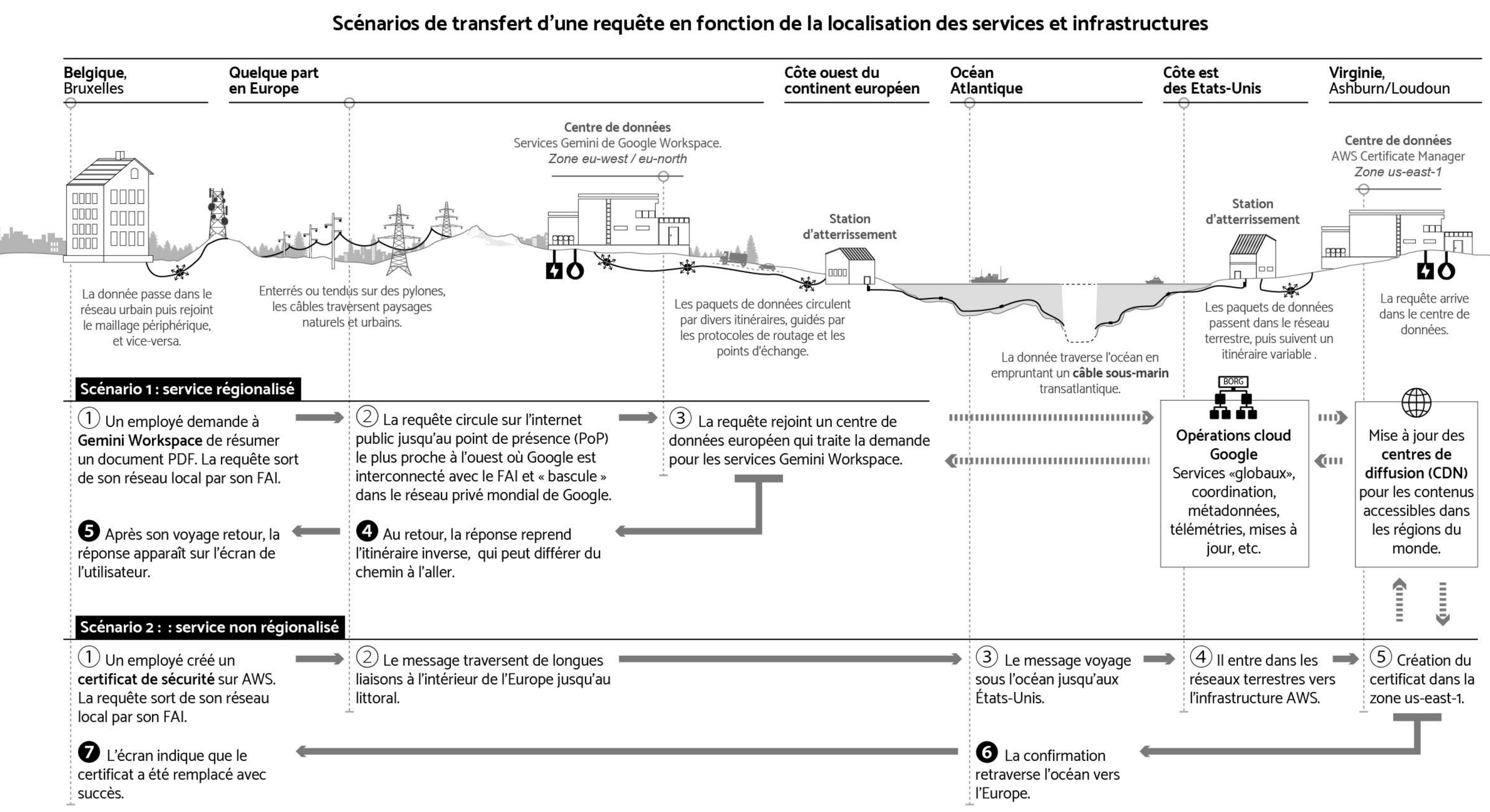
Le souci de démystification est également au cœur du projet brésilien *Cartografias da Internet* (cartografiasdainternet.org) qui explore les dynamiques postcoloniales extractives liées aux infrastructures. Le thème est approfondi au sein de la structure multimédia de **Vladan Joler** intitulée *Nouvel extractivisme* (2020) qui élargit le processus traditionnel d'exploitation minière aux formes contemporaines de consommation des ressources numériques, assemblage de concepts et d'allégories : gravité, architecture de la caverne, dividu, filtres, bulles, *enclosures*, agents de capture, colonialisme, travail fantôme, surveillance. Dans la lignée des travaux de Joler, l'Atlas critique d'Internet élaboré par **Louise Drulhe** (voir p.11) développe de manière plus abstraite un « espace de la pensée » composé d'exercices conceptuels de spatialisation d'Internet, clefs de compréhension des enjeux sociaux, politiques et économiques.

Plus récemment (2023) Kate Crawford et Vladan Joler ont porté à la connaissance de tous un projet de généalogie visuelle, *Calculating Empires*, qui retrace la manière dont les structures techniques et sociales ont coévolué au cours des cinq derniers siècles, englobant les idées, les dispositifs, les infrastructures et les systèmes de pouvoir et retraçant les modèles technologiques du colonialisme, de la militarisation, de l'automatisation et de l'*enclosure* depuis 1500. *Calculating Empires* s'articule autour de quatre thèmes : la communication, le calcul, la classification et le contrôle.

Enfin, **Ophélie Coelho**, chercheuse en géopolitique du numérique, associée à l'IRIS et membre du CIS (CNRS) insère au sein de son ouvrage[58] un ensemble de schémas et de cartes éclairantes sous CC BY. À titre d'exemple, elle propose[59] une lecture graphique « de bout en bout » du trajet d'une requête numérique, en montrant que son parcours dépend de la géographie effective des services, des réseaux, des centres de données mobilisés, ainsi que du modèle technologique favorisé (ici, le *cloud computing*).

[58] Coelho, O. (2025). *Géopolitique du numérique L'impérialisme à pas de géants* (Nouvelle édition revue et augmentée). Éditions de l'Atelier.

[59] Commentaires de l'autrice recueillis le 16 décembre 2025.



Source : Ophélie Coelho, figure 8 dans « **Géopolitique du numérique : l'impérialisme à pas de géants** » (Éditions de l'Atelier, 2nde éd. 2025), illustration sous licence Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).

© Ophélie Coelho, figure 8 dans *Géopolitique du numérique : l'impérialisme à pas de géants*. Éditions de l'Atelier, 2de édition. CC BY 4.0. Avec l'aimable autorisation de l'autrice.

La partie illustrée rappelle d'abord les couches techniques successives. À l'échelle inter-réseaux, les paquets suivent des itinéraires multiples, orientés par les protocoles de routage, le trafic et les points d'échange. Lorsque la destination se situe sur un autre continent ou dans une zone difficilement accessible par les terres, la traversée s'effectue la plupart du temps par câbles sous-marins, encadré par deux stations d'atterrissement qui servent d'interface entre les segments terrestres et le segment océanique[60].

Le **scénario 1** décrit un service proposé par une plateforme de *cloud*, et qui a été régionalisé. ① Un employé formule une demande – ici, un résumé d'un document PDF via *Gemini Workspace* – et la requête sort du réseau local par le fournisseur d'accès. ② Elle circule sur l'internet public jusqu'au point de présence le plus pertinent, où l'opérateur de service est interconnecté avec le FAI. La requête bascule alors dans le

[60] « À noter que l'illustration décrit un parcours courant de la donnée, et n'inclut donc pas le satellite qui ne représente encore qu'un usage limité. Par ailleurs, le satellite reste un maillon de la chaîne de transmission sur un segment donné, qui s'ajoute à l'itinéraire par câble sans le remplacer totalement ». O. Coelho.

réseau de protocole privé mondial de *Google*[61]. ③ Elle atteint un centre de données européen qui traite la demande[62]. ④ La réponse revient vers l'utilisateur, en reprenant un chemin inverse qui peut ne pas être strictement identique à l'aller. ⑤ À l'arrivée, le résultat s'affiche sur l'écran.

Même dans ce cas de service « régionalisé », le schéma attire l'attention sur des fonctions transversales qui nécessite dans tous les cas une connexion avec le cœur technologique non territorialisé. Les « opérations cloud » (coordination, métadonnées, télémétries, mises à jour, etc.) rappellent l'existence d'un plan d'administration et d'observabilité propre au cœur technologique, distinct du plan de données strictement nécessaire au traitement de la requête. La mise à jour des réseaux de diffusion (CDN) illustre aussi la manière dont des contenus et des paramètres peuvent être répliqués, mis en cache et servis depuis plusieurs zones afin d'optimiser l'accès à l'échelle mondiale, ce qui complique toute lecture purement territoriale de la localisation.

Le **scénario 2** présente un service proposé par une plateforme de *cloud*, et qui n'a pas été régionalisé. ① Un employé crée un certificat de sécurité via AWS. ② Le message traverse de longues liaisons à l'intérieur de l'Europe jusqu'au littoral. ③ Il franchit ensuite l'océan par une liaison sous-marine vers les États-Unis. ④ Il entre dans les réseaux terrestres qui conduisent à l'infrastructure d'AWS. ⑤ Dans l'exemple, on suppose que le certificat est créé dans la zone us-east-1, à Ashburn[63]. ⑥ La confirmation retraverse l'Atlantique vers l'Europe. ⑦ L'interface utilisateur affiche ensuite la réussite de l'opération.

Ces deux scénarios mettent en avant une réalité de la logique de régionalisation d'un service, qui ne signifie pas qu'il est détaché et indépendant du reste de la plateforme. Les briques régionalisées restent prises dans une plateforme intégrée : elles dépendent d'un cœur technologique qui demeure centralisé. La relation entre cœur et services périphériques s'exprime dans une géographie qui sert à préserver un centre de gravité technique avec des périphéries opérées localement, et un cœur qui conserve la capacité d'ordonner, de mesurer, d'autoriser et de reconfigurer.

La régionalisation du calcul ajoute une couche territoriale décisive : elle ne dissout pas le centre, elle déplace le poids du calcul vers des espaces périphériques. Ainsi,les charges intensives, énergivores et hydrovores parfois, se répercutent dans des zones d'accueil mises en concurrence, où l'on mobilise foncier, raccordements électriques, réseaux. Le territoire devient alors un lieu d'atterrissage du coût matériel, pendant que l'architecture, elle, reste extrêmement hiérarchisée et structurée par les intérêts et les standards du cœur technologique et des centres économiques. (O. Coelho, 2025).

¶ Des images manquantes aux images latentes

Le système minier chinois de Bayan Obo et Baotou déjà évoqué (p. 26) relève d'un régime de soustraction car il repose sur une logique extractive qui s'appuie sur une dépossession foncière, induit une dégradation environnementale et constitue une arme géopolitique (pression économique sur les partenaires commerciaux). Cette soustraction s'opère à deux niveaux complémentaires : l'invisibilité physique et l'opacité politique. En effet, Bayan Obo et les complexes industriels de Baotou sont situés dans des zones reculées de la Mongolie-Intérieure. Seules les photographies

[61] « Il s'agit d'un *backbone* privé mondial opéré par Google, distinct de l'internet public. Concrètement, une fois la requête entrée au point de présence le plus proche, elle est transportée sur un réseau maillé reliant les « edge PoPs » aux centres de données, via des capacités de fibre et d'interconnexion contrôlées par l'opérateur. Dans cette configuration, l'internet public n'intervient en général qu'entre l'utilisateur et le point d'entrée le plus proche du réseau Google, le reste du trajet étant porté par l'infrastructure privée ». O. Coelho.

[62] « Dans l'Union, la régionalisation d'un service d'IA générative en environnement professionnel s'explique moins par une obligation générale d'hébergement en Europe que par un empilement de contraintes sur les flux et les accès. D'un côté, le RGPD encadre strictement les transferts de données personnelles hors EEE (chapitre V) et, en cas de demande d'une autorité d'un pays tiers, l'article 48 rappelle qu'une décision étrangère n'est exécutoire dans l'Union qu'adossée à un accord international, sans se substituer aux mécanismes du chapitre V. De l'autre, le *Data Act* ajoute une couche sur les données non personnelles : son article 32 impose aux fournisseurs de services de traitement de données de prendre des mesures pour prévenir des accès ou transferts imposés par des autorités de pays tiers lorsque ceux-ci entreraient en conflit avec le droit de l'Union ou d'un État membre. Dans ce contexte, une *data region* pour un service comme *Gemini Workspace* fonctionne comme un instrument de bornage qui aligne lieu de traitement, chaîne d'accès et obligations juridiques, tout en maintenant l'intégration au cœur de plateforme ». O. Coelho.

[63] « Ashburn, dans le comté de Loudoun en Virginie, correspond au cœur de la « Data Center Alley », souvent décrite comme la plus grande concentration mondiale de centres de données ». O. Coelho.

satellites rendent compte seulement à distance de la géographie minière. En outre, les terres rares étant classées comme « ressource stratégique » par la Chine, le site de Bayan Obo fait bien évidemment l'objet d'un contrôle de l'information renforcé.

Mine de Bayan-Obo. Repères géographiques. Ce document est extrait du site GeoImage du CNES. Crédit : European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery

Ces images manquantes empêchent de documenter précisément la réalité extractive de ce complexe. En réponse et en guise de « révélation », l'artiste belge **Emmanuel Van der Auwera** s'intéresse dans son dernier court métrage *White Cloud* (2024) – réalisé en très grande partie par l'outil d'intelligence artificielle générative *Runway* – à cette « *scène originaire* matérielle de la société algorithmique ».

En inventant le paradoxe d'un *found footage* génératif, analyse **Barnabé Sauvage**[64], le film s'imagine comme un document contrefactuel, constitué d'images de cet espace aussi inaccessible qu'il est stratégique pour le capitalisme numérique contemporain, et du témoignage oral d'un des travailleurs de la mine, recomposé fictivement à partir de *posts* trouvés sur les réseaux sociaux.

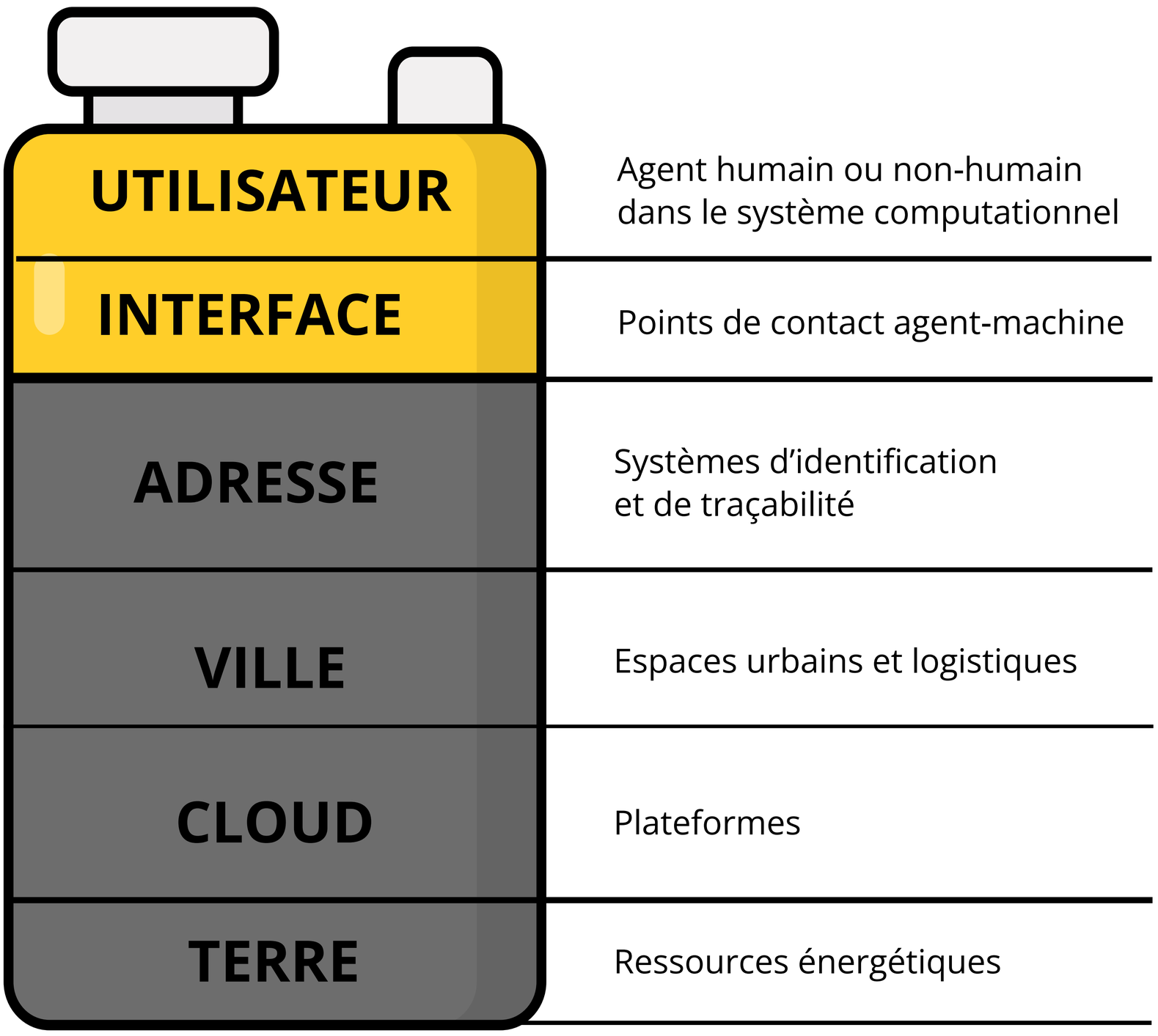
[64] Sauvage, B. (2025). Emmanuel Van der Auwera – Dans le désert du réel. *Débordements*. https://debordements.fr/emmanuel-van-der-auwera

Emmanuel Van der Auwera indique qu'il a souhaité voir ce que les images satellitaires ne montrent pas, à savoir la réalité souterraine, quasi-chthonienne, de l'extraction des terres rares : « En définitive, je pense que *White Cloud* n'est pas qu'un film documentaire, c'est un film d'horreur, sur l'horreur du réel qui montre par l'IA le caractère apocalyptique et le prix à payer, en termes d'aliénation humaine et de catastrophe écologique, qui sous-tend notre monde voué à l'accélérationnisme technologique. Le caractère d'anticipation, presque science-fictionnel du film, n'est que le reflet déformé de cet accélérationnisme, comme dans un miroir déformant, un *Portrait de Dorian Gray* numérique, que nous renvoie l'IA ».

La notion de *Stack*

Ces représentations trouvent un écho dans la notion de *Stack* théorisée par **Benjamin Bratton** (2016), qu'il applique à la mégastructure accidentelle d'Internet décrite comme un empilement de six couches interagissantes : Terre, Nuage, Ville, Adresse, Interface, Utilisateur. **Guillaume Giroud** indique : « La première couche *Terre* désigne l'ensemble des ressources énergétiques planétaires qui alimentent la seconde couche du *Cloud*, composée de plateformes. Travaillée par la couche du *Cloud*, la couche *Ville* organise concrètement les choses, les évènements et les relations, ceci via la couche *Adresse* et selon les modes de présentation de la couche *Interface*. À l'extrémité de cet empilement, on trouve l'ultime couche *Utilisateur*, qui voit et agit sur l'ensemble du système via l'*Interface* »[65].

[65] **Giroud, G.** « Benjamin H. Bratton, *Le Stack. Plateformes, logiciels et souveraineté* », Lectures [En ligne], Les comptes rendus. 2020. http://journals.openedition.org/lectures/



Gabrielle de Seta[67] étend cette vision stratifiée et rappelle le travail de **Roy Solomon**[68] mettant en évidence l'évolution du *stack* en « méta-concept » employé par les informaticiens pour désigner et représenter l'architecture de divers systèmes informatiques devenue – de la hiérarchie du stack OSI de systèmes en réseau à ses multiples déclinaisons schématiques (stack technique, pile de données suivant le principe LIFO, pile d'exécution, etc.) – le modèle topologique omniprésent du numérique. Plus précisément, partant du développement problématique d'un câble sous-marin de données entre Los Angeles et Hong Kong, l'autrice s'appuie sur trois études de cas (les codes QR, le filtrage et la cybersouveraineté) illustrant trois configurations topologiques : la passerelle (*gateway*), le tamis (*sieve*) et le dôme (*dome*). Ces configurations élargissent le vocabulaire conceptuel du modèle *stack* à différentes échelles et fournissent des outils utiles pour l'analyse des infrastructures computationnelles en Asie et au-delà, pour reprendre les termes de la présentation de l'article original.

[67] **de Seta, G.** (2021). Digital Infrastructure, Liminality, and World-Making Via Asia| Gateways, Sieves and Domes: On the Infrastructural Topology of the Chinese Stack. *International Journal of Communication, 15*, 24. https://ijoc.org/index.php/ijoc/article/view/13972

[68] **Solomon, R.** (2013). Last in, first out. *Amodern.* https://amodern.net/article/last-in-first-out/

Cas d'usage : *Stackographie* d'une trottinette électrique

Raffard-Roussel, collectif réunissant dans un même environnement de travail les artistes, **Matthieu Raffard**[69] et **Mathilde Roussel**[70], fournissent une illustration concrète du *Stack* à travers une forme moderne d'*haruspicine technologique*, la *stackographie*, visant à détecter le mode complet d'existence d'un objet connecté, la trottinette électrique, sur chacune des six couches, à partir de l'observation fine de sa matérialité. Cette opération fait ainsi apparaître les différents enjeux stratégiques qui se dessinent sur chacune de ces strates.

© Raffard - Roussel. *Haruspicine technologique (trottinette).* Avec l'aimable et gracieuse autorisation du collectif. Droits réservés.

Sur la couche de la Terre, précisent le collectif, les trottinettes en libre-service et sans station ont recours à de nombreuses ressources matérielles clairement identifiables, dont le lithium, l'acier, le plastique, le cuivre ou bien encore le caoutchouc pour fonctionner ; sur la couche de la Ville, ces systèmes de micro-mobilité ont besoin d'entrepôts logistiques, de places de stationnement et de véhicules légers capables d'assurer la maintenance ; sur la couche Adresse, la technologie des engins de déplacement personnel (EDP) motorisés fait appel à de nombreux codes d'identification et protocoles d'adressage ; sur la couche du Cloud, les patinettes connectées sont reliées à plusieurs fermes de serveurs répartis sur toute la planète ; sur la couche de l'Interface, elles font appel à de nombreux éléments de pure communication visuelle (le design des véhicules, le graphisme des applications et le *branding* des marques) ; enfin, sur la couche de l'Utilisateur, la conception de ces engins s'appuie sur le système sensoriel (vue, ouïe) et le désir de mouvement pour évoluer correctement. Ainsi précise Matthieu Raffard, la théorie de Bratton s'avère effectivement un outil pertinent pour nous aider à visualiser la complexité feuilletée de cette forme courante de technologie (Matthieu Raffard. *En flottement libre : enquête stackographique autour de la trotinette en free-floating.* Université Panthéon-Sorbonne, Paris I, ⟨tel-04573977⟩. p.16-17).

[69] Raffard, M. (2023). *En flottement libre. Enquête stackographique autour de la trottinette en free-floating* https://www.raffard-roussel.com/fr/publications-these-de-doctorat-s-en-flottement-libre

[70] Roussel, M. (2024). *Monter, démonter, remonter : Enquête hapto-diffractive autour de l'imprimante.* https://www.raffard-roussel.com/fr/publications-these-de-doctorat-s-monter-demonter-remonter

Matthieu Raffard poursuit dans sa thèse la réflexion : « On peut voir la théorie du *Stack* de Benjamin Bratton comme une théorie qui essaie de penser en même temps la technologie du point de vue des infrastructures et du point de vue des superstructures. Pour Bratton, les infrastructures physiques qui nous permettent de communiquer doivent être pensées dans la continuité des superstructures étatiques et non étatiques qui organisent le monde numérique ». Il rappelle la notion d'*instrastructure* avancée par Yves Citton dans un article[71] de 2016 reprenant les travaux de **Friedrich Kittler** et de **Vilèm Flusser** :

> La frontière entre l'infra- et le supra-, entre le *hard* et le *soft* n'est localisable nulle part entre le code-machine et l'interface-utilisateur, puisque tout y relève d'un automatisme régi par les 0 et les 1 des circuits électroniques. Plutôt qu'infra- ou supra-, les logiciels sont à proprement parler *intra*-structurels : *ils structurent nos interactions numériques depuis l'intérieur*, à travers de multiples couches qui vont progressivement du plus hard, comme le langage-machine commandant le passage ou le blocage des flux électroniques à l'échelle du microprocesseur, jusqu'au plus soft, comme les manipulations d'objets que l'utilisateur peut actionner à l'aide de commandes intuitives (copier/coller, chercher, répéter, etc.) [...] En effet, plus une interface est simple à manipuler pour un utilisateur non expert, plus le logiciel qui en assure le fonctionnement tend à superposer une multiplicité de couches qui accroissent son opacité. Plus c'est facile, plus c'est impénétrable ; plus j'ai de pouvoir dans mon utilisation superficielle du logiciel, moins j'ai de pouvoir dans ma compréhension de ses opérations effectives. Autrement dit : plus je me sens libre, plus je suis soumis à l'hétéronomie du code.
>
> ***- Yves Citton***, Notre inconscient numérique. Comment les infrastructures du web transforment notre esprit. *Revue du crieur* (2016)

Matthieu Raffard indique à cet égard qu'il serait en réalité plus pertinent de dire que les trottinettes en *free-floating* constituent une sorte d'intra-structure. Autrement dit, ajoute-t-il, cette flotte de véhicules connectés est une espèce d'objet tentaculaire qui prolifère à l'intérieur même de l'usage quotidien que nous faisons de l'espace urbain (Raffard, p.56). Yves Citton souligne dans son article que ce sont nos comportements envers les machines qui déterminent leur devenir, les intrastructures numériques de demain se décidant – en partie – dans notre capacité actuelle à réfléchir de façon critique à leurs usages et à leurs implications. C'est à cette réflexion critique, conclut l'auteur, que devraient s'attacher nos institutions d'enseignement, à tous les niveaux et dès le plus jeune âge (Citton, p.12).

[71] Yves Citton. Notre inconscient numérique. Comment les infrastructures du web transforment notre esprit . *Revue du crieur*, 2016, 4, pp.144-158. 〈hal-01373129〉

Ivan Albright. *Le portrait de Dorian Gray*. Domaine public. Wikimedia

Approches pédagogiques

J'en étais au peaufinage de
mon algorithme de
compression... Quelque part
dans le couloir, une radio
passait *Tom's Diner*. J'ai été
électrisé. Je savais qu'il serait
presque impossible de
compresser cette chaude
voix a cappella

– Karlheinz Brandenburg

Matière, matériaux et matérialité : un enjeu épistémologique à la fois essentiel et préhensible

Dans l'enseignement des arts plastiques, la pratique plastique engage une expérience et un questionnement permanent sur les liens entre matière, matériaux et matérialité. À chaque cycle de la scolarité obligatoire, les élèves s'engagent dans une pratique sensible prenant en compte la spécificité des matériaux à des fins de création artistique. La ressource pédagogique du site InSitu de l'**académie de Nantes** analyse notamment les programmes d'arts plastiques au prisme de la matérialité dans la création plastique. Ils y sont déclinés en citant les questionnements plasticiens par cycle et en exemplifiant, par un ensemble de scénarios pédagogiques, la notion de matérialité.

Matière, matériaux, matérialité forment un ensemble de notions plus complexe qu'il n'y paraît. Si elles portent sur des changements d'état matériels de moyens physiques de l'art, elles engagent aussi son statut et sa portée symbolique, la réalité matérielle touchant alors au signifiant. Ces notions ouvrent sur un champ de possibilités riches et variées dans la pratique plastique, permettant d'interroger la production artistique dans une approche à la fois éminemment sensible et profondément intelligible. Cette double approche offre la possibilité aux élèves de se saisir de la matière brute, qui est de la sorte « première », pour la transformer en un matériau devenant un constituant de l'œuvre. La matérialité ainsi constituée de la création plastique est non seulement une caractéristique physique, mais également une intentionnalité artistique, potentiellement une valeur, un signifié.

De ce fait, la matière extraite de la nature ou celle non transformée des pratiques artistiques traditionnelles se caractérise par ses propriétés fondamentales en tant qu'elle possède une masse, occupe un volume dans l'espace, et peut exister sous trois formes distinctes : solide, liquide ou gazeux. Cette matière indifférenciée ne semble devenir matériau en art que lorsqu'elle est sélectionnée, modifiée ou adaptée dans une visée créative. Cette conception est développée dans la ressource pédagogique Autour de l'exposition des œuvres et de la démarche de Coline Gautier de l'INSPE de l'**académie de Rennes**. On y analyse les liens entre matière, matériaux et matérialité dans la production artistique contemporaine, articulés à une réflexion sur les entrées des programmes d'arts plastiques du cycle 1 jusqu'au cycle 4. Des propositions de transposition didactique sont également présentées afin de penser leurs multiples applications en classe.

Tirer parti de la matière : l'apprentissage d'un pouvoir d'agir avec et sur le réel

La production plastique permet ainsi cette transformation faisant de la matière brute, par différentes interventions, un matériau participant à la plasticité de l'œuvre. Le glossaire d'arts plastiques rédigé par **Alain Murschel**, IA-IPR d'arts plastiques de l'**académie d'Orléans-Tours** détaille un ensemble de notions plasticiennes. Il décrit la matière comme une substance naturelle particulière ayant l'aspect souvent de sa texture : *matière lisse (le verre), matières rugueuses (certaines roches), elles peuvent avoir de nombreux aspects, visuels (granuleux, brillant, mat, etc.) ou tactiles (doux, léger, humide, etc.) ; on parle d'effet de matière.* L'effet de matière désigne l'impact visuel, tactile ou sensoriel produit par les qualités physiques d'un matériau ou d'une surface matériellement constituée dans une œuvre d'art, un objet ou un espace. Au-delà de la matière physique, il est donc aussi question de sa perception. Le scénario pédagogique

de l’académie de Nantes Excroissance interroge les liens possibles entre matière naturelle et création artistique. Les élèves sont accompagnés par l’enseignant dans l’exploration des processus de mutation et de réinvention d’un matériau d’origine naturelle, afin de lui conférer une dimension artistique. Dans cette approche pédagogique, à travers des procédés artistiques tels que le modelage ou l’assemblage, les élèves sont amenés à concevoir une forme en trois dimensions, tout en interrogeant les concepts d’hybridation et de développement organique, ainsi que les interactions entre le naturel et l’artificiel. Dès lors, le matériau devient cette matière sélectionnée, préparée, transformée pour être utilisée à dessein, résultant d’un ensemble plus ou moins important ou complexe d’opérations le transformant. Dans le processus créatif, contrairement à la matière brute, le matériau est déjà porteur d’une intention technique ou esthétique. C’est par la matière se muant en matériau, les effets produits et les intentions soutenues, que peut aussi se nouer un dialogue entre le plasticien (auteur et intentionnalité), l’œuvre (le fait sensible réalisé) et le spectateur (acteur sensible et sensé d’une réception).

> L’œuvre est matérielle : elle est faite de **matière**.
>
> — *Étienne Souriau*, Vocabulaire d’esthétique

Un levier d’éducation à la complexité de la création artistique

La ressource d’accompagnement des programmes d’arts plastiques Penser et mettre en œuvre la progressivité dans un programme curriculaire et de cycle en arts plastiques au collège propose d’articuler des parcours de formation pour les élèves en lien avec les questionnements au cycle 4 et, plus spécifiquement, *La matérialité de l’œuvre ; l’objet et l’œuvre.* Cette dernière analyse la notion de matérialité comme un élément constitutif du cycle de transformation progressif de la matière en matériau. Ce cycle continu, allant de la matière au matériau, puis du matériau à la matérialité, ne se limite pas à une simple succession d'étapes techniques, mais constitue un véritable processus de production. Chaque temps révèle une dimension à la fois technique, esthétique et symbolique. Ainsi, par extension, la matérialité renvoie à la dimension sensible et conceptuelle de la matière et des matériaux dans l’œuvre. Elle englobe non seulement les propriétés physiques (texture, poids, résistance, couleur), mais aussi la façon dont ces propriétés influencent la perception, l’émotion et la signification de l’œuvre. La matérialité interroge le rapport entre la forme et la matière, entre ce que l’on voit et ce que l’on ressent.

Le dossier de l’**académie de Nancy-Metz** analysant les programmes d’arts plastiques du cycle terminal du point de vue de la matière, des matériaux et de la matérialité de l’œuvre questionne toutes les potentialités du langage plastique. Les travaux Matière(s) à sensations produits dans le cadre de la biennale des arts plastiques 2017-2019 de l’**académie d’Orléans-Tours** aborde des éléments de la didactique des arts plastiques en l’articulant à une réflexion sur les liens entre matière, matériaux et matérialité dans leurs dimensions sensibles. Elle décline un ensemble de matériaux engagé dans la

création artistique pouvant faire référence dans l'enseignement des arts plastiques. À pied d'œuvre – Biennale d'arts plastiques, édition 2017-2019 est un autre dispositif pédagogique mené par l'inspection pédagogique régionale d'arts plastiques et par la DAAC de l'académie d'Orléans-Tours. Dans cette édition explorant la thématique « Matière(s) à sensations », les élèves des écoles primaires, collèges et lycées de l'académie ont pu appréhender la matérialité à la fois dans sa dimension sensible et évocatrice tout en s'interrogeant sur la présence physique de l'œuvre, sa réception et son interprétation. La matérialité se situant à la croisée du sensible et de l'intelligible. Cette expérience s'enrichit des représentations individuelles et collectives associées aux matériaux, porteurs de significations multiples, symboliques, poétiques, culturelles. Le scénario pédagogique Simili/stimulus développé par les **académies de Limoges et de Poitiers** dans le cadre des TraAM 2020-21 (travaux académiques mutualisés) en arts plastiques, à destination d'élèves de 4e (cycle 4), vise à leur faire découvrir et ressentir les caractéristiques et la richesse des éléments plastiques des images, qu'elles soient analogiques ou numériques, en s'appuyant sur des outils et des pratiques multiples. Se dégage de cette proposition, une analyse sur la matérialité des images. L'image est donc perçue à la fois comme un tout signifiant, et sous l'angle de ses constituants plastiques, ainsi que de la matérialité de ses supports.

Geste et matérialité : une interaction féconde pour créer et comprendre

Les programmes d'arts plastiques précisent que durant le cycle 3, les élèves approfondissent leur expérience et leur réflexion sur la matérialité de la production plastique. Il s'agit d'affiner leur sensibilité aux différents constituants d'une œuvre. Cette démarche les invite à appréhender de manière concrète la réalité d'une création artistique, en mettant l'accent sur le rôle fondamental de la matière dans la perception et les effets sensibles qu'une œuvre peut susciter sur le spectateur. Au travers d'expérimentations plasticiennes, articulées à des analyses, ils peuvent explorer la matérialité non seulement comme un moyen et un support, mais aussi comme la source d'un langage à part entière. Ils peuvent découvrir ainsi que l'objet et l'image non artistiques, issus du quotidien, une fois intégrés dans une démarche de création, peuvent se transformer eux-mêmes en matériaux artistiques. Le scénario nantais Ornements en relief questionne le rapport entre geste et transformation de la matière. En manipulant, en expérimentant et en observant les diverses transformations de la matière sous l'effet de leurs gestes, donc de l'engagement du corps, les élèves ont pu développer une compréhension plus fine des liens entre technique, intention et expression, enrichissant ainsi leur projet. Prolongeant ce travail d'appropriation de la

Académie de Nantes - CC BY NC SA

matière en engageant le corps plus explicitement dans la pratique plastique, Paysage tactile, de la même académie, invite les élèves à représenter un paysage avec le doigt. Ce « simple » geste et ce contact direct avec la matière produit une matérialité très

changeante, modifiant leur représentation mentale et culturelle du paysage. Ce faisant, c'est la rencontre entre le corps de l'élève et le matériau qui lui permet de créer des effets de matière conférant à sa production plastique une dimension à la fois sensible et poétique. Dans l'enseignement des arts plastiques, les élèves sont incités à explorer cette dynamique en expérimentant un répertoire varié de gestes (gratter, modeler, superposer, etc.) et en observant leurs effets sur différentes matières (argile, peinture, tissu). Les élèves, au cycle 3, peuvent travailler de façon explicite les effets et les relations du geste et de l'instrument. Dans cette perspective, une recherche est déployée sur les qualités plastiques et les effets visuels obtenus par la mise en œuvre d'outils divers. C'est en cela que les élèves sont amenés à nourrir les dialogues entre des instruments et des matières, sous l'angle de l'expérience des effets de leurs gestes dans la production plastique.

Le dossier pédagogique mettant en lumière l'œuvre de **Julien des Monstiers**, dans le cadre de l'exposition Dedans dehors au château de Chambord, éprouve cette relation entre le geste, les outils et la matérialité de la peinture. En étudiant cette relation, les élèves découvrent que les différents types de gestes opérés impriment leurs marques sur la matière picturale. Dans cette pratique, les outils en modulent les effets jouant sur la matérialité de la peinture (épaisseur, fluidité, texture) à des fins expressives. Ce travail d'appropriation se poursuit au cycle 4 de l'enseignement des arts plastiques, notamment au travers de la question de la matérialité de l'œuvre et de l'objet. La relation geste, outil, matérialité conduit les élèves à poser un regard éclairé sur la réalité concrète d'une œuvre. Dans ce cycle des apprentissages, les élèves sont encouragés à considérer l'œuvre non seulement comme une image ou une forme, mais comme un objet matériel, doté d'une présence physique, porteur de ses procédés de fabrication. La matérialité devient un langage à part entière, où chaque matériau, chaque outil et chaque geste laisse une trace visible et sensible. Nous retrouvons cette dynamique d'appropriation de la matérialité dans la séquence pédagogique La matérialité et la qualité de la couleur de l'**académie d'Aix-Marseille** déclinée du cycle 3 au cycle 4.

Le support : l'autre « première » matière de l'œuvre d'art

Le premier élément matériel d'une œuvre d'art est son support. Loin d'être un simple réceptacle passif, il peut en constituer un élément puissamment significatif. Qu'il s'agisse d'une toile tendue, d'un bloc de marbre, d'une feuille de papier, d'un écran numérique ou même d'un espace de projection, le support n'est pas un fond neutre sur lequel viendrait se greffer une image ou une forme. Il est, au contraire, une possible interface sensible qui dialogue avec l'artiste, le spectateur et l'espace d'exposition, engageant une relation sensible et intelligible. Dès qu'une œuvre prend forme, le support impose ses contraintes, ses qualités et ses résistances, influençant chaque geste créatif, à l'instar de **Franck Stella** qui souhaitait révéler la matérialité du tableau dans ses Shaped Canvas, loin de toute interprétation métaphorique. Dans sa pratique picturale, la réalité matérielle de la toile doit être appréhendée littéralement par le spectateur. Il propose de rentrer en contact direct avec l'œuvre, sans artifice mais dans un rapport sensible porteur de sens. Ainsi, le support, qu'il s'agisse d'une surface plane, d'une masse ou d'une structure en volume, constitue le réceptacle d'inscription des traces laissées par les outils employés et les gestes produits. Il peut jouer différents rôles dans le processus créatif. Il peut être un simple espace de réception de matières

sans influencer leur rendu comme il peut influer directement sur les effets des matériaux ou des gestes qui lui sont appliqués, exhumant sa propre matérialité. Initialement limité à des matériaux bruts, l'attention au support a connu une évolution constante à travers l'histoire de l'art en qualité comme en intentionnalité, se diversifiant et se sophistiquant au point de devenir une composante essentielle de l'œuvre où sa présence et ses caractéristiques peuvent contribuer pleinement à sa signification. Cette évolution du support dans l'histoire de l'art est mise en lumière dans le dossier pédagogique La question du support produit en collaboration entre les **académies de Nancy-Metz et de Normandie**. En affirmant l'importance du support dans la production artistique, celui-ci se transforme, se morcèle, rendant ainsi son identification de plus en plus complexe.

Le parcours intitulé La matérialité de la peinture du **musée d'art moderne de la ville de Paris** interroge les liens entre la peinture et son support. En effet, notamment à la fin du 19e siècle, la modernité a vu émerger de nombreux artistes affirmant la matérialité de la peinture, en voulant en partie s'éloigner de la photographie, un nouveau langage plastique alors fascinant dans sa capacité à exalter le réalisme au-delà des ressources de la représentation picturale. Le scénario pédagogique de cycle 4 Peinture et matérialité, développé par les académies de Limoges et de Poitiers, aborde la peinture comme une matière en dialogue constant avec son support.

Robert Delaunay. *Symphonie colorée*. Palais de Tokyo. Domaine public. Wikimedia

Dans l'œuvre de **Pierre Soulages**, le choix du support lui permet de faire contraster ses masses de couleur noire avec la blancheur de la feuille de papier ou de la pâleur de la toile tendue. Partant, le support devient le révélateur de toute la matérialité de la peinture noire employée par l'artiste. La matière noire n'est donc pas une absence de couleur, mais bien une matière colorée, capable d'absorber et de restituer la lumière en fonction de la position du regardeur. Le support clair agit comme un écran révélateur de toutes ces nuances de noir. L'actualité éduscol Pierre Soulages, peintre du noir et de

la lumière dépeint cette recherche permanente de l'artiste afin de faire émerger toute la présence matérielle de sa peinture noire, qu'il qualifie d' « Outrenoir ». Dans ses Monochromes, la lumière semble creuser le noir, témoignant de l'intention de réduire l'art à l'essentiel, à la matière elle-même et à son potentiel de révélation. Ainsi, dans ses œuvres, le noir n'est pas une absence de lumière, mais une matière dense et vibrante, capable d'absorber et de réfléchir la lumière de manière inattendue. Ses toiles ne sont pas des surfaces planes, mais des champs de travail où la peinture, souvent appliquée en couches épaisses, est grattée, striée, creusée avec des outils comme le pinceau, le couteau, ou même des brosses métalliques. Ces gestes laissent des traces qui révèlent la profondeur de la matière. Le noir, chez lui, n'est pas une fin, mais un commencement, une surface à partir de laquelle la lumière peut naître à la surface de la toile. En cela, le noir devient une « couleur de lumière ». En effet, selon l'angle et l'intensité de la lumière, ses toiles changent d'aspect, passant du mat au brillant, de l'opaque au transparent. Cette réversibilité entre matière et lumière fait de ses œuvres des objets presque sculpturaux, où le spectateur est invité à se déplacer pour en saisir toutes les nuances et en ressentir toute la matérialité.

Le support, par sa nature même, structure et transforme notre perception de l'espace, agissant comme un médiateur entre l'œuvre et son environnement, entre l'artiste et le spectateur. Il ne se limite pas à délimiter une surface ou un volume, il organise la manière dont nous parcourons et ressentons l'espace qui entoure l'œuvre. Chez **Robert Rauschenberg**, les Combines, œuvres hybrides situées à la frontière entre peinture et sculpture, assemblages et collages, réinventent radicalement la notion de support et de matérialité en fusionnant des éléments hétéroclites dans un même espace pictural. Ici, le support n'est plus une simple surface plane, mais un champ d'expérimentation tridimensionnel, où toile, objets trouvés, photographies, tissus, éléments organiques ou industriels coexistent dans un assemblage polymorphe. La toile, souvent partiellement recouverte ou déchirée, dialogue avec des fragments de meubles, des pneus, des couvertures, des pages de journaux ou des animaux empaillés, transformant l'œuvre en un paysage matériel où chaque composant conserve sa propre identité tout en contribuant à l'ensemble de la composition. La matérialité y est brute, tangible. Les textures rugueuses du bois, le métal froissé, les tissus usés ou les traces de peinture épaisse créent un dialogue sensoriel qui défie les catégories traditionnelles de l'art. Rauschenberg ne se contente pas d'appliquer de la peinture sur un support ; il intègre le support lui-même dans la composition, le détournant de sa fonction initiale pour en faire l'un des matériaux de l'œuvre. Le support devient alors un espace d'expérimentation abolissant les frontières traditionnelles entre fond et forme, matière brute et matériau. Le support s'efface au profit d'une œuvre exhumant toutes les opérations plasticiennes engagées dans son processus créatif. Il devient ainsi un fragment de réalité nourrissant la composition. En ce sens, ses Combines incarnent une révolution matérielle, où l'art n'est plus une illusion, mais une expérience concrète, un monde en soi, où chaque détail compte et où la matérialité elle-même devient langage. Dans le cadre de la séquence d'arts plastiques Défi rangement, mise en place dans l'**académie de Toulouse** et questionnant la matérialité et la qualité de la couleur, les élèves de cycle 4 sont amenés à interroger les caractéristiques physiques des matériaux à l'aide d'éléments colorés rapportés de chez eux. La matière colorée assoit l'homogénéité de la création plastique rendant indiscernable ce qui relève du matériau et du support. Ce travail d'assemblage de masses colorées dévoile toute la matérialité de la production plastique se déployant ainsi dans l'espace de la classe.

Les caractéristiques physiques et sensibles des matériaux : répertoires et langages de la création

Les caractéristiques physiques et sensibles des matériaux dans la pratique artistique ne se réduisent pas à de simples propriétés techniques ou esthétiques : elles constituent le socle même d'un langage plastique vecteur de sens, d'émotion et d'expérience. La matière engage une dimension sensorielle et symbolique qui transcende la forme pour toucher à l'essence même de la production plastique. La séquence pédagogique de l'**académie de Rennes** Nuages et matérialité questionne les liens entre choix plastiques, matérialité et signification. En quoi le choix des matériaux a-t-il un impact sur la production artistique ? Quels contraintes induisent-ils ? Quels effets (sens, impressions…) produisent-ils ? Ainsi, suite à l'observation des nuages, les élèves sont amenés à réaliser une production plastique engageant une diversité de matériaux évoquant sa dimension poétique et onirique. Nous retrouvons cette même recherche

Andrea Mantegna. *Oculus au plafond de la Chambre des époux*. Château Saint-Georges. Domaine public. Wikimedia

poétique et onirique dans l'œuvre de **Meret Oppenheim**, Le Déjeuner en fourrure, réalisée en 1936. Cette œuvre surréaliste se propose de transformer des objets banals (une tasse à thé, une coupelle et une cuillère), en une œuvre étrange, dérangeante et poétique jouant sur un détournement à dimension symbolique. La fourrure animale recouvrant ces objets du quotidien permet à l'artiste d'opérer une transgression des catégories, entre l'utile et l'inutile, le doux et le rugueux, le sensible et le repoussant, bouleversant ainsi notre perception du réel. Ce choix d'une matière hybride, douce au toucher mais évoquant l'animal, transforme un objet fonctionnel en une œuvre énigmatique et surréaliste, chargée d'une ambiguïté érotique et onirique. Ainsi, la transformation opérée par l'artiste ne se limite pas à un simple collage : elle réinvente l'objet en lui attribuant une nouvelle identité, à la fois absurde et fascinante. La fourrure, matière organique et vivante, contamine la porcelaine lisse et géométrique, comme si l'œuvre était le résultat d'une métamorphose monstrueuse ou d'un rêve éveillé. En cela, Meret Oppenheim révèle le pouvoir subversif de la matière.

Le changement de matérialité peut ainsi bouleverser l'ordre établi, en jetant le trouble, en ouvrant la voie à une forme de réenchantement du réel. À cet égard, le scénario pédagogique L'objet change de peau et il nous surprend, issu des académies de Limoges et Poitiers, traite de la matérialité de l'objet en proposant aux élèves de transformer la « peau » d'objets du quotidien. Il en résulte un ensemble de productions plastiques oscillant entre partis pris poétique et onirique, voire subversif.

La matérialité de la lumière : l'extension de la notion de matériau en art

Les programmes d'arts plastiques du cycle 1 au cycle terminal abordent de façon récurrente « la matérialité de la production plastique et la sensibilité aux constituants de l'œuvre ». Ces questionnements sont intrinsèquement liés à la pratique des arts plastiques. En effet, la transformation de la matière à des fins de création est un élément structurel des arts plastiques permettant d'engager les élèves dans la pratique, la fabrication, la création, toutes devenant support de réflexion et d'apprentissage. Travailler la matière pour lui donner forme à des fins de création combine une perception du monde fondée sur l'intelligence sensible et une appréhension du monde réfléchie et raisonnée. Le matériau est donc l'élément central dont l'élève se saisit et travaille pour réaliser une production plastique à dimension artistique. Dans la pratique des arts plastiques, tout est potentiellement matériau. Ainsi, toute production plastique à dimension artistique comporte un ou des matériaux ayant une matérialité plus ou moins affirmée. S'engager dans un processus créatif nécessite donc de solliciter des matériaux se caractérisant par une plasticité et une résistance conférant une matérialité spécifique à l'œuvre. Ces matériaux ont une présence physique dans l'œuvre pouvant également servir de révélateur à des matériaux dits « non physiques ». Nous retrouvons cette dynamique révélatrice dans l'œuvre de **Pierre Soulages** réalisée dans l'abbaye de Conques où il y dispose des vitraux de différentes valeurs de noir. La matière du verre colorée ayant comme caractéristique la transparence devient ainsi le révélateur d'une perception matérielle de la lumière. Celle-ci faisant varier les tonalités des vitraux selon l'heure de la journée, l'œuvre devient changeante porteuse d'une matérialité active.

Dans l'enseignement des arts plastiques, l'élève est amené à prendre conscience et à apprécier la diversité des matériaux et, progressivement, à être attentif aux propriétés de la matière. En cela, l'élève développe sa sensibilité à la matérialité de la production plastique. En ce sens, il est capable d'identifier des matériaux à relier à la lumière : la laissant passer en la colorant, ou en la réfléchissant, voire en l'émettant ; lui rendant ainsi sensible une matérialité de la lumière dans la création artistique. Le scénario pédagogique Donnez à la lumière le premier rôle dans une sculpture interactive et par une mise en scène étudiée de l'**académie de Martinique** engage les élèves dans une appropriation de la lumière par l'intermédiaire de ces « matériaux de lumière ». Les élèves de 6e réalisent un assemblage de différents matériaux hétéroclites. Ils éprouvent leur sensibilité à une matérialité de la lumière. Manipuler la lumière à des fins de création ouvre à une appropriation de l'espace et du monde sensible. Dans cette perspective, le *light painting* ou « peinture de lumière » en français, est une technique photographique consistant à utiliser une source de lumière en mouvement pendant une pose longue pour créer des effets visuels ou des dessins lumineux sur une photo. Cette pratique joue avec le temps et l'espace, la lumière n'existant que le temps de la pose. La photographie fixe cet instant, le rendant permanent. C'est une façon de capturer l'invisible et de le rendre visible, presque tangible. Elle transforme la lumière

pour lui conférer une matérialité palpable. La séquence réalisée dans le cadre des TraAM arts plastiques 2022-2023 de l'**académie de Toulouse** Light Painting « Créature » propose de déployer cette pratique du *light painting* avec des élèves de troisième. Ils s'approprient cette technique en engageant leur propre corps dans la production artistique. Ce travail de performance leur permet d'appréhender la lumière, le temps et l'espace comme des éléments tangibles et matériels à faire dialoguer, qu'ils se plaisent à transformer à des fins de création artistique. C'est pourquoi le *light painting* est un art de l'instant, où le geste, sa vitesse, sa trajectoire, sa force détermine la forme finale. C'est une chorégraphie lumineuse, où le corps devient outil de modelage. Le geste qui trace la lumière n'est pas un simple mouvement mécanique, mais une extension de son intention perceptive. Le corps devient l'instrument qui nous fait ressentir l'espace et le transforme par la lumière. Celle-ci n'est pas seulement vue, elle est vécue à travers le mouvement du corps comme une matière sensible. Elle devient une prolongation du corps, une façon de s'incarner dans le monde afin de faire émerger du sens. L'artiste **James Turrell**, en créant des environnements immersifs où la lumière devient presque palpable, développe l'idée de **Maurice Merleau-Ponty**, dans La phénoménologie de la perception, selon laquelle nous ne percevons pas l'espace, nous l'habitons. La lumière devient la texture de son œuvre en proposant au spectateur une expérience sensible. James Turrell ne travaille pas la lumière comme un simple effet visuel, mais comme une matière à part entière, une substance palpable, presque tangible, capable de modeler l'espace et de transformer la perception. Son approche artistique consiste à donner à la lumière une présence physique, une densité, une matérialité. Turrell l'utilise pour créer des volumes, des surfaces, des atmosphères qui semblent solides ou liquides. Dans ses installations intitulées Aten Reign, exposées en 2013 au musée Guggenheim de New-York, il transforme le musée en plongeant le spectateur dans une lumière colorée jouant sur différentes variations de tonalités brouillant les repères et donnant l'impression de baigner dans une matière lumineuse, presque tactile. La lumière devenant de ce fait un élément palpable, tangible dans lequel on s'immerge, plutôt qu'un simple phénomène optique. La lumière n'éclaire plus seulement, mais elle remplit, délimite, structure l'espace.

La matérialité du numérique : redonner du corps au code

Florence de Mérédieu, dans *Histoire matérielle et immatérielle de l'art moderne et contemporain*, analyse les liens entre matérialité et immatérialité dans l'art numérique rendant ces deux éléments indissociables dans les pratiques artistiques numériques contemporaines. En effet, le virtuel donne l'illusion permanente de se libérer de la matière, à l'instar d'une image générée par IA ou de la proposition de vivre une expérience digitale immersive. Pourtant, il dépend toujours d'un support physique (ordinateurs, réseaux, logiciels) et d'une infrastructure matérielle (*data centers*, câbles, écrans). À l'origine, le terme « virtuel » (issu du latin *virtus*, signifiant « force » ou « la vertu ») désigne ce qui existe en puissance, comme un possible latent, en opposition à ce qui est. En cela, le virtuel n'est que la reproduction artificielle du réel, opérée grâce à des outils informatiques qui, bien que matériels et concrets, génèrent des expériences ou des environnements matériels non isomorphes avec la matérialité physique. Le virtuel n'est pas une abstraction, mais une réalité simulée, ancrée dans des dispositifs ayant leurs propres matérialités et générant des espaces virtuels porteurs d'expérimentations ouvrant vers de nouvelles matérialités.

64 Arts plastiques

Cette question est développée dans le cadre des TraAM arts plastiques 2023-24, dans les académies de Limoges et de Poitiers. Le projet *Vers une immatérialité de l'œuvre ?* mené en partenariat entre le lycée Jean Macé et la Villa Perochon (centre d'art contemporain photographique de Niort), interroge l'immatérialité supposée de l'image numérique au cycle terminal s'appuyant sur le questionnement plasticien *La matière, les matériaux et la matérialité de l'œuvre*. Ce questionnement se déploie dans les programmes d'arts plastiques avec une analyse plus spécifique de la reconnaissance artistique et culturelle de la matérialité et de l'immatérialité de l'œuvre : perception et réception, interprétation, dématérialisation de l'œuvre. Cette approche donne la possibilité à l'élève d'interroger tout le processus créatif mis en œuvre dans la réalisation d'une production plastique et/ou numérique à dimension artistique. Ainsi, la démarche créatrice engageant une dimension numérique crée une tension entre matérialité et immatérialité, où l'élève est amené à ressentir cette proximité avec la matière ainsi que sa mise à distance dans une forme d'entrelacement constant.

Le numérique a radicalement modifié le concept de matérialité même. Ce dernier n'étant plus associé principalement aux éléments tangibles et à la physicalité, mais intrinsèquement lié aux expériences virtuelles. Il s'agit là d'une transformation profonde de notre perception de la matérialité dans une ère numérique où tangible et immatériel s'entremêlent. La matérialité ne caractérise plus uniquement ce qui est matériel, mais elle devient un mode de relation impliquant une corporéité. La façon dont nous expérimentons la matière est donc centrale ; c'est ce lien entre nos perceptions, nos sensations et notre environnement qui forme la matérialité du monde.

L'exposition Les Immatériaux organisée en 1985 au Centre Pompidou par le philosophe **Jean-François Lyotard**, avait pour ambition d'explorer les bouleversements induits par les nouvelles technologies sur la société et, plus spécifiquement, sur la transformation de notre mode de rapport au monde. Dans une approche dite postmoderne, cette exposition invitait le spectateur à reconsidérer sa propre relation avec la matière au-delà de sa seule acception physique en développant l'idée d'une relation expérientielle avec la matière, une façon de repenser la relation de l'humain au monde. Les technologies numériques ont élargi notre rapport au réel ; la matière n'étant plus appréhendée du seul point de vue physique, elle revêt une dimension hybride capable de porter de l'information et d'interagir avec son environnement. Les réseaux connectés transforment les objets en entités intelligentes, étendant leur influence au-delà de leur forme tangible. Même les liens affectifs s'en trouvent modifiés. Le numérique crée une illusion de proximité comme un lien invisible reliant les individus à distance, générant une co-présence digitale où l'émotion transcende l'espace physique. La matière n'est plus seulement solide et stable, mais dynamique, communicante et ouverte. Nos relations sociales sont liées aux formes matérielles en tant que nos interactions humaines sont façonnées et influencées par les objets et les environnements matériels formant notre identité. Ces nouvelles formes de relations organisées autour d'un matériau ouvert, porteur de nos interactions, nous invite à penser de nouvelles manières de réenchanter le monde. Cette approche contemporaine de la matérialité nous interroge sur le dépassement d'une vision strictement cartésienne de la matière. Ce déploiement d'une matérialité ouverte permis par l'avènement des nouvelles technologies, incite à penser l'immatériel non comme une disparition de la matière mais comme l'avènement d'une nouvelle matérialité active qui serait en prise avec une matière invisible.

Les arts numériques se saisissent de ces questionnements en donnant la possibilité aux spectateurs de vivre de nouvelles expériences dans des espaces virtuels et immersifs. L'œuvre numérique générative intitulée *Sur-natures*, sous-titre : *Paradis artificiel*, réalisée par l'artiste français **Miguel Chevalier**, créé un environnement virtuel simulant la nature et la croissance des plantes. Dans cette œuvre, l'artiste propose aux spectateurs de vivre une expérience sensible où les éléments se déploient, croissent selon leur propre temporalité, loin de toute référence à notre temps vécu. Cette nature simulée évoluant dans un environnement virtuel reconfigure notre rapport au temps et au paysage en nous exposant à ces nouvelles matérialités génératives. En opposition à une vision immatériel du numérique, **Grégory Chatonsky** développe de son côté l'idée d'une hypermatérialité du numérique. Pour lui, le codage résulte d'une inscription matérielle sur une surface écranique traduit par la suite sous la forme de pixels. Ces différentes opérations font émerger différentes couches de matérialité produisant une hyper-matérialité, bien loin de toute représentation d'un immatériel digital.

La matérialité photographique : une écriture matérielle avec la lumière

Alors que les études photographiques se sont traditionnellement concentrées sur les enjeux de représentation, analysant la photographie comme un langage exclusivement visuel, un tournant épistémologique et critique s'opère aujourd'hui, plaçant la matérialité du médium photographique au cœur des réflexions contemporaines.
La photographie est à considérer comme un objet physique porteur de sa propre matérialité, et non plus seulement comme une simple captation du réel.
L'exposition physique Épreuve de la matière - La photographie contemporaine et ses métamorphoses, qui s'est déroulée à la BnF, analyse ce médium précisément au prisme de sa matérialité. Ainsi, la puissance de la photographie ne réside pas tant dans ce qu'elle montre, mais aussi dans ce qu'elle est : un objet chargé d'histoire, de matière et de mémoire. L'exposition se décline en quatre grandes parties, la première, « L'image tangible, la matière incarnée », opère une sélection de diverses photographies mettant en avant la matérialité même de l'image photographique, jouant sur le flou, le changement de cadrage, etc… La seconde intitulée « L'image labile, la matière expérimentée », se propose de dévoiler tous les processus à l'œuvre dans la fabrication d'une image photographique. La troisième partie « L'image hybride, la matière métamorphosée », développe une réflexion autour de l'hybridation des supports et des techniques ouvrant la voie à des formes d'expression multimodales où la photographie parvient à révéler ses propres effets de matière. Enfin, la quatrième partie, « L'image précaire, la matière fragilisée », évoque la dimension temporelle intrinsèque au médium photographique comme le révélateur d'une matérialité en devenir. Ce que ces œuvres rendent visibles, c'est l'agentivité des objets photographiques. La photographie devient un objet avec lequel nous entrons en relation en tant que véhicule de nombreux affects proposant par là même aux spectateurs une expérience esthétique.

Michel Poivert, Professeur d'histoire de l'art à l'Université Paris I Panthéon Sorbonne, dans le MOOC Digital Paris Matérialité et procédés anciens, analyse l'évolution de la photographie contemporaine. Pour lui, cette dernière se concentre sur la recherche d'une matérialité accrue, notamment dans ses propres mécanismes de production mais aussi du point de vue de sa forme esthétique.

La matérialité cachée du *streaming* musical : repenser l'enseignement de la musique à l'ère numérique

Le paradoxe de l'accès illimité

C'est une époque singulière où l'accès quotidien à la culture musicale n'a jamais été aussi simple en apparence. Quelques clics sur les terminaux suffisent à convoquer des dizaines de millions de titres, traversant les genres, les époques et les géographies. Cette abondance vertigineuse s'accompagne pourtant d'un paradoxe troublant que les enseignants d'éducation musicale ne peuvent plus ignorer. Alors qu'est célébrée cette démocratisation apparente, l'on assiste simultanément à une transformation profonde des modalités d'écoute, de création et de transmission de la musique. D'où le besoin d'interroger ce que l'on nomme trop rapidement la « dématérialisation » de la musique, en s'appuyant notamment sur les analyses développées dans le film documentaire du journaliste **Sophian Fanen** et du réalisateur **Benoît Pergent** consacré à l'impact du *streaming* sur l'industrie musicale. Il s'agit de comprendre comment l'enseignement musical peut s'adapter à ces mutations pour former des auditeurs conscients et critiques, capables de naviguer dans un écosystème technique complexe tout en préservant leur autonomie esthétique.

Le mythe de l'immatériel : une infrastructure bien réelle

L'expression consacrée de « dématérialisation » constitue un leurre sémantique qui masque une réalité bien tangible. Si les vinyles et les disques compacts ont progressivement disparu des étagères et des rituels d'écoute, la musique numérique repose sur des infrastructures matérielles dont l'ampleur et le poids écologique ne cessent de croître. Derrière le geste apparemment « immatériel » du *streaming* se cachent des câbles sous-marins qui traversent les océans, des centres de données énergivores qui fonctionnent sans interruption, des serveurs qui chauffent et consomment de l'électricité, des terminaux de lecture qui se renouvellent à un rythme accéléré. Cette matérialité invisible pose un défi pédagogique majeur pour les enseignants qui doivent désormais rendre perceptible ce qui ne se voit pas, donner corps à ce qui semble s'être évaporé dans les nuages du *cloud computing*.

Le passage du support physique[72] au fichier numérique implique également une matérialité spécifique de l'encodage que les élèves gagneraient à comprendre. Le format MP3, qui a révolutionné le rapport à la musique dans les années 2000, opère une compression dite destructrice en supprimant certaines fréquences jugées moins perceptibles pour l'oreille humaine. Cette opération technique, invisible à l'oeil nu, modifie profondément notre standard de qualité auditive. Une génération entière a grandi en écoutant de la musique compressée, acceptant comme norme ce qui constitue en réalité un compromis entre qualité sonore et poids de stockage.
Pour l'enseignant, il s'agit de révéler cette dimension technique non pas comme une anecdote, mais comme un élément constitutif de l'expérience musicale actuelle. La musique que tout un chacun écoute n'est jamais neutre dans sa transmission ; elle porte en elle les traces des choix techniques et économiques qui président à sa diffusion.

[72] Bien avant la résonance accordée au *phonographe* de **Thomas Alva Edison** c'est au typographe **Édouard-Léon Scott de Martinville** que revient l'invention de la première machine capable de donner une trace graphique d'un son, le *phonautographe*. Édouard-Léon Scott de Martinville demeure à ce jour le premier à avoir conservé sa voix (1860) : cette trace a été reconvertie en son en 2008 par l'équipe de David Giovannoni chez First Sounds. Canal académies

Brève histoire du MP3[73]

La création du MP3 souvent médiatiquement attribuée au seul Institut Fraunhofer est historiquement plus complexe si l'on se concentre sur la paternité du format ; ce dernier est en effet issu des travaux du Moving Pictures Experts Group (MPEG) Audio Group mettant en compétition à la fin des années 1980 plusieurs équipes d'ingénieurs, dont celle regroupant sous le nom Musicam, le Centre français commun d'études de télévision et télécommunications (CCETT), le constructeur japonais Matsushita, le géant néerlandais Philips ainsi que l'IRT (Institut für Rundfunktechnik) afin de développer des techniques de compression audio, en concurrence avec le groupe Aspec de l'Institut Fraunhofer. La qualité du Musicam, constituant le fondement des couches 1 et 2, est officiellemment actée en juin 1991, tandis que Fraunhofer expérimente, entre autres, le codage stéréophonique joint pour la couche 3, validant en novembre 1991 l'algorithme MPEG-1 Audio Layer 3, futur mp3. Des ingénieurs français comme **Yves-François Dehéry** ont souligné que le CCETT avait particulièrement influencé la troisième couche, et que la répartition des brevets n'a pas nécessairement reflété les contributions techniques réelles, le format résultant d'un compromis politique et industriel au sein du groupe MPEG.

L'histoire de *Tom's Diner* de **Suzanne Vega** occupe une place singulière dans la genèse du MP3, non pas comme origine technologique, mais comme référence expérimentale emblématique du codage audio perceptuel : à la fin des années 1980, **Karlheinz Brandenburg** (Institut Fraunhofer) utilise de manière récurrente l'enregistrement a cappella de *Tom's Diner* (1987) comme *benchmark*, car la voix féminine seule met en évidence les artefacts de compression (pré-écho, effets de masquage psychoacoustique, etc.). Malgré les témoignages apocryphes, cette chanson a manifestement été utilisée pour affiner et optimiser les modèles et les algorithmes, conduisant à une *mythologisation* a posteriori du morceau comme « première chanson MP3 », alors qu'il s'agit en réalité d'une piste de calibrage scientifique.

Until It Sleeps (1996) est en revanche l'un des premiers exemples documentés d'un single majeur diffusé massivement en MP3 à grande échelle transnationale : sa diffusion rapide le 10 août 1996 sur un réseau IRC (Internet Relay Chat) coïncide avec la maturité technique du MP3 et préfigure les conflits juridiques ultérieurs, dont notamment l'affaire Napster et la plainte de **Metallica** pour piratage. Le clip dédié, réalisé par le réalisateur **Samuel Bayer**, peut aussi être associé ironiquement à cette histoire. Conçu en effet comme un objet audiovisuel à valeur symbolique, ledit clip s'inscrit pleinement dans l'économie centralisée et promotionnelle de MTV.

À cette époque, la circulation illicite concernait principalement l'audio – les fichiers musicaux étaient déjà largement partagés via les premiers réseaux *peer-to-peer* – alors que le piratage vidéo restait encore marginal en raison des contraintes techniques et de la domination des chaînes de télévision.

[73] **Fanen, S**. (2017). Rien ne sera plus comme avant. Comment le MP3 a mangé le disque. In *Boulevard du stream : Du MP3 à Deezer, la musique libérée* (p. 21-68). Le Castor Astral.

L'économie de l'attention et la mutation des formes artistiques

Le modèle économique du *streaming* a introduit des contraintes nouvelles qui sculptent directement la forme artistique. Les chercheurs parlent désormais du « Spotify effect »[74] pour désigner cette influence directe des plateformes sur la création musicale elle-même. Les règles du jeu sont simples mais implacables : les plateformes ne rémunèrent un artiste que si le titre est écouté pendant au moins trente secondes. Cette durée seuil, apparemment anodine, a des conséquences structurelles majeures sur l'écriture musicale contemporaine. Selon les travaux du musicologue **Hubert Léveillé Gauvin**[75] de l'Ohio State University, la durée moyenne des introductions instrumentales s'est effondrée, passant de vingt secondes dans les années quatre-vingt à seulement cinq secondes aujourd'hui.

Cette accélération ne relève pas d'une évolution naturelle du goût musical, mais d'une adaptation stratégique à un environnement économique particulier. La peur du « skip », ce geste de *zapping* instantané que permet l'interface du *streaming*, force de facto les compositeurs à placer le refrain accrocheur dès les premières secondes du morceau pour capturer l'attention immédiate de l'auditeur. L'oeuvre musicale perd ainsi une partie de son autonomie artistique pour devenir également une réponse à une contrainte algorithmique et économique. Les longues introductions atmosphériques, les développements progressifs, les montées en tension patientes qui caractérisaient de nombreux classiques du rock ou de la pop deviennent des luxes que peu d'artistes peuvent encore se permettre dans un contexte où chaque seconde compte dans la bataille pour l'attention.

Cette transformation pose aux enseignants d'éducation musicale une question fondamentale : comment analyser une œuvre lorsque sa forme même est déterminée par des impératifs externes au champ artistique ? Comment maintenir une approche critique de la création musicale tout en reconnaissant que les artistes contemporains évoluent dans un système de contraintes radicalement différent de celui de leurs prédécesseurs ? L'enseignement musical doit intégrer cette dimension socio-économique non comme une digression, mais comme un élément central de la compréhension des oeuvres contemporaines.

Algorithmes et bulles de filtres : l'illusion de la diversité

La promesse du *streaming* était celle d'un accès universel à l'ensemble du patrimoine musical mondial, une bibliothèque de Babel sonore contenant environ cent millions de titres accessibles instantanément. Cette promesse crée une illusion de diversité qui mérite d'être interrogée avec les élèves. En réalité, la distribution de cette offre pléthorique est régie par des algorithmes de recommandation qui tendent à enfermer l'utilisateur dans des boucles de similarité, parfois désignées sous l'expression controversée « bulles de filtres »[76]. L'algorithme apprend nos préférences et nous propose des titres similaires, créant un cercle où nos goûts se voient constamment confirmés et renforcés, mais rarement challengés ou élargis. Cette logique s'oppose radicalement à l'ancien modèle de prescription musicale incarné par le disquaire ou l'animateur radio. Ces médiateurs humains pouvaient surprendre, proposer des associations inattendues, créer des ponts entre des univers musicaux apparemment éloignés. L'algorithme, malgré sa puissance de calcul, tend à conforter l'élève dans ce qu'il connaît déjà, à optimiser son confort d'écoute plutôt qu'à élargir son horizon

[74] Expression utilisée par les chercheurs en musicologie et en sociologie de la culture pour désigner l'ensemble des transformations stylistiques, structurelles et créatives induites par les contraintes économiques et techniques des plateformes de streaming musical. Ce phénomène englobe notamment la règle des trente secondes d'écoute minimale pour la rémunération des artistes et ses conséquences sur l'écriture musicale.

[75] Ses recherches portent sur l'évolution des structures musicales à l'ère du *streaming*, notamment la réduction drastique de la durée des introductions instrumentales dans la musique populaire contemporaine. Ses travaux démontrent le passage d'introductions de vingt secondes dans les années 80 à cinq secondes aujourd'hui, illustrant l'influence directe des modèles économiques sur la forme artistique.

Léveillé Gauvin, Gauvin, H. (2018). *On popular music and media: Analyzing changes in compositional practices and music listening choice behavior using attention economy principles*[Doctoral dissertation, Ohio State University].

[76] Concept initialement développé par **Eli Pariser** dans son ouvrage *The Filter Bubble : What the Internet Is Hiding from You* (2011). Voir aussi à ce sujet : **Joëlle Farchy** et **Steven Tallec**. « De l'information aux industries culturelles, l'hypothèse chahutée de la bulle de filtre », *Questions de communication* [En ligne], 43 | 2023, mis en ligne le 01 octobre 2023. http://journals.openedition.org/questionsdecommunication/31474

culturel. On observe ainsi un phénomène paradoxal : alors que l'offre n'a jamais été aussi vaste, l'écoute effective peut devenir plus homogène, plus prévisible, moins aventureuse. Pour l'enseignant, cet enjeu rejoint les préoccupations centrales de l'éducation musicale et de l'éducation à la citoyenneté numérique. Comment former des auditeurs capables de sortir de ces bulles algorithmiques ? Comment développer une curiosité musicale active face à des systèmes conçus pour anticiper et satisfaire nos désirs avant même que nous les formulions ? Ces questions dépassent le cadre strictement musical pour toucher à la capacité de chacun à maintenir une autonomie de jugement dans un environnement numérique de plus en plus prescriptif.

Pistes pédagogiques : de la consommation passive à l'écoute consciente

Face à ces transformations, l'enseignement de l'éducation musicale doit intégrer la compréhension de l'écosystème technique qui médiatise notre rapport à la musique. Il ne s'agit plus seulement d'analyser l'œuvre sonore en elle-même, mais d'analyser également le dispositif qui nous la livre. Cette double focale implique de nouveaux scénarios pédagogiques qui mobilisent les compétences du cadre de référence des compétences numériques tout en restant fidèles aux objectifs fondamentaux de l'éducation musicale.

Une première approche consiste à rendre visible la compression audio en travaillant sur ce que l'on pourrait appeler l'archéologie du son. À l'aide de logiciels de musique assistée par ordinateur accessibles comme *Audacity*[77] ou l'application *Fizziq*[78], l'enseignant peut proposer aux élèves une écoute comparative du même extrait musical en format non compressé et en format MP3 fortement compressé. L'exercice d'écoute à l'aveugle permet de tester si les élèves perçoivent effectivement la différence, notamment la perte d'aigus et la texture métallique caractéristique d'une forte compression. La visualisation du spectrogramme de ces deux fichiers révèle graphiquement les « trous » dans le spectre sonore du MP3, matérialisant ainsi ce qui reste imperceptible à l'oreille non exercée. Cette activité, qui relève à la fois de la perception et de la manipulation d'objets sonores, permet de comprendre que le numérique n'est pas magique mais repose sur des compromis techniques dont nous devons être conscients.

Une seconde piste consiste à faire expérimenter aux élèves les contraintes du *streaming* en les plaçant dans la position de producteurs. Le défi créatif pourrait s'énoncer ainsi : comment adapter un « tube » des années quatre-vingt, caractérisé par une longue introduction, pour qu'il ne soit pas immédiatement « skippé » sur les plateformes de *streaming* ? En travaillant sur un titre comme *Thriller* de **Michael Jackson** ou *Stairway to Heaven* de **Led Zeppelin**, les élèves doivent couper l'introduction, déplacer le refrain pour qu'il intervienne dans les quinze premières secondes, et éventuellement augmenter le volume global par compression dynamique. Cette manipulation technique, réalisable sur tout logiciel de montage simple, débouche naturellement sur un débat critique essentiel : le morceau ainsi transformé est-il « meilleur » ? A-t-on perdu l'intention narrative de l'auteur ? Cette mise en situation permet de comprendre de l'intérieur les tensions entre impératifs économiques et liberté artistique.

Une troisième approche, particulièrement adaptée au lycée et aux enseignements de sciences numériques et technologie, consiste à analyser concrètement les mécanismes de recommandation algorithmique. En demandant aux élèves d'observer les cinq

[77] Logiciel libre et gratuit de traitement du son, permettant l'enregistrement, le montage et l'analyse de fichiers audio. Particulièrement adapté à l'enseignement pour visualiser les spectrogrammes et comparer différents formats de compression audio.

[78] Application gratuite qui transforme *smartphones* et tablettes en laboratoire mobile en utilisant leurs capteurs intégrés (son, lumière, mouvement). Particulièrement adaptée à l'enseignement des sciences pour collecter des données en temps réel, réaliser des graphiques et créer des cahiers d'expériences numériques.

premiers titres proposés par leur application musicale habituelle, puis en comparant ces observations en classe, on peut mettre en évidence soit une uniformisation troublante avec les mêmes *hits* viraux pour tout le monde, soit une ultra-personnalisation qui enferme chacun dans sa bulle. L'exercice peut se prolonger par une « recherche inversée » où les élèves doivent chercher activement une oeuvre qu'ils sont certains que l'algorithme ne leur proposera jamais, qu'il s'agisse de musique contemporaine savante, de musiques traditionnelles extraeuropéennes ou de genres marginaux. Cette démarche vise à réapprendre le geste actif de la recherche musicale, à reprendre le contrôle face au rôle prescripteur de la machine.

Former des auditeurs éclairés et autonomes

L'enseignement de la musique à l'ère du *streaming* nécessite une refondation partielle de ses objectifs et de ses méthodes. Il ne suffit plus de transmettre les savoirs musicologiques traditionnels, aussi essentiels soient-ils. Il faut également former des auditeurs conscients des infrastructures techniques, des modèles économiques et des logiques algorithmiques qui façonnent leur expérience musicale quotidienne. Cette ambition rejoint les objectifs plus larges de l'éducation aux médias et à l'information, ainsi que ceux du développement de l'esprit critique face au numérique.

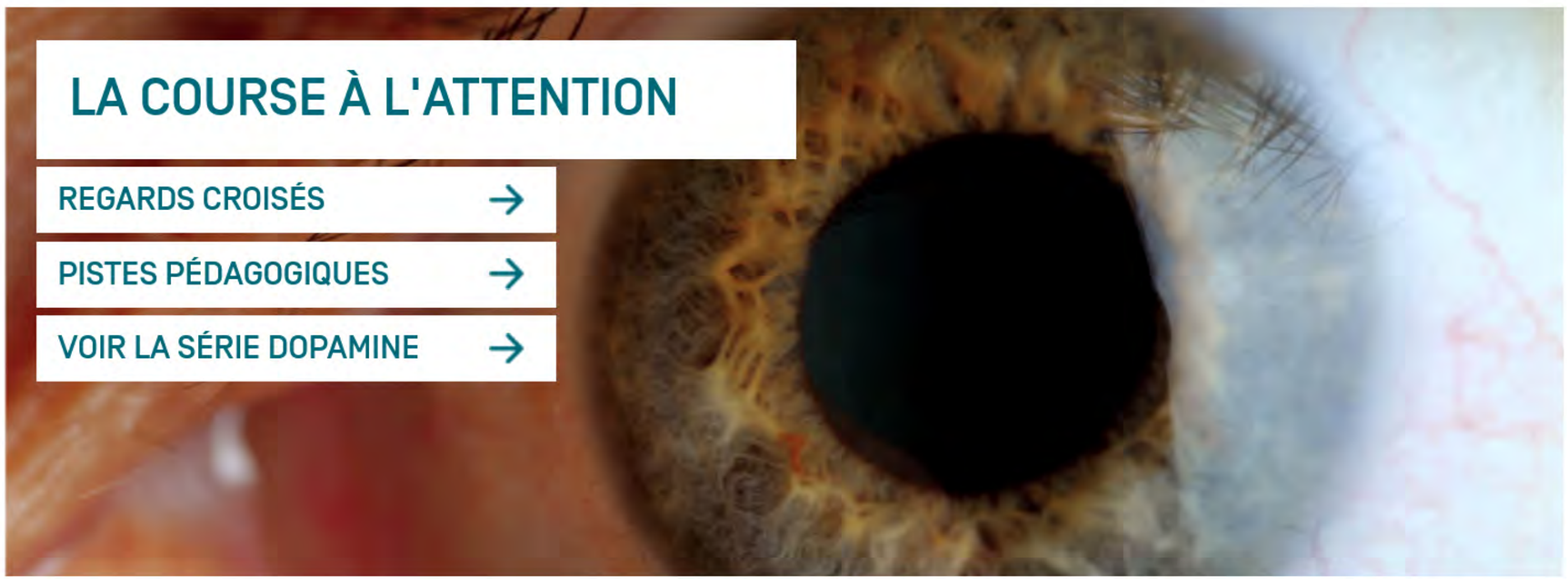
En rendant perceptible la matérialité cachée du *streaming*, en décryptant les contraintes économiques qui pèsent sur la création, en révélant les mécanismes de prescription algorithmique, l'enseignant d'éducation musicale contribue à former des citoyens capables de naviguer avec lucidité dans l'écosystème numérique contemporain. Il ne s'agit pas de rejeter le *streaming* ou de cultiver une nostalgie stérile du support physique, mais de développer les outils critiques nécessaires pour maintenir une autonomie de jugement et une ouverture culturelle dans un environnement qui tend naturellement vers la standardisation et le confinement dans des bulles de goûts homogènes.

L'enjeu est finalement celui de la diversité culturelle et de la liberté individuelle. Dans un monde où les algorithmes prétendent savoir ce que nous voulons entendre avant même que nous le sachions, l'éducation musicale a plus que jamais un rôle à jouer pour maintenir vivante la possibilité de la surprise, de la découverte, de la rencontre avec l'inattendu. C'est en comprenant les mécanismes qui orientent nos écoutes que nous pouvons espérer retrouver une véritable liberté d'écouter, de choisir, d'être surpris. Tel est le défi que les enseignants doivent relever pour accompagner les élèves dans leur relation à la musique au vingt-et-unième siècle.

Attraction, extraction, répulsion

Attraction et extraction : économie de l'attention et données personnelles

Du point de vue des sciences humaines et sociales, il s’agit de replacer l’économie de l’attention et du désir dans le contexte plus large du capitalisme numérique et de la culture médiatique contemporaine. Des auteurs comme **Yves Citton** ont proposé une écologie de l’attention pour réfléchir de manière critique à la sur-sollicitation des ressources mentales et imaginer des modes de résistance ou de régulation (Citton, *Pour une écologie de l’attention*, 2014). **Réseau Canopé** consacre à cet égard plusieurs ressources multimédias aux capacités attentionnelles des élèves et plus largement aux mécanismes addictifs inhérents à bon nombre d'applications numériques.



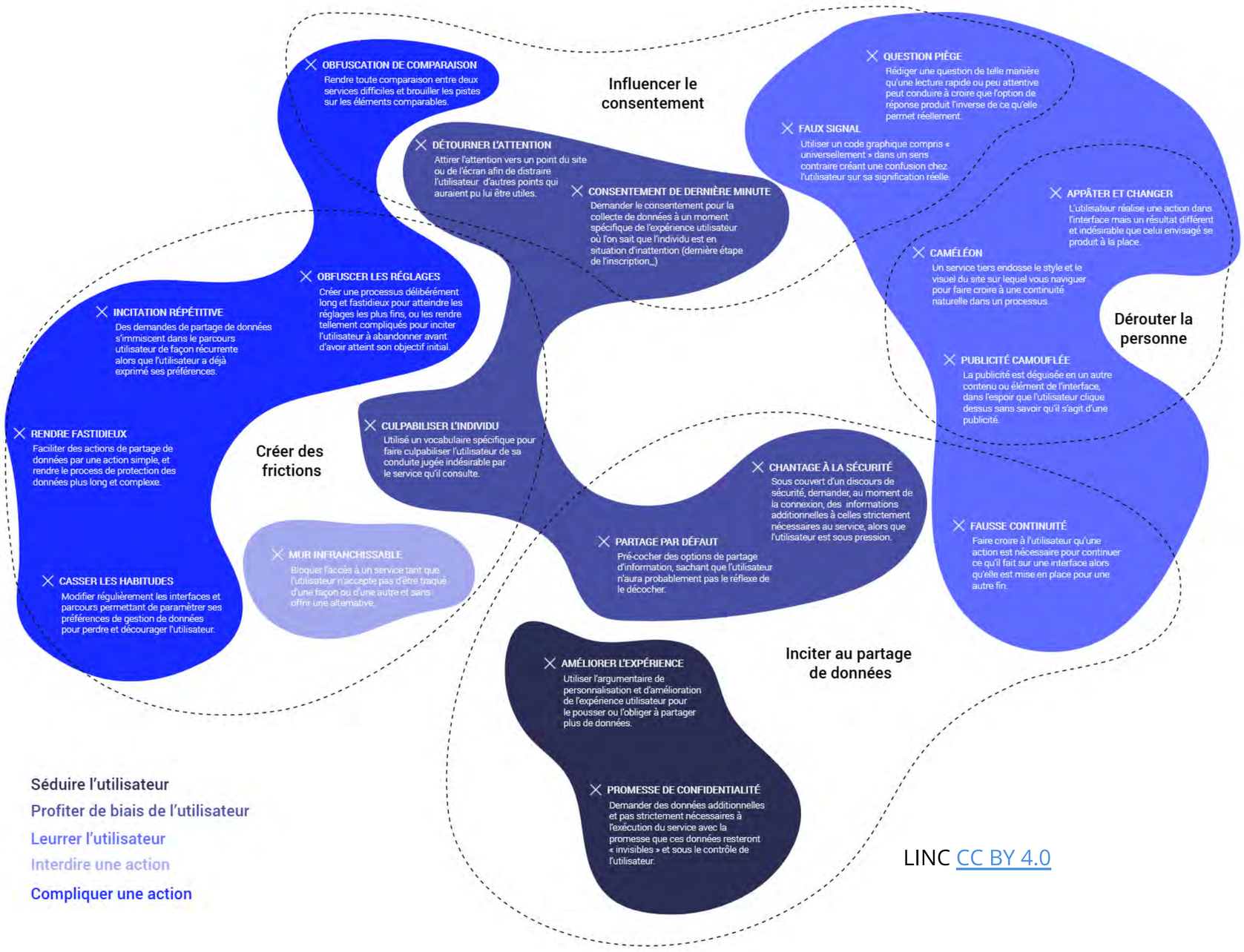
Dossier pédagogique. *La course à l'attention*. Réseau Canopé, 2019.

De leur côté, les sciences du design apportent une compréhension pratique des mécanismes d’interface, tout en ouvrant une réflexion éthique sur leurs effets. Elles s’intéressent en particulier au champ de la *captologie* – de l'acronyme *captology*, *Computer As Persuasive Technology*, défini par **Brian J. Fogg** en 1998 – comme l’étude de l’informatique persuasive, c’est-à-dire des technologies numériques conçues pour modifier les actions, attitudes ou comportements des utilisateurs. Cette approche distingue la *microsuasion*, à savoir les incitations intégrées localement à une interface (notification, bouton), de la *macrosuasion*, qui concerne l’incitation globale d’un système ou d’une application.

Des mouvements de designers s’organisent pour dénoncer notamment les interfaces trompeuses ou manipulatrices (*dark patterns*), au-delà des incitations douces (*nudges*), et ainsi promouvoir un design davantage axé sur l’humain et le bien-être attentionnel (*humane design*). L’initiative **Designers Éthiques** en France ou le **Center for Humane Technology** à l’international visent à renverser les principes du design persuasif, en proposant des interfaces respectueuses de l’autonomie cognitive de l’utilisateur. D’un point de vue théorique, cela implique de revisiter les modèles comportementalistes classiques (comme le modèle *Hooked* de **Nir Eyal**) à la lumière de critères de « soutenabilité attentionnelle » et d’éthique de la persuasion.

Dans le cadre des travaux académiques mutualisés 2021-2022 (TraAM) en éducation aux médias et à l'information (EMI) l'**académie de Besançon** s'est attaquée à cette thématique en collège au cours d'une séquence animée en cyle 4 par un professeur documentaliste. Le descriptif inclut un cadrage théorique préliminaire avant de détailler

le déroulé du parcours composé d'une mise en activité ludique des élèves par le biais d'un jeu de cartes et la réalisation d'affiches sous la forme de mini-chartes éthiques.



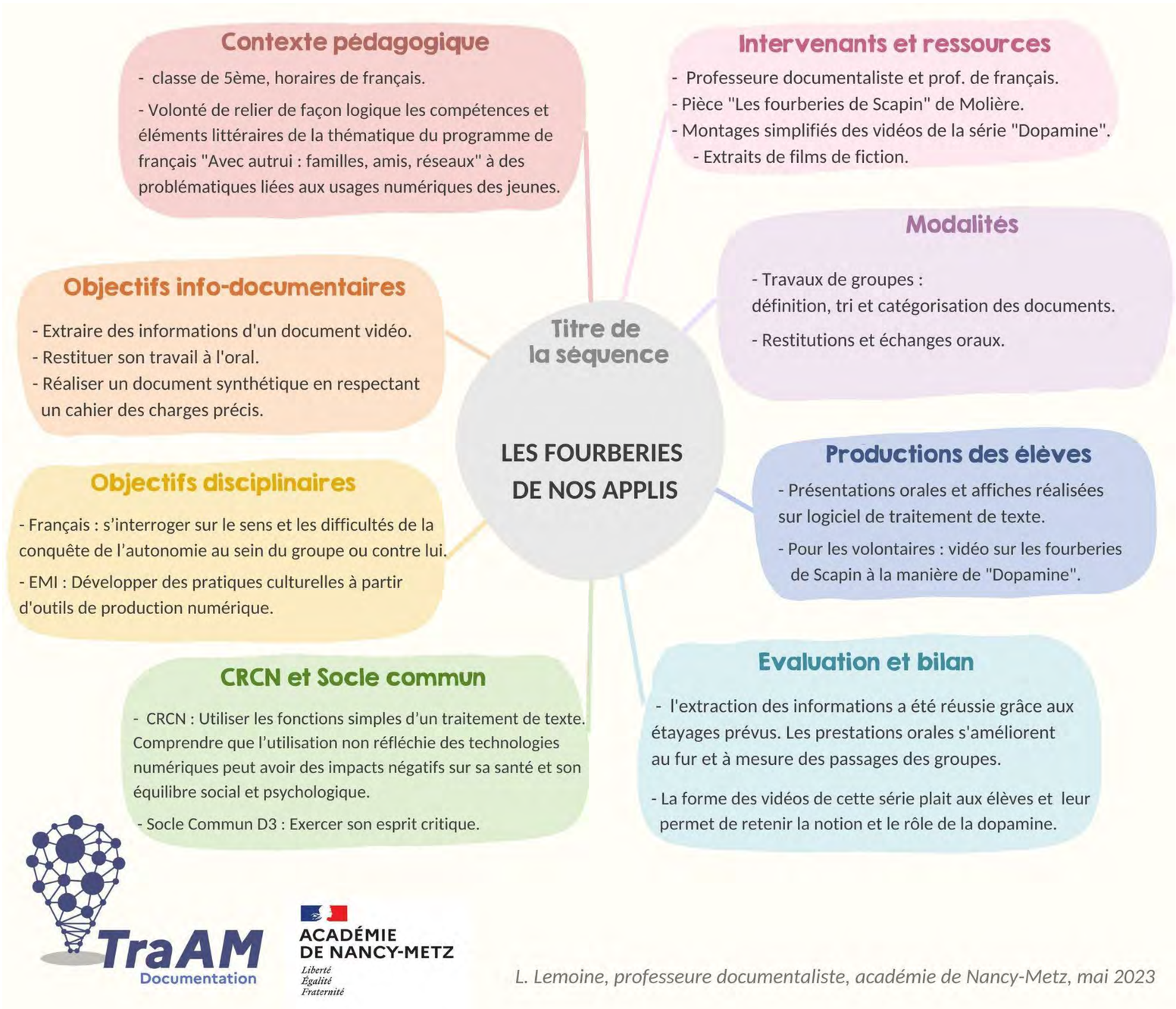
On pourra suggérer en prolongement de ce scénario cette ressource (CC-BY-SA 3.0) sur la place des fonctionnalités « IA » produite par **Nolwenn Maudet**, **Anaëlle Beignon** et **Thomas Thibault** pour **Limites Numériques**. En s'appuyant sur des captures d'écran le collectif souligne la forte mise en avant spatiale, graphique et interactive au sein de nombreuses interfaces d'assistants d'intelligence artificielle (présence redondante d'une icône, infobulle, sollicitation, bannière ou bandeau d'accueil). Ces outils souvent activés par défaut et parfois difficiles à ignorer sont en outre présentés comme des artefacts magiques. Le symbole graphique le plus courant pour représenter les fonctionnalités d'IA est l'icône étincelle à laquelle s'associent une rhétorique encomiastique sur la puissance des outils et la couleur mauve ou des dégradés bleu-mauve. Selon les auteurs, « la polyvalence promise des outils de l'IA, incarnée par des évocations magiques, aboutit également à l'invisibilisation de la matérialité des multiples opérations de l'IA, imposant l'idée que l'IA rend nécessairement les choses plus faciles, meilleures et plus rapides ».

Comment les entreprises de la tech nous forcent à utiliser l'IA

Les assistants d'IA sont introduits comme des factotums, voire des coéquipiers, dotés de compétences humaines, attendant des instructions pour pouvoir être orientés dans le cadre des travaux envisagés. L'activation de ces « copilotes » donne souvent accès à un large éventail de possibilités « génératives » censées augmenter la productivité, la créativité, voire l'intelligence des utilisateurs, profitant de l'emballement médiatique suscité par les systèmes d'apprentissage automatique et les modèles neuronaux.

73 Éducation aux médias et à l'information

Dans cette perspective d'éducation aux captations attentionnelles, il est intéressant de s'attarder sur un scénario de l'**académie de Nancy-Metz** qui conjugue l'étude des



techniques de manipulation du personnage de Scapin et les ressorts psychologiques utilisés par les applications pour maintenir les utilisateurs actifs, sujet de la *websérie* d'Arte Dopamine. Cette forme d'attraction centripète, propre à l'économie de l'attention, transforme ainsi chaque regard capté en un flux de données que les plateformes extraient et valorisent. Cela est illustré en particulier au sein d'un scénario pédagogique de l'**académie de Nice** dans le cadre d'un partenariat avec Terra Numerica. Toute cette

collecte s'opère sans heurt, avec légèreté, dans l'infonuagique : « Tout se passe, indique **Luca Paltrinieri**, comme si l'immatérialisation de la production dans la société de la connaissance, l'avènement d'une économie servicielle et la colonisation digitale de l'espace public permettaient de renouer, par une sorte de miracle technologique, avec

l’ancien mythe de l’agilité et de la légèreté, refoulant cette modernité anthropocénique qui s’inscrit précisément, et de manière irréversible, dans les strates géologiques de la Terre »[79].

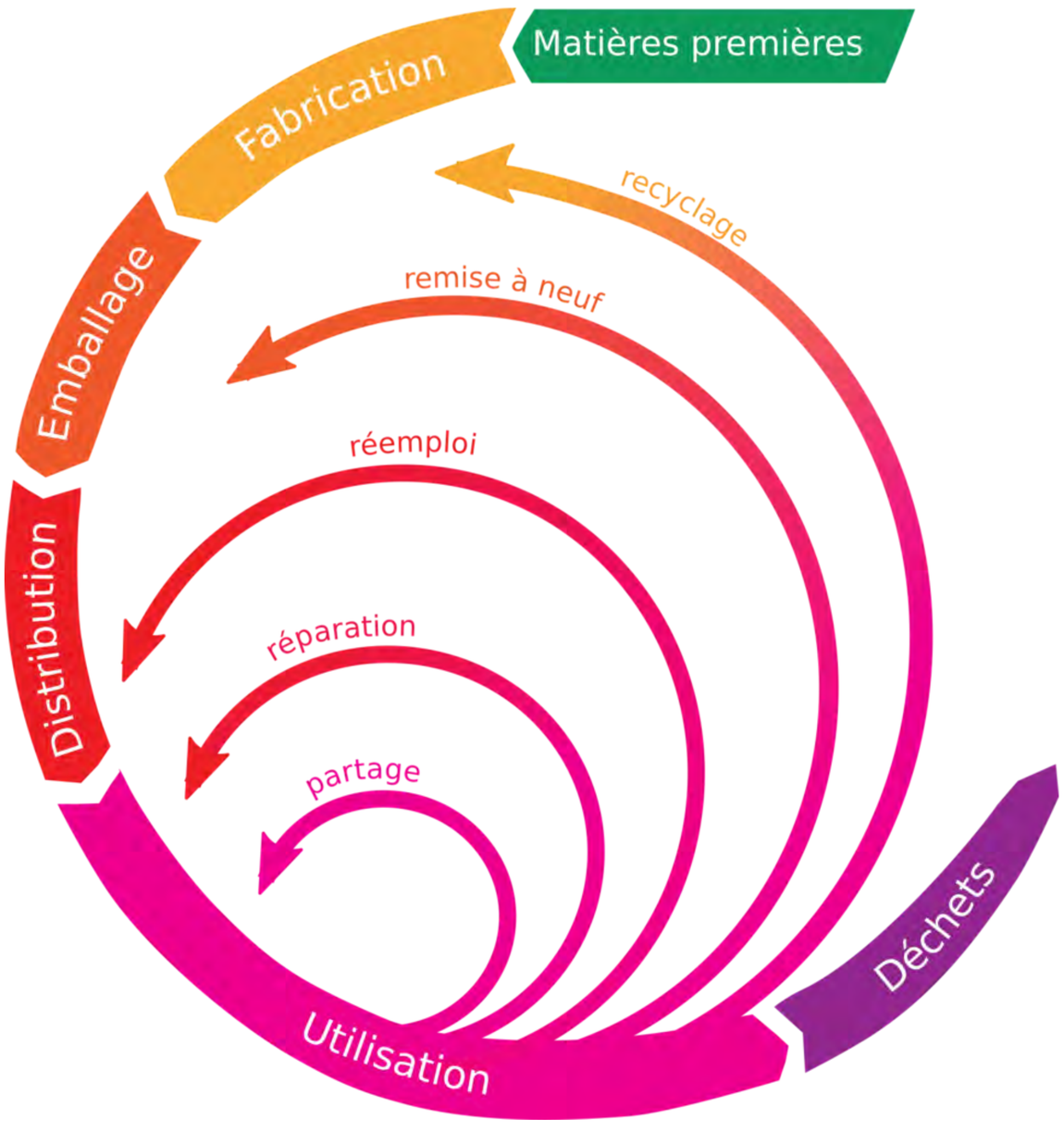
[79] Luca Paltrinieri. « Entre deux transitions, l’insoutenable légèreté du numérique », *Les Temps qui restent*, Numéro 3, Automne (octobre-décembre) 2024. https://lestempsquirestent.org/fr/numeros/numero-3/entre-deux-transitions-l-insoutenable-legerete-du-numerique

Répulsion : exploitations à fortes « externalités négatives »

C'est à cette échelle tellurique et à la géographie minière que s'intéresse une séquence de l'**académie de Paris** dont l'objectif est de sensibiliser les élèves aux conditions d’extraction des terres rares et des métaux critiques et stratégiques, évoquées dans le propos introductif, en lien avec la journée internationale des droits des enfants. Le déroulé s'ancre dans le cadre du dispositif Ulis autour du roman graphique *Moi, c'est Tantale* (2018). Cette nouvelle ère extractiviste impulsée de manière paradoxale par des impératifs de transition énergétique génère des dégradations environnementales, désastres sanitaires et tragédies humaines, dont la littérature dessinée s'empare assez régulièrement : *Générations IA* (2025), *Utop'IA* (2025), *Ressources, un défi pour l'humanité* (2024), *Le ciel dans la tête* (2023), *Prométhium* (2021), *Kivu* (2018), etc.

Marie Forget, maîtresse de conférences en géographie, souligne[80] que les regards se tournent vers les zones de sacrifice pouvant se définir comme des lieux ségrégués où la qualité de vie des communautés est compromise au nom du progrès et de l'accumulation du capital, des territoires qui se matérialisent par la concentration des industries polluantes au service de la production d'énergie et de matières premières chimiques « déchetogènes ». Cela invite les équipes pédagogiques à aborder en classe l'écocitoyenneté et l’économie circulaire comme le propose l'**académie de Lille** dans un projet de création d’affiches pour collecter des téléphones portables usagés au sein d'un collège.

[80] Collectif GéoXXI (Éd.). (2025). *Géographies, un dictionnaire*. CNRS éditions. p.219-221



G. Mannaerts, CC BY-SA 4.0, Wikimedia

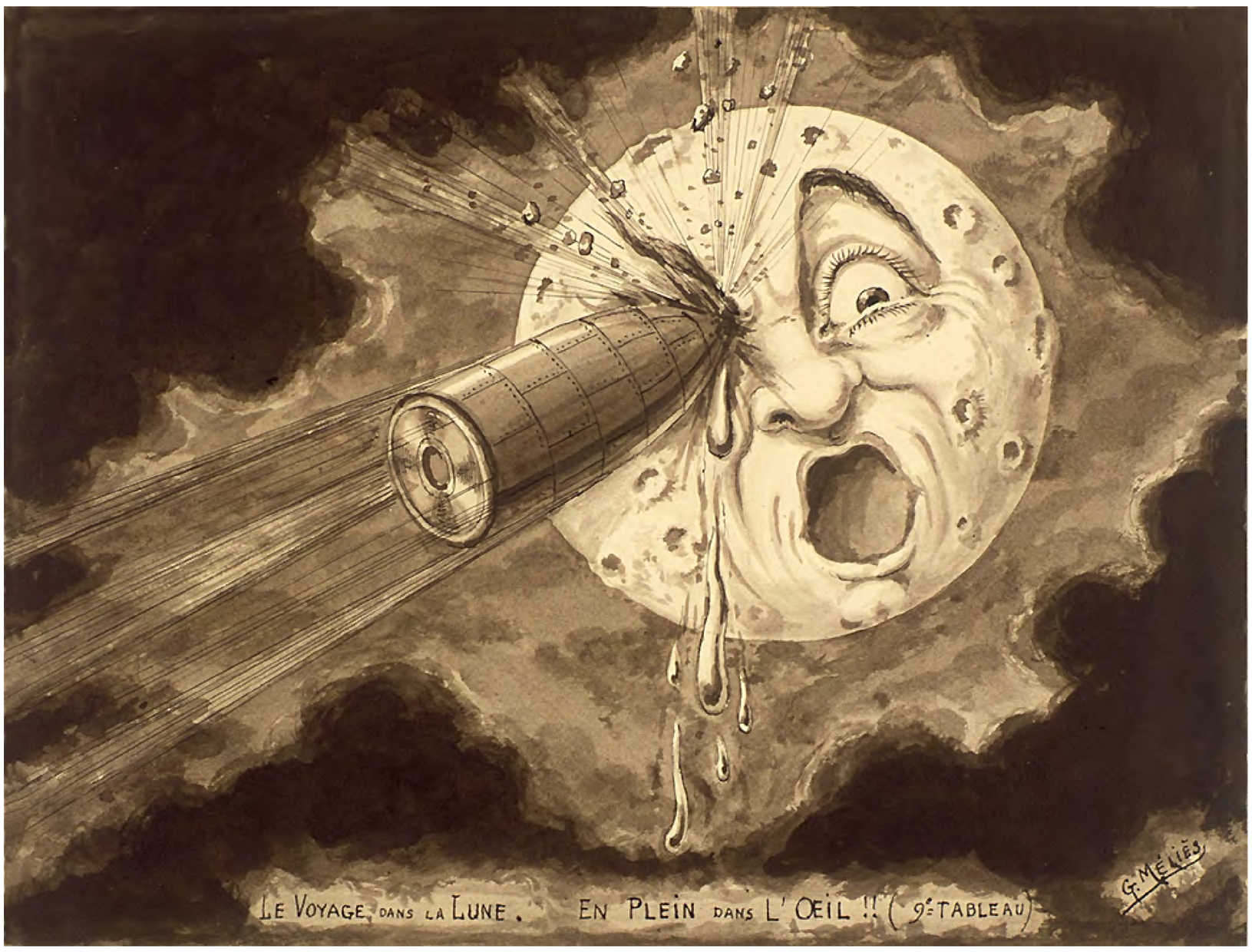
La logique de l’accaparement et de l’épuisement des terres invite à un détour en EMI par le cinéma qui *préfigure* cette économie de la prédation, révèlant de fait une double dynamique originelle : celle d'un médium qui déclenche une émotion sensorielle brute, mais aussi celle d'une industrie lourde, née de l'exploitation des sous-sols, et dont les films ont aussi servi de vitrine idéologique à la conquête des ressources naturelles.

Cinémas d'attraction(s) et d'extractions

Le cinéma d’attraction(s)[81] et le cinéma d’extractions sont deux notions trans-historiques à considérer dans le cadre de la « machine à voir »[82] et à montrer. Elles s'inscrivent dans une dynamique interactive avec le développement dit narratif. Le premier concept, formulé par **Tom Gunning** et **André Gaudreault** dans les années 1980, désigne le « cinéma primitif »[83] davantage axé sur les « jolis effets », le spectacle visuel et l’interpellation directe du spectateur plutôt que sur le récit. Le second, proposé par **Brian R. Jacobson** au début des années 2020, s'intéresse à la nature extractive du cinéma, tant par les ressources naturelles mobilisées pour la fabrication et la projection des œuvres (charbon, pétrole…) que par la représentation de l’exploitation de ces matières premières dans l'histoire filmique.

Un régime de visibilité pré-narratif ?

La notion de *cinéma d’attraction(s)* a été introduite pour considérer autrement le cinéma des premiers temps (1895–1907) emprunté à la théorie théâtrale d’Eisenstein, qui parlait en 1923 de *« montage of attractions »*[84] pour décrire des effets de surprise et de choc destinés à captiver le public. Gunning adapte cette idée au cinéma dit primitif : ces films relèvent d’un *cinéma de la monstration*, qui privilégie l’exposition de vues spectaculaires ou insolites plutôt que la continuité narrative. Le cinéma d’attractions se définit par une relation directe et explicite avec le spectateur. Gunning le décrit comme *« un cinéma qui étale sa visibilité et [qui] accepte de sacrifier l’apparente autonomie de l’univers de la fiction si cela lui permet de solliciter l’attention du spectateur »*. En pratique, les films des premiers temps précèdent la continuité classique : les acteurs regardent souvent la caméra, interpellent le public par des gestes ou des clins d’œil, au lieu de feindre son absence. Cette attitude *exhibitionniste*, par opposition à la position *voyeuse* du spectateur dans le cinéma narratif, était alors un moyen d’émerveiller un public encore novice face au Domitor et de rompre le quatrième mur, le cinéma étant dans les premières années de son exploitation une attraction en soi[85].



Georges Méliès. *Le voyage dans la lune, drawing*. Domaine public. Wikimedia

[81] **Gunning, T.** (2006). « Le Cinéma d’attraction : le film des premiers temps, son spectateur, et l’avant-garde ». *1895. Mille huit cent quatre-vingt-quinze* [En ligne], 50.

[82] **Paci, V**. (2012). *La machine à voir*. Presses universitaires du Septentrion.

[83] Ce terme est réfuté par Gunning. **Noël Burch** en revanche conserve ce mot. Il développe dans *La Lucarne de l’infini. Naissance du langage cinématographique* deux concepts clés, le *Mode de Représentation Primitif* (MRP) et le *Mode de Représentation Institutionnel* (MRI). Le cinéma d'attraction s'inscrit ainsi dans le MRP caractérisé par la frontalité, la composition centripète, l'autarcie des tableaux. *Le Primitivisme des avant-gardes littéraires*. (2023). Classiques Garnier. p.93-119

Il faut rappeler en outre que le cirque contribue au développement de la commercialisation du cinéma dès sa naissance. Dossier thématique de la revue scientifique de l’Université Paul-Valéry Montpellier 3. *Circus science*. PULM, 2022

[84] Cette notion est illustrée dans *Le Journal de Gloumov*, court métrage de Sergueï Eisenstein.

[85] En s'appuyant sur le concept chlovskien de défamiliarisation (ostranénie) et la dimension autotélique du langage poétique chère à Roman Jakobson, Gunning souligne le parallèle établi par Viva Paci avec l'attraction : « la forme originelle de l'attraction équivaut à la forme originelle du cinéma ; avant d'être une machine à raconter des histoires, c'est une machine qui nous fait voir et une machine qui montre » (Viva Paci. p.28)

Esthétiquement, les films d'attractions se reconnaissent ainsi à leur brièveté et à leur structure fragmentée en une série de numéros ou tableaux juxtaposés plus qu'une intrigue causale continue. Par exemple, le court métrage sans intertitres de **Georges Méliès** *Le Voyage dans la Lune* (1902) se compose d'une succession de scènes fantastiques et d'effets spéciaux, assimilables à des attractions successives, davantage qu'à un récit cohérent et fluide au sens moderne.

De même, les vues des frères **Auguste** et **Louis Lumière** – qu'il s'agisse de scènes de la vie quotidienne (*Le jardinier et le petit espiègle* ou *L'Arroseur arrosé*, 1895)[86] ou de paysages exotiques captés par leurs opérateurs autour du monde comme le travelling d'**Alexandre Promio** filmant le Grand Canal vénitien depuis un *traghetto* en marche – étaient présentées pour la curiosité visuelle qu'elles suscitaient, à travers le cinématographe. La narration y est minimaliste ou absente : pour *L'Arrivée d'un train en gare de La Ciotat* (1896), Louis Lumière s'attache par exemple à filmer, en utilisant la diagonale du champ, un train s'approchant du quai de la voie ferrée, ce qui aurait provoqué le sursaut du public ou plutôt dans la réalité une certaine angoisse, voire de l'enthousiasme[87]. Le montage, lorsqu'il existe, sert surtout à enchaîner des attractions ou à créer des artifices visuels (arrêts de caméra, surimpressions, fondus enchaînés, zooms, etc. chez Méliès)[88], et moins a priori à construire un récit en tant que tel.

Parcours pédagogique

Atelier 7 : les trucages (Upopi)

- Enjeux pédagogiques : découvrir les premiers films à trucages
- Matériel
- Déroulement
  - Introduction : qu'est-ce qu'un trucage ?
  - Georges Méliès, inventeur des premiers trucages
  - Premier trucage : l'arrêt de caméra (apparition, disparition, transformation)
  - Pour aller plus loin

Scénario pédagogique : Joue-le comme *Méliès !* (**académie de Toulouse**)

Méliès n'hésite pas à saluer le public ou à faire signe au sein de ses films, soulignant ainsi sa dimension « spectaculaire ». D'autres exemples incluent les vues foraines filmées comme *Électrocuter un éléphant* (*Electrocuting an Elephant*, 1903) de **Thomas Alva Edison** montrant la scène choc de l'exécution[89] de l'éléphante **Topsy** par électrocution. De même, les films de fantaisie érotique comme *Le Coucher de la mariée* (Pathé, 1902) d'**Eugène Pirou** où une femme se déshabille face caméra, relevaient d'un exhibitionnisme littéral destiné à piquer la curiosité grivoise du public[90]. Enfin, ce style « attractif » se retrouve dans certains éléments d'autres films contemporains : considéré comme le premier western, *Le vol du grand rapide* (*The Great Train Robbery,*1903) d'**Edwin Stanton Porter** est notamment connu pour sa dernière image où le desperado joué

[86] Voir le court-métrage *1895* réalisé par **Hadrien Gautrot** et **Ilia Gerber** en hommage aux 130 ans de la naissance du cinéma.

[87] Mythe fondateur du cinéma selon **Martin Loiperdinger** ou « effet-train » (**Yuri Tsivian**)

[88] Voir parcours pédagogique **Upopi** *Initiation au cadre, séance 8 : le cadre chez Lumière et Méliès*

[89] Combs, C. S. (2014). *Deathwatch : American film, technology, and the end of life***.** Columbia university press.

[90] Gunning, T. (2025). « Le Cinéma d'attraction : le film des premiers temps, son spectateur, et l'avant-garde ». *1895. Mille huit cent quatre-vingt-quinze* [En ligne], 50 | 2006, mis en ligne le 01 décembre 2009. http://journals.openedition.org/1895/1242

par **Justus D. Barnes**, tire avec son revolver face caméra – plan sans véritable lien direct avec l'histoire, inséré uniquement pour surprendre le spectateur[91] (beaucoup auraient sursauté en voyant le revolver). Ce plan iconique est en quelque sorte un reliquat du cinéma d'attractions au sein d'un narratif naissant.

Edwin S. Porter. *Great train robbery still*. Edison Manufacturing Company. Domaine public. Wikimedia

Corporéité et spectacle chez Tod Browning

Tom Gunning soutient que le *cinéma d'attractions* ne disparaît pas après 1907, mais qu'il se reconfigure au sein du récit classique, notamment dans certaines séquences ou genres qui continuent de mobiliser une logique de monstration plutôt que de pure narration linéaire[92].

Dans le célèbre *Freaks* (1932), le récit dramatique est régulièrement suspendu pour présenter frontalement des corps « non conformes » : la galerie desdits « monstres » (personnes atteintes de malformations) est montrée comme attraction au sens littéral du terme – non seulement dans la fiction (les personnages sont membres d'un cirque) – mais aussi pour le spectateur, que la caméra met en position de regardeur presque *forain*[93]. Les scènes comme le banquet de mariage, à l'occasion duquel les « freaks » chantent « One of us ! One of us ! », participent de la progression dramatique mais fonctionnent aussi surtout comme séquences d'exposition, de confrontation directe avec l'altérité, donc dans une logique exhibitionniste au sens gunninguien. La célèbre scène de **Prince Randian**, sans bras ni jambes, allumant une cigarette à l'aide de sa bouche est emblématique de ce régime de visibilité : elle brise la linéarité narrative au profit d'un moment de fascination immédiate, établissant un rapport direct avec le regard spectatoriel et fonctionnant comme défi au corps normatif, invitation à l'émerveillement ou au malaise. Ce « spectacle du corps »,

[91] Selon **Philippe Dubois** « Le "cinéma des attractions", c'est celui qui joue la monstration plutôt que la narration, la présentation plutôt que la représentation, la temporalité ponctuelle (*hic et nunc*) plutôt que l'organisation dans la durée, l'interpellation directe du spectateur plutôt que sa suspension et son conditionnement au suivi d'une diégèse, l'exhibition accrocheuse de ses propres moyens de figuration plutôt que l'effacement en vue d'une transparence de l'action racontée, l'excédent rhétorique plutôt que la norme classique, la recherche de l'événementialité visuelle "pure" par les formes les plus franches, etc. ».

Philippe Dubois, « La ligne générale (des machines à l'image) », in Frank Beau, Philippe Dubois et Gérard Leblanc (dir.), *Cinéma et dernières technologies*, Paris; Bruxelles: De Boeck, 1998, p. 84. Cité par Boillat, A. (2007). *Du bonimenteur à la voix-over : Voix-attraction et voix-narration au cinéma*. Antipodes. p. 213

[92] Gunning, T. (2012). Rendre la vue étrange : l'attraction continue du cinéma des attractions (B. Eisenschitz, trad.). In *La machine à voir* (1-). Presses universitaires du Septentrion. https://doi.org/10.4000/books.septentrion.9457

[93] La plupart des numéros des phénomènes sont ceux qu'ils effectuaient dans les *side-shows*, ce qui précise encore le côté « attraction » de ces apparitions, actions ou scènes.

pour reprendre les termes de **Boris Henry**[94], soulève une profonde tension éthique : entre voyeurisme circassien et révélation d'une agentivité corporelle qu'une narration classique aurait exclue. Toutefois, cette lecture se heurte à l'épilogue du film, où cette même agentivité bascule dans une action collective vengeresse. La suspension du jugement moral est alors mise à l'épreuve par la régression sauvage des phénomènes de foire, dont la fureur finale vient brouiller la frontière entre la dignité du corps différent et l'animalité honnie :

> « Dans *Freaks*, l'identification ténue que nous avons développée pour les habitants du cirque, perçus comme des personnages "décents" est cyniquement mise en pièces lorsqu'ils sombrent, eux aussi, dans la bestialité : des formes à moitié humaines se vautrant dans la fange primitive, animées uniquement par la rancœur et la soif de sang. Pour Tod Browning, l'image ultime d'un être humain – aboutissement final de ses précédentes amputations et réductions – est Prince Randian dans *Freaks*, sac d'entrailles sans bras, se tortillant dans la boue de l'existence, un couteau entre les dents. » (traduit de l'anglais)[95]
>
> *- Skal, D. J., & Savada, E.*

Boris Henry distille toutefois une analyse différente et particulièrement éclairante à ce niveau : à la fin du film, précise-t-il, les monstres incarnent en réalité ces créatures « sales et rampantes » qu'ont voulu justement voir en eux Cleopatra et Hercules. Dans le livret pédagogique réalisé dans le cadre du dispositif *Lycéens et apprentis au cinéma, édition 2009-2010*, il indique : « Pour saisir la compatibilité des corps, Browning privilégie les plans plutôt serrés (du plan moyen au gros plan) filmés frontalement. Il utilise parfois de brefs mouvements de caméra afin de suivre un personnage et de le rapprocher d'un autre. Cette mise en scène est accentuée à la fin du film lorsque les phénomènes se tiennent sous une roulotte, puis poursuivent Hercules à terre (séq. 12) : la caméra est alors placée à hauteur de nain. La mise en scène, plus que jamais au service des phénomènes, montre comment ils retournent finalement la situation : Cleopatra et Hercules ont rejeté toute compatibilité avec leurs corps, ils ont voulu voir en eux des bêtes, ceux-ci se mettent alors à ramper jusqu'à entraîner le couple dans l'animalité et la monstruosité (Hercules se traîne à terre, Cleopatra devient une femme-canard). Oui, le film bascule alors dans l'épouvante. » (*Freaks* (1932) de Tod Browning, livret pédagogique, Paris, CNC/Cahiers du cinéma, 2009, 24 p., p. 11). Il faut également avoir en tête, ajoute l'auteur, que lors du repas de noces Cleopatra et Hercules ont rejeté le « one of us » énoncé par les phénomènes-monstres. Cleopatra sera donc l'une des leurs, non par le mariage, instrumentalisé – ce qui conduit ce dernier à apparaître comme une absurdité appelée à être rompue –, mais par la *force de la nature*, qu'il s'agisse de celle de la tempête ou de celle de la *nature humaine*, tout en rappelant également que, si les phénomènes poursuivent Cleopatra et Hercules et que s'il est montré qu'un nain blesse Hercules, rien n'indique véritablement que ce sont les phénomènes qui redéfinissent le corps de

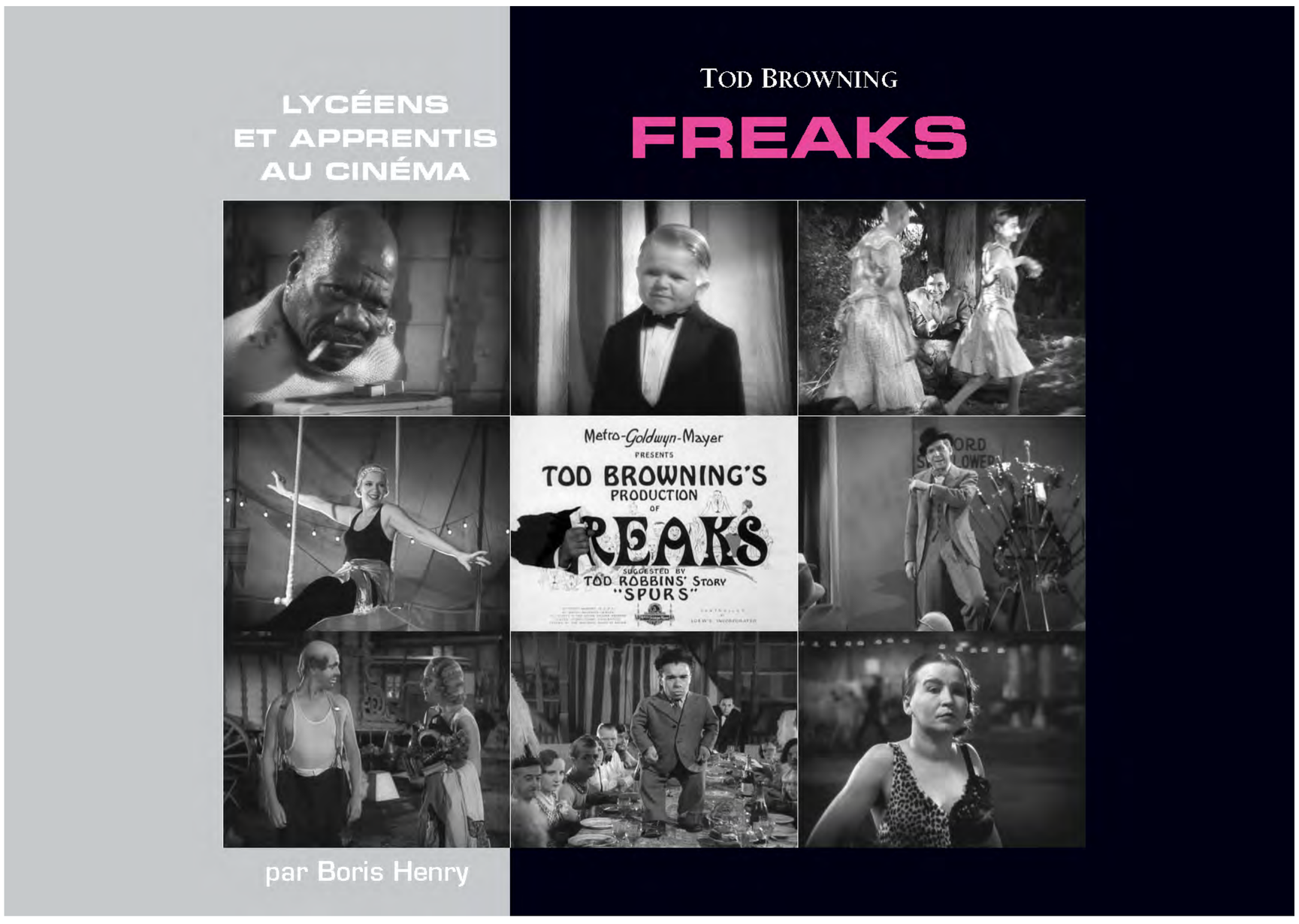
[94] Henry, B. Université de Provence. Faculté des lettres et sciences humaines. (2002). *Tod Browning, le spectacle du corps.* Boris Henry est docteur en Lettres et Arts depuis 2003. Il a centré ses recherches sur la question du corps dans l'œuvre de Tod Browning et est l'auteur d'un livre consacré à Freaks (*Freaks : de la nouvelle au film, Rouge profond*, 2009).

[95] **Skal, D. J., & Savada, E.** (2025). *Dark carnival : The secret world of Tod Browning, Hollywood's master of the macabre* (Revised and expand. ed). University of Minnesota Press. p.266

Cleopatra. Aux yeux de Boris Henry[96], la fin n'est ni une rupture, ni un élément cynique, mais la suite logique des situations, actions et regards appliqués précédemment. Dans l'*ouverture pédagogique* intitulée « homo-animal » placée sur la même page du livret, **Thierry Méranger**, agrégé de lettres modernes, écrit : « Tod Browning n'en reste pourtant pas là, puisque l'animal possède à chaque fois une valeur emblématique. Le recours constant à la métaphore suggère la porosité des frontières. Abondent au fil des répliques les allusions témoignant de la cruauté du regard posé sur ces "horribles choses rampantes et gémissantes" ; Hans sera vu comme "ce petit singe" qu'il faut "écraser comme un insecte". À l'inverse les non-monstres sont décrits comme "ce grand cheval" ou "ce morceau de bœuf". Se trouve ainsi annoncé l'exemplaire retournement final. Cleopatra, désignée initialement comme "la paonne des airs", devient littéralement oiseau-tronc : la métaphore se réalise sous nos yeux ; la supposée normalité bascule définitivement dans l'animalité et l'hybridation monstrueuse. » (Livret pédagogique, Paris, CNC/Cahiers du cinéma, 2009, 24 p., p. 11).

[96] Henry, B. Université de Provence. Faculté des lettres et sciences humaines. (2002). *Tod Browning, le spectacle du corps.* Thèse de doctorat.

Échanges avec l'auteur (janvier-février 2026)



Livret pédagogique, Paris, CNC/Cahiers du cinéma, 2009. Dossier maître du film « Freaks » de Tod Browning

Tod Browning transpose dans son œuvre cinématographique une fascination durable pour le monde du spectacle[97] : cirques, foires, cabarets, théâtres d'illusion. Cette filiation se manifeste notamment dans un certain nombre de ses œuvres : *Le Club des trois* (*The Unholy Three*, 1925), *L'Oiseau noir* (*The Blackbird,* 1926), *L'inconnu* (*The Unknown*, 1927), *La Morsure* (*The Show*, 1927), *À l'ouest de Zanzibar* (*West of Zanzibar*, 1928), *La Treizième Chaise* (*The Thirteenth Chair,* 1929), *Miracles à vendre* (*Miracles for sale*, 1939) qui mettent en scène imposteurs, acrobates, illusionnistes, ou performeurs dont les numéros scéniques ponctuent le récit pour fonctionner comme de véritables attractions filmiques.

Au cœur de ce dispositif se trouve **Lon Chaney**, acteur fétiche de Browning, dont la capacité de transformation corporelle – souvent obtenue au prix de performances physiques extrêmes – donne une matérialité troublante aux

[97] Au début de l'été 1908, Tod se rend à Chicago, la mégapole du spectacle. Wood, B. (2018). *Tod Browning, une vie avec les freaks*. la Librairie du jouet. p.11

figures marginales campées par l'acteur[97]. Par ses multiples métamorphoses, « l'homme aux mille visages » incarne un cinéma du corps exhibé, de l'illusion et de la dissimulation, un acteur-attraction, pourrait-on dire, prolongeant ainsi dans le cadre du cinéma narratif la logique du cinéma d'attractions.

Lon Chaney, *London After Midnight*, La cape en forme d'ailes de chauve-souris du vampire. Domaine public. Wikimedia

[97] Pour un panorama filmique complet consulter **Blake, Michael F.** (1998). *The films of Lon Chaney*. Vestal Press. Et aussi l'ouvrage séminal richement illustré de **Robert G. Anderson**. *Faces, forms, films. The artistry of Lon Chaney*. A.S. Barnes & Co, 1971.

Ray Harryhausen : le cinéma du merveilleux

Bien que chronologiquement éloignée de l'ère du cinéma des premiers temps, la production filmographique de **Ray Harryhausen**[98] – notamment entre les années 1950 et 1980 – réactive certains des principes fondamentaux de la forme pré-narrative. Sa maîtrise du processus de « Dynamation » facilite l'intégration spectaculaire de créatures animées en *stop motion* dans des prises de vues, privilégiant la prouesse technique et l'impact visuel sur la continuité diégétique ou le développement psychologique des personnages. Ces instants de sursaut « tératologiques » apparaissent de manière récurrente et se manifestent tout particulièrement dans des scènes myth(olog)iques qui fonctionnent comme des

[98] Hankin, M. (2008). *Ray Harryhausen : Master of majicks*. Archive Editions LLC.

morceaux de bravoure « indépendants » au sein du récit. C'est le cas, entre autres, de la résurrection du Rhedosaurus dans *Le Monstre des temps perdus* (*The Beast from 20,000 Fathoms,*1953), de la confrontation avec le géant Talos, de la bataille des squelettes dans *Jason et les Argonautes* (*Jason and the Argonauts,* 1963), du combat avec le cyclope dans *Le Septième Voyage de Sinbad* (*The 7th Voyage of Sinbad,*1958) ou de l'apparition pétrifiante de Méduse dans *Le Choc des Titans* (*Clash of the Titans,*1981). Ces moments[99] ne visent pas uniquement à faire progresser l'action mais à provoquer aussi l'émerveillement ou la sidération du spectateur face au prodige. À ce titre, ils relèvent d'une logique attractionnelle : une adresse directe au spectateur, conçue pour susciter une réaction affective instantanée.

L'influence de Georges Méliès est revendiquée par Ray Harryhausen lui-même. Comme Méliès, Harryhausen inscrit son art dans une tradition spectaculaire de la magie visuelle, où l'effet spécial devient l'élément central de la scène, voire du film entier. Sur l'espace Enseignant de **Nanouk**, plateforme pédagogique qui accompagne les dispositifs nationaux Maternelle au cinéma et École et cinéma, est publié un dossier complet sur le film *Jason et les Argonautes* de Don Chaffey rassemblant synopsis, analyse de séquences, déroulant, image ricochet, bibliographie. Au sein de ce cahier de notes écrit initialement en 2006 par **Antoine Thirion**, artiste et critique de cinéma, l'auteur rappelle la longue collaboration du « Master of the Majicks » avec le célèbre producteur américain

DOCUMENTS ENSEIGNANTS SUR LE FILM

Télécharger le dossier pédagogique sur Nanouk (site pédagogique du dispositif École et Cinéma) mais aussi l'analyse d'une séquence, des promenades pédagogiques et une bibliographie...

Fiche film sur Nanouk

PISTES PÉDAGOGIQUES

Dossier pédagogique réalisé par **Aurélie Lange** CPD éducation artistique et culturelle DSDEN 76 :analyse de l'affiche, de la bande annonce, proposition d'activités, liens utiles, références mythologiques, situations d'apprentissage, la figure du monstre, les trucages, mythologie et philosophie, le corps, autour de la thématique Géant / minuscule...

Dossiers pédagogiques - Normandie images (programmation 2020-21)

Charles H. Schneer : « Afin de trouver leur indépendance et de se rapprocher des sources culturelles du Vieux Continent dans lesquelles ils entendaient désormais puiser, Harryhausen et Schneer décident alors de quitter Hollywood pour la Grande-Bretagne. Leur première production anglaise est *Le Septième voyage de Sindbad* (1958), dont ils confient la réalisation à Nathan Juran. Cependant, Harryhausen, en ses qualités de coproducteur et de créateur d'effets spéciaux, est fortement présent sur le tournage afin que les plans

[99] Sur ce point **Ernest Farino** indique : certaines séquences peuvent sembler superflues et beaucoup sont des séquences contenues (donnant ainsi l'impression que l'histoire s'arrête brusquement pour les besoins de l'animation), mais dans la plupart des cas, il en résulte un élément narratif qui fait avancer l'intrigue. Par exemple, la séquence de l'orphelinat permet à Joe Young de sauver la petite fille, prouvant ainsi sa nature de « héros » et éliminant la menace d'être tué par la police et le mandat d'arrêt. On découvre que « l'oiseau » dans *L'Île mystérieuse* a en fait été abattu par une balle, ce qui conduit à l'apparition du capitaine Nemo et au dévoilement final de son plan pour quitter l'île.

Échanges avec Ernest Farino (janvier 2026)

tournés correspondent à ceux dont il compte se servir en post-production ».
La primauté du visuel sur le narratif positionne Ray Harryhausen non seulement comme un technicien pionnier des effets spéciaux, mais aussi comme un réel « auteur »[100]. Bien que « ses films » soient le plus souvent réalisés par d'autres metteurs en scène, c'est bien sa vision esthétique – son bestiaire, sa gestion de l'animation, sa dramaturgie de la surprise – qui en constitue peut-être la vraie signature et que l'on retient au-delà de la réalisation proprement dite.

[100] Cette qualification est discutée : Ray Harryhausen a certainement joué un rôle important dans tous ces films, par l'intégration de son travail à la production, mais le terme « auteur » élève la participation de quiconque à un niveau bien supérieur de paternité globale d'un projet donné.
Échanges avec Ernest Farino (janvier 2026)

Du sol au flux numérique

Longtemps envisagé comme un médium essentiellement sensoriel et narratif, le cinéma tend aujourd'hui à être réévalué à l'aune de ses modalités matérielles. Dans cette perspective, **Brian R. Jacobson**[101] recourt à l'expression « cinéma d'extractions ». Cette approche conçoit l'image filmique non plus uniquement comme un artefact culturel, mais comme le produit d'un régime extractif qui mobilise des ressources géologiques, énergétiques et industrielles. Autrement dit, l'image, avant d'être vue, est extraite. Le passage du sol au flux implique donc une infrastructure globale, que le cinéma documente parfois, et dont il est toujours tributaire. **Christa Blümlinger**, professeur d'université en études de cinéma, rappelle que les frères Lumière ont tiré leur principale source de revenus non pas du cinématographe en tant que tel, mais de la fabrication de supports photochimiques (plaques au gélatino-bromure d'argent « Étiquette Bleue »). En 1897, le Cinématographe-type est « accompagné d'un modèle simplifié et moins onéreux destiné uniquement à la projection. Parallèlement, Louis Lumière travaillait avec **Victor Planchon** pour la mise au point et la fabrication des pellicules couchées avec une émulsion dérivées des plaques photographiques " Étiquette bleue ", afin de ne pas être dépendant de fournisseurs étrangers comme Blair ou Eastman » (Institut Lumière).

[101] Brian R. Jacobson. *The Cinema of Extractions: Film Materials and Their Forms* (Columbia University Press, 2025)

Lionel Allorge, CC BY-SA 3.0 . *Bobine film 8 mm Kodak* Wikimedia

Ainsi, Jacobson souligne, d'une part, que la fabrication et la projection de films s'appuie sur l'extraction de matières premières. Comme évoqué, la pellicule argentique classique dépend du celluloïd (dérivé de produits chimiques industriels) et de l'argent (halogénure d'argent utilisé dans l'émulsion photosensible), métal devant être extrait du sol. De même, l'éclairage des studios dans l'Âge d'or hollywoodien requiert du carbone (pour les lampes à arc) ou du tungstène (filament des projecteurs), la production filmique consommant en outre énormément de courant électrique et de carburants fossiles. D'autre part, le *cinéma d'extractions* renvoie aux représentations audiovisuelles de l'exploitation des ressources, c'est-à-dire aux films qui montrent les industries extractives ou qui sont produits par celles-ci. En

effet, dès le début du XX^e siècle, les compagnies minières et pétrolières ont utilisé le cinéma argentique comme un outil de communication, de propagande ou de pédagogie vis-à-vis du public. Par exemple, la société Shell Oil a produit au milieu du XX^e siècle de nombreux courts métrages éducatifs ou publicitaires : *Birth of an Oil Field* (Shell, 1949, avec des animations de **George Pal**) montrait de manière didactique la création d'un champ pétrolifère et les techniques de forage ; *The Fossil Story* (Shell, 1953) expliquait la formation du pétrole et son usage, pour ancrer l'idée que l'exploitation pétrolière était naturelle et bénéfique. Dans un registre plus fictionnel, Hollywood a livré des récits dramatiques autour de l'extraction, par exemple, *Le Trésor de la Sierra Madre* (*The Treasure of the Sierra Madre*, **John Huston**, 1948), *La Fièvre du pétrole* (*Boom Town*, **Jack Conway**, 1940) avec **Clark Gable** et **Spencer Tracy**, narrant l'ascension de deux amis dans le pétrole au Texas : on y perçoit l'enthousiasme pour les *gushers* (jaillissements de pétrole) et les revers de fortune, sur fond d'apologie de l'esprit pionnier. Jacobson se concentre à ce sujet sur un « trope extractif » récurrent, à savoir le spectacle du puits de pétrole en feu illustrant le lien entre extraction et attraction qui perdure au-delà du cinéma des premiers temps : *Puits de pétrole à Bakou. Vue de près* (1897), *Le salaire de la peur* (1953), *There will be blood* (2007).

Prolongeant la réflexion avec l'exemple du film de **D.W. Griffith**, *La Télégraphiste de Lonedale* (*The Lonedale Operator*, 1911), l'auteur souligne que le montage alterné est motivé par le transport de l'argent et les ressources extraites pour la *Lonedale Mining Company*, reflétant aussi la communication télégraphique essentielle à la diégèse et rendue possible grâce aux câbles fabriqués avec le cuivre extrait des mines. Cela démontre une double ironie matérielle : dans la fiction, l'histoire raconte une tentative de vol de l'argent des ressources minières et dans la réalité technique, pour filmer cette histoire, il a fallu du cuivre (pour l'électricité des projecteurs) et de l'énergie issue de ces mines. L'extraction est ce qui permet à l'action (et au film) d'exister – une « absence structurante » selon Jacobson – car enveloppée dans le récit au point de la rendre invisible aux yeux du spectateur (Jacobson, p. 51).

Gros plan sur une clé à molette tenue dans les mains d'une femme, prise pour une arme à feu. Capture d'écran tirée du film *The Lonedale Operator*. American Mutoscope and Biograph Company, Public domain, Wikimedia

Ce propos de Jacobson s’inscrit dans un mouvement plus large d’intérêt pour les questions d’énergie et de médias telles qu'elles sont abordées par exemple dans le dossier « Film and extraction » de la revue *Media+Environment* (Vol. 6, Issue 1, November 2024).

Un cinéma infrastructurel

Le cinéma d’extractions renvoie à une double réalité. D’une part, il souligne l’inscription matérielle du cinéma dans les régimes extractivistes du capitalisme mondialisé, d’autre part, il désigne une pratique esthétique et critique émergente qui cherche à rendre visibles les infrastructures de production et de circulation des images. Cette démarche s’inscrit dans ce que **Nicole Starosielski** (*The Undersea Network*) et **Shannon Mattern** (*Code and Clay, Data and Dirt*) qualifieraient de cinéma « infrastructurel », c’est-à-dire un cinéma qui expose les réseaux techniques et logistiques qui rendent possible la création et la diffusion d’images. En ce sens, *Le Salaire de la peur* (**Henri-Georges Clouzot**, 1953), bien que pré-numérique, peut être considéré comme une œuvre emblématique. Le film, en effet, dépeint avec force un espace colonial sous l'emprise d'une multinationale pétrolière américaine. Il met en scène la chaîne d'exploitation des ressources, du puits aux camions de nitroglycérine, soulignant la matérialité du risque par une esthétique de la lourdeur, de la lenteur et de la sueur.

John Trost. *The Lucas Gusher at Spindletop Hill, South of Beaumont, Texas, United States.* Domaine public. Wikimedia

Un cinéma de réparations

Au-delà de l'analyse du cinéma comme infrastructure prédatrice, Brian Jacobson avance le concept de « cinéma de réparations », ou celui de contre-cinéma d'extractions qui induit une multiple transformation de l'image filmique : en opérant, par exemple, une réparation de et par l'archive (révélation du crime industriel), en montrant la face cachée des grandes compagnies extractives (coûts humains et écologiques) ou encore, en militant pour une justice épistémique (rétrocession aux populations autochtones exploitées du droit de se réapproprier leur histoire dont les ressources et les images ont été confisquées). L'objectif ultime de cette démarche réparatrice est de mettre en lumière la « nécropolitique »[102] de l'extraction. Le film-essai *Scenes of Extraction* (2023) de **Sanaz Sohrabi** – deuxième volet d'une trilogie consacrée à l'histoire pétrolière de l'Iran – en constitue une illustration : il utilise les archives visuelles de la *British Petroleum* et en remontant ces images, transforme une archive de domination coloniale en une preuve de résistance et de mémoire. « " Archive is a verb " indique la cinéaste, un verbe d'actions et de gestes de production, de spéculation, de surveillance et surtout, d'effacement »[103].

[102] Terme désignant selon l'historien **Achille Mbembe,** un système de pouvoir capable de décider quelles populations sont « sacrifiables » pour le profit économique.

[103] Cortopassi, G. (2025). Sanaz Sohrabi, scenes of extraction. *Espace art actuel* , (141), 94.

Enseigner l’histoire des arts au prisme de la matérialité

Cette proposition s'appuie sur des objets d’étude en lien direct avec les programmes dont l’analyse contribue au développement de compétences transversales et disciplinaires au collège et au lycée.

Qu'est-ce que la matérialité ?

La notion de matérialité constitue aujourd’hui un axe majeur de renouvellement des approches en histoire de l’art. Elle permet de croiser les dimensions techniques, culturelles, économiques, affectives et politiques des œuvres. Cette entrée a fait l’objet d’un colloque, le 36e congrès du Comité international d'Histoire de l'Art **(CIHA)** en juin 2024 à Lyon. La rencontre entre spécialistes a été l’occasion de rappeler que les notions, souvent proches, de *matière*, *matériau* et *matérialité* ont donné lieu à d’importantes remises en cause théoriques, scientifiques et permis des avancées méthodologiques dans la compréhension de l'œuvre d'art. Qu'est-ce que la matérialité ? Elle peut être définie comme l’ensemble des éléments qui constituent l’œuvre et qui contribuent à son élaboration : le support et ses différentes formes, le(s) matériau(x) (matière picturale, argile, encres …), les traces du geste de l’artiste (touches, empreintes, griffures, grattages, empâtement, superposition) en fonction de l’outil dont il a disposé. À l’occasion du colloque, l'historienne de l'art **Anne-Sophie Lehmann**, dans une vidéo sous-titrée, identifie la matière (« matter/materials ») comme ce qui compose les œuvres (substances, matériaux, outils, supports) et souligne que les matériaux ont longtemps été peu pris en compte en histoire de l’art. Elle distingue la matérialité (« materiality ») définie comme l’effet produit par les propriétés de la matière, textures, surfaces, poids, extension dans l’espace, format, traces gestuelles. Dans la perspective des *material* et des *cultural studies*, les objets sont appréhendés non seulement au plan de leur fabrication et de leurs usages, mais aussi dans les détours, la mise à distance voire l’échec de ces derniers. Les regards croisés entre disciplines[104] ne se limitent pas à la substance physique de l’œuvre, mais engagent des questionnements sur les choix de fabrication (techniques, approvisionnements, gestes artisanaux), le contexte historique de production, la perception sensorielle de l’objet artistique, sa réception et sa valeur symbolique ou politique. Autant de manières de redonner à ces objets une ou des vies, dans une approche favorisant la transversalité.

Enfin, plusieurs contextes contemporains rendent cette réflexion particulièrement pertinente dans le cadre scolaire. Comme le rappelle le propos introductif du CIHA, la dématérialisation et l'accès à l'œuvre d'art suite à la pandémie ont été banalisés. Comment avec nos élèves parler de matérialité de l’objet lorsque celui-ci se donne à voir sous la forme d'une reproduction ? Ensuite, le développement de l'IA et le débat sur la reproductibilité de l'œuvre d'art et son authenticité matérielle est un autre sujet de questionnement. Quel est le pouvoir de représentation ou de signification de la réalité physique de l'œuvre à l'ère de l'IA et des images virtuelles[105] ? Enfin l'accélération de la crise climatique, les conflits et la situation géopolitique mondiale soulèvent des questions urgentes dont s'emparent les historiens de l'art. L'histoire des conflits[106] et de ces crises peut aussi se faire par le biais du matériau. Dans quelles mesures, dans ce contexte, la matérialité des objets soumis à rude épreuve est-elle aujourd’hui support de réflexion ?[107]

[104] Cette expression est le titre d'un programme de recherche au sein de l'INHA sur les objet médiévaux en relation avec les cinq sens et les émotions.

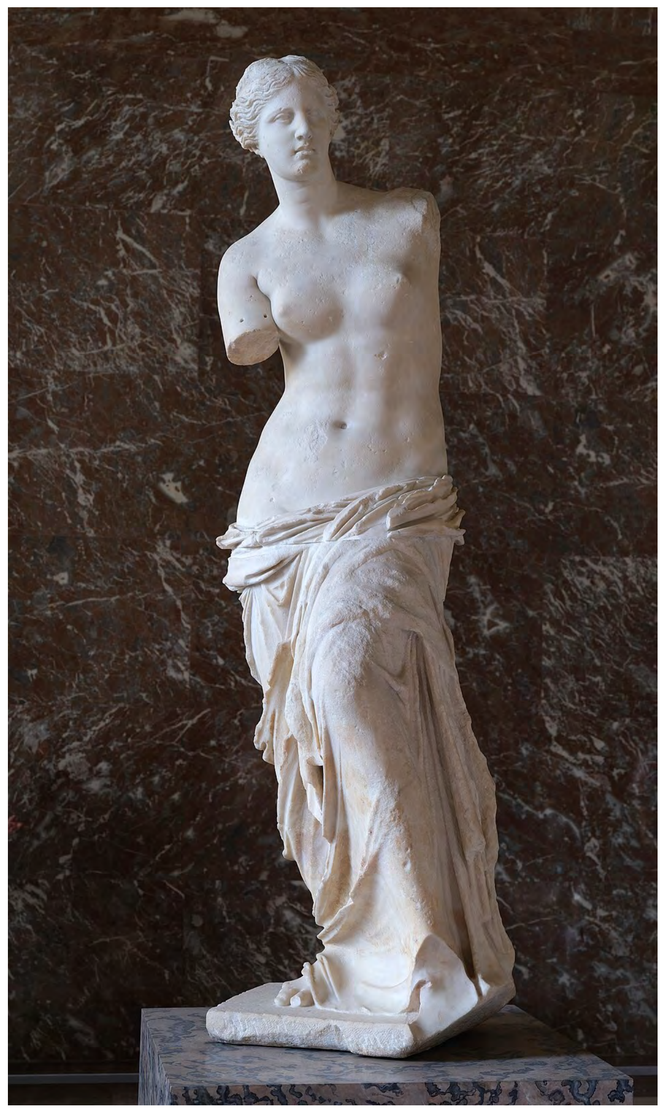
[105] Pour approfondir ce point, consulter la lettre ÉduNum thématique n°24 *Esthétiques de l'artificiel.*

[106] La matérialité de l'art à l'épreuve de la géopolitique ne sera pas abordée dans cette lettre. Voir l'article *Donner du sens aux traces*, issu du Vademecum *L'histoire des arts à l'intention des professeurs de collège.*

[107] La ressource d'accompagnement en HGGSP *Identifier, protéger et valoriser le patrimoine* propose des axes de réflexion transversaux.

Matérialité et chef d’œuvre

Chef d'œuvre du musée du Louvre, la Vénus de Milo est reproduite dans tous les manuels d’histoire des arts comme un exemple de perfection et de beauté caractéristiques de la statuaire gréco-romaine. L’étude de son état de conservation permet d’initier les élèves à une observation fine et à la description des œuvres, à partir d'une projection et de la lecture de la notice scientifique publiée sur le site du musée du Louvre. C’est une évidence, la sculpture est incomplète, les bras sont manquants, le nez refait, les éclats de marbre visibles, le chignon recollé, etc. L’exercice consiste à observer ces manques, à les identifier, à interroger leur impact visuel et à amorcer une réflexion sur la valeur esthétique et patrimoniale d’une sculpture conservée à l’état fragmentaire. Nommer ces manques, c'est prendre le temps du regard, regarder la sculpture selon plusieurs points de vue, dos, de face, de profil, la possibilité de zoomer sur les détails.



Vénus de Milo, *Marbre*, Musée du Louvre. CC0, Shonagon. Wikimedia

L’observation active de l’œuvre, rendue possible par des images en haute définition ou la modélisation 3D permet de développer une première analyse autour des matériaux, de la technique de la ronde-bosse, des effets de texture ou de lumière voire des angles de vue privilégiés. Cette démarche permet de construire des compétences transversales, regarder, décrire, verbaliser. L’étude de la Vénus de Milo permet aussi d’aborder les enjeux de réception et de construction du chef-d’œuvre en croisant l'histoire des techniques. Quelles ont été les restaurations depuis sa découverte en février 1820 ? La question des bras pose celle de la restauration des antiques et renvoie aux hypothèses concernant les attributs de la sculpture. Il est intéressant de nommer avec les élèves les étapes de vie d’un objet de sa création, selon la technique dite en pièces rapportées, à son usage ou fonction puis son abandon jusqu’à sa redécouverte et sa restauration partielle. Les polémiques sur son emplacement au sein du musée participent à la sacralisation de l’objet.

Pour aller plus loin

- **Matérialité et transports** : l'œuvre d'art est un objet que l’on déplace, accroche, que l'on échange, ses dimensions et son format peuvent se modifier avec le temps. Un article sur le site Odysseum sur les différents voyages de La Vénus de Milo depuis sa découverte au large de Mélos (Milo)
- **Matérialité et mystère** : un *podcast* Les Odyssées du Louvre en partenariat avec France Inter pour initier les plus jeunes, du cycle 3, à l’aspect fragmentaire d’une sculpture
- **Matérialité et muséographie**: une vidéo sur la salle et le nouveau parcours au sein du Louvre , enrichie d’un dossier à destination des enseignants
- **La matérialité, au-delà de la question du chef d’œuvre** : un cours en ligne de l’EPHE (École Pratique des Hautes Études) sur la sculpture grecque, réalisé en partenariat avec l'Université Paris sciences et lettres et le Musée du Louvre, avec Ludovic Laugier, conservateur des sculptures grecques

87 Histoire des arts

Compétences travaillées en classe au cycle 4

- Associer des couples notionnels : matériau/savoir-faire, couleur/matière, texture/structure…
- Utiliser les outils numériques pour mieux comprendre une œuvre ou un monument
- Identifier des gestes techniques et artistiques
- Développer une lecture sensible et argumentée de l'œuvre

HDA et EAC

La reproduction de la Vénus de Milo, au sein du programme MUSE proposée aux collectivités par la Réunion des musées nationaux/Grand Palais (Rmn-GP), est un outil à destination des enseignants. MUSE est un nouveau format modulable d'exposition pédagogique et ludique, un parcours d'initiation à l'histoire de l'art à destination des familles et des groupes scolaires et périscolaires, à travers l'exposition de photographies en haute définition d'œuvres, d'écrans et de panneaux pédagogiques. Un dossier pédagogique est fourni pour préparer avec les élèves la venue de l'exposition en classe.

Matérialité et symboliques

Comment inviter les élèves à réfléchir à la manière dont la matière participe au sens d'une œuvre ? À travers l'exemple de **l'or**, il s'agit de comprendre les propriétés physiques et esthétiques d'un matériau précieux, sa valeur économique, symbolique, religieuse ou politique, les évolutions de sa perception dans l'histoire de l'art, notamment entre le Moyen Âge et la Renaissance. Il est difficile de donner une définition non scientifique de l'or. La caractérisation de sa couleur reste complexe et aujourd'hui, associée à la couleur jaune ; la perception des couleurs est une construction culturelle, changeante en fonction des périodes et des cultures. Les cultures anciennes considèrent ainsi l'or avant tout comme une matière, et non comme une couleur. L'Exposition *Or* au **Mucem** se penche sur les propriétés uniques de l'or, un métal précieux qui traverse toutes les époques et civilisations, tous les types d'objets, des masques funéraires, parures royales, objets liturgiques aux pièces de monnaies. L'objectif d'une initiation à l'histoire matérielle est de décrypter la manière dont une œuvre s'enrichit de significations à travers ses matériaux. Objet de convoitise et de conquête, traditionnellement symbole de pouvoir et de richesse, l'or est aussi, par sa plasticité même, le matériau de toutes les métamorphoses, qualité faisant de lui un support privilégié dans les arts. L'étude du *Diptyque de Wilton* conservé à Londres à la **National Gallery** permet d'explorer la symbolique et la technicité de l'or dans la peinture médiévale. La mise en œuvre, caractéristique du gothique international, est d'un raffinement extraordinaire, les couleurs se détachent sur un fond doré à la feuille. Le lapis-lazuli, pigment le plus onéreux à l'époque, a abondamment été employé et orne les robes des anges et de la Vierge. La feuille d'or a été travaillée au poinçon et au brunissoir pour créer des effets décoratifs. Le travail minutieux que l'on peut observer grâce au zoom évoque l'orfèvrerie. L'or n'est pas seulement décoratif ici, il matérialise l'espace divin. Il met en valeur le statut sacré des figures représentées et manifeste le pouvoir du commanditaire, Richard II, roi d'Angleterre, représenté agenouillé devant la Vierge. Comprendre l'œuvre par ses matériaux peut s'enrichir d'une approche scientifique et d'analyses physico-chimiques des pigments, des métaux, de supports. Si notre perception sensorielle fournit un certain nombre de données sur la matérialité

de l'objet d'art (opacité, transparence, rigidité, porosité, rugosité, etc.), il faut parfois pousser les investigations au-delà des apparences et interroger la matière de l'intérieur, grâce à la photographie multispectrale, la radiographie ou le microscope électronique. L'intégration des données scientifiques dans les expositions témoigne d'un retour à la matérialité de l'œuvre, dans un contexte fortement marqué par le numérique.

Diptyque de Wilton, *tempera sur bois,* National Gallery CC BY-NC-ND 4.0

C'est le cas de la restauration du petit panneau de **Cimabue** *La Dérision du Christ*, par les équipes du **C2RMF** (Centre de recherche et de restauration des musées de France). Redécouvert en 2019 dans une résidence particulière de Compiègne, ce panneau du XIII^{e} siècle a été largement médiatisé : son image a même souvent été éclaircie de manière virtuelle, afin d'en augmenter l'impact visuel. Le rapprochement avec deux fragments conservés à Londres et à New York a permis de redonner la paternité des trois peintures au peintre Cimabue. L'étude de leur matérialité montrent qu'ils proviennent à l'origine une œuvre plus grande. Le processus d'étude et de restauration permet de mieux apprécier la virtuosité de la technique et du style du peintre, la gamme de couleurs intenses et subtiles, la nervosité du modelé, l'intensité des expressions des visages, la préciosité du fond d'or. Ce dernier est en effet décoré en partie supérieure de poinçons microscopiques, de la taille d'une tête d'épingle, en une frise de volutes, tout comme dans les ornements de l'auréole du Christ. Degré de raffinement que le peintre a également adopté dans la *Maestà* du Louvre, d'envergure monumentale.

Pour aller plus loin

- **Or, objets précieux et innovations** : un dossier pédagogique dans le cadre de l'exposition *D'or et d'ivoire. Paris, Pise, Florence, Sienne. 1250-1320* au Louvre Lens
- **Or et représentation réaliste de la lumière** : les collections en gigapixels du Palais des Beaux-Arts de Lille

89 Histoire des arts

- **Or et restauration** : une vidéo où les équipes du C2RMF présentent leur travail de restauration du Cimabue du Louvre
- **Or, propriétés et techniques** : le mur collaboratif du Quai Branly dans le cadre de l'exposition *Au fil de l'or*

Compétences travaillées en classe au cycle 4

- Associer des couples notionnels : maîtrise et talent, artistes et artisans, matériau et habiletés, outils et techniques, propriétés physiques et propriétés symboliques
- Différencier l'expérience du contact avec une œuvre sur le terrain et une reproduction en classe

Cimabue, *La Dérision du Christ*, détrempe sur fond d'or sur bois, Musée du Louvre. Domaine public. Wikimedia

- Appréhender l'imaginaire d'un matériau, symbolique, politique, onirique …
- Repérer l'habileté d'un artisan ou d'un artiste en fonction des techniques utilisées pour la représentation d'une figure

HDA et EMI

- La restauration médiatisée au sein des musées répond à une attente du public : comprendre de manière plus précise, presque objective, comment les œuvres sont fabriquées et ainsi accéder à une forme de « vérité » de la création artistique. Au musée d'Orsay, la restauration du tableau *Un enterrement à Ornans* de **Gustave Courbet** a lieu au sein d'un espace clos spécialement aménagé à cet effet dans la salle 7, au rez-de-chaussée, où le tableau est habituellement accroché. On peut se demander si l'imagerie scientifique ne présente pas un risque : en dévoilant trop d'informations techniques, ne risque-t-elle pas d'atténuer la part de mystère ou de « magie » qui entoure la création ? Loin de réduire l'œuvre à un simple objet technique, ces analyses offrent un accès privilégié au processus créatif. Elles permettent au public – et aux élèves – de mieux percevoir les choix effectués par l'artiste : choix des matériaux, gestes réalisés, étapes de construction. Elles rendent visible la transformation d'une idée ou d'une intention artistique en des formes, lignes et couleurs.

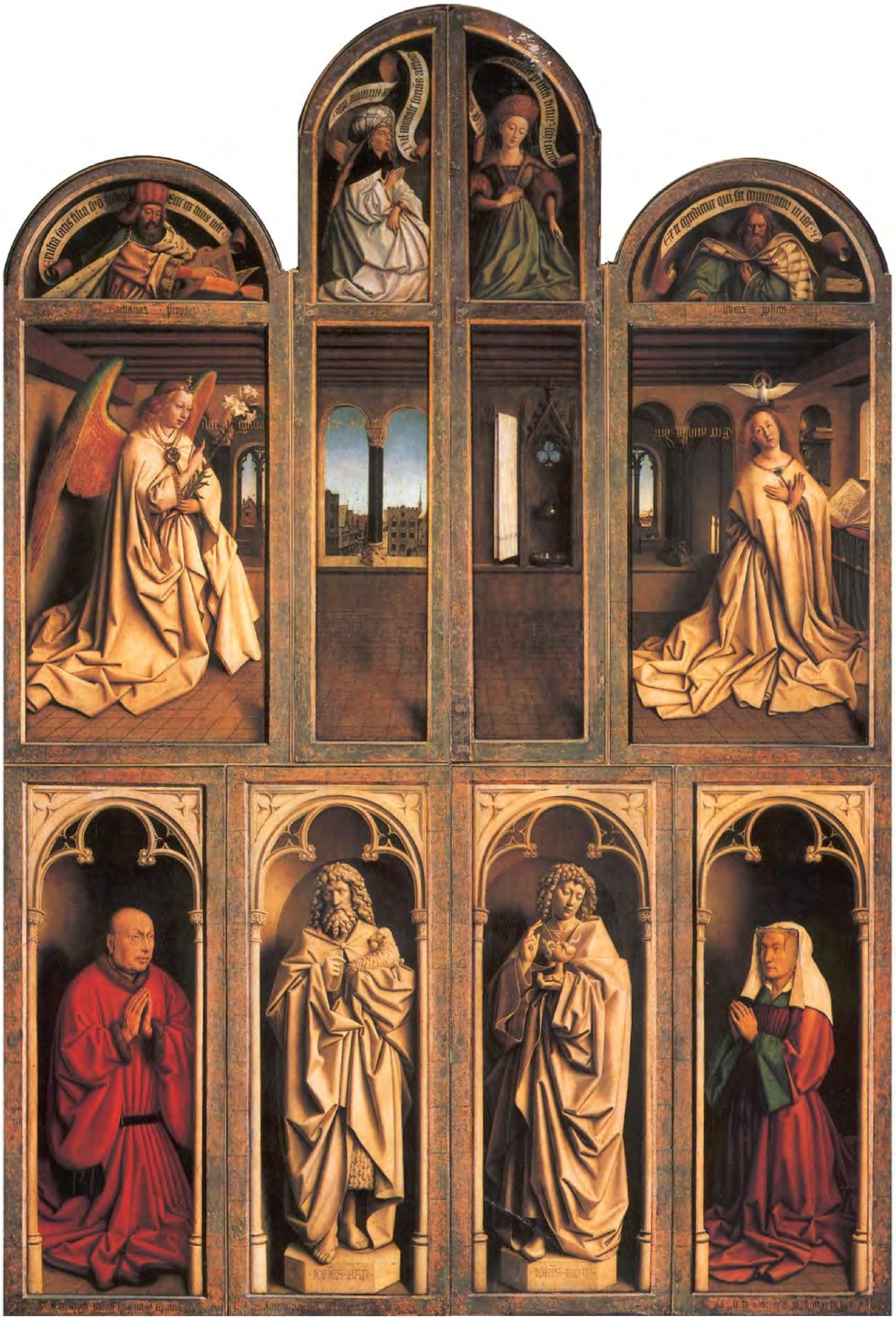
Gustave Courbet. *Un enterrement à Ornans* - Google Art Project. Domaine public, Wikimedia Commons

Matérialité et expérience du spectateur

Anne-Sophie Lehmann, spécialiste de la peinture de **Jan van Eyck**, propose de faire une autre histoire de la peinture à l'huile. Ce composant n'est pas pensé comme simple médium mais bien comme un médiateur, qui offre des potentialités, des ressources matérielles spécifiques comme la transparence, la viscosité ou la fluidité. En s'intéressant à l'aspect matériel de l'œuvre d'art, elle interroge l'expérience du spectateur, l'effet, la réception de l'œuvre d'art comme objet, une réception sensorielle et affective. Van Eyck est appréhendé non seulement comme un peintre, mais bien plus comme un artisan des matériaux, un expérimentateur. Selon cette approche, la virtuosité de Van Eyck n'est pas qu'optique, concernant le rendu réaliste des objets ou des textures, mais technique et matérielle. La restauration de *La Vierge et l'Enfant au chancelier Rolin*, menée par le C2RMF conservée au musée du Louvre révèle non seulement un éclat de la peinture depuis longtemps oublié, mais engendre aussi de nouvelles interrogations quant à la conception initiale de ce panneau exceptionnel. Les cartographies de fluorescence X ont permis de proposer l'usage de plusieurs additifs : vert de gris dans les sombres, sulfate de zinc qui

semble lié à l'usage d'une laque brune dans le brocart du chancelier et les bruns, verre broyé dans le manteau de la Vierge. Le panneau a retrouvé des qualités optiques masquées par les couches de vernis ou de dépôts. Cette opération s'inscrit ainsi dans l'élan actuel d'études et de valorisation de l'œuvre du peintre, initié par la restauration du retable du *Retable de l'Agneau Mystique* de la cathédrale Saint-Bavon de Gand. La documentation scientifique et macrophotographiques des œuvres constitue une source matérielle pour l'étude des surfaces et techniques de Van Eyck. Les bijoux, les drapés, les perles, les cheveux[108] sont rendus avec un tel soin matériel qu'ils invitent le regard à les « toucher » visuellement. Cette matérialité crée une tension entre le spirituel (le sujet religieux) et le physique (la matière du monde représenté).

[108] Anne-Sophie Lehmann, « Small Hairs : Meaning and Material of a Multiple Detail in the Ghent Altarpiece's Adam and Eve Panels » in *Van Eyck Studies: Papers Presented at the Eighteenth Symposium for the Study of Underdrawing and Technology in Painting*, Brussels, 19-21 September 2012, p. 107-119.



Hubert et Jan van Eyck. *Retable de l'Agneau Mystique.* huile sur bois, cathédrale Saint-Bavon. Domaine public. Wikimedia

Le projet VERONA (Van Eyck Research in OpeN Access) est un dispositif d'observation en très haute définition porté par le *Royal Institute for Cultural Heritage* (KIK-IRPA) à Bruxelles. Cette plateforme d'annotation permet des zooms extrêmes dans la matière picturale, l'analyse des couches, reprises et repentirs. La peinture de Van Eyck exige une observation lente et précise, c'est un excellent support pour travailler la description. La **Gemäldegalerie de Berlin** est l'une des institutions muséales qui a participé au projet VERONA, en organisant une exposition intitulée *Zoom auf van Eyck. Meisterwerke im Detail* qui met en avant une projection numérique interactive basée sur les images ultra-haute résolution produites par VERONA. Les visiteurs peuvent « zoomer » eux-mêmes, explorer les détails des œuvres. L'expérience immersive met en dialogue les originaux de Berlin avec les projections numériques, permettant au public de passer de l'image réelle au détail agrandi. L'occasion de discuter de la question de l'authenticité de l'œuvre et de la nature des expériences fondées sur le principe de l'immersion.

Pour aller plus loin

- **Matérialité, approche descriptive et interprétation :** un scénario pédagogique de l'académie de Poitiers sur les *Époux Arnolfini*
- **Matérialité et illusions optiques :** un *podcast* France Culture sur les mystères des *Époux Arnolfini*
- **Matérialité et restauration** : une vidéo du musée du Louvre sur la restauration de la *Vierge du Chancelier Rolin*
- **Matérialité, péripéties et campagne de restauration :** une conférence sur l'histoire matérielle du retable de *l'Agneau Mystique* des frères van Eyck, une histoire qui a souffert de nombreuses péripéties

Compétences au cycle 4

- Exercer son regard
- Comprendre les savoirs faire et la technique d'un peintre
- Expliquer comment les progrès scientifiques et techniques transforment l'interprétation des arts
- Développer une lecture pluridisciplinaire des œuvres en insistant sur l'aspect sensoriel

HDA, Physique chimie (1re) et philosophie : l'expérience immersive[109]

Sciences et couleur sur la palette du peintre

Matérialité et brillance

Cette approche fait écho à un autre courant, très dynamique aux Pays-Bas, qui propose une « théorie des matériaux » renouvelée. La culture de la brillance se diffuse dans les Provinces-Unies au Siècle d'Or. Pour l'historien de l'art, **Jan Blanc**[110], cette qualité du rendu des matériaux, s'explique en partie par la concurrence. Il y a beaucoup de bons peintres dans les Provinces-Unies au XVIIe siècle, l'excellence est une nécessité pour survivre et vivre de sa peinture. Pour sortir du lot, il fallait donc non seulement être techniquement irréprochable, mais aussi inventer de nouveaux sujets ou de nouvelles façons de les représenter. Ainsi, les tableaux hollandais des *fijnschilders* du XVIIe siècle dont les grands représentants sont Gerrit Dou et Frans von Mieris, au fini minutieux et à la brillance caractéristique sont très recherchés par les amateurs et collectionneurs. Le genre développé par des artistes néerlandais pour un public néerlandais, la *stilleven* apparaît également dans les années 1630, et permet à ses peintres de jouer avec les sens de leur public tout en inventant un genre proprement moderne et néerlandais. Représenter un reflet dans les peintures de nature morte hollandaises constitue à la fois un défi technique et une manière de suggérer le passage du temps, deux aspects qui ont toujours captivé les spectateurs. Le reflet naît de la lumière renvoyée par un objet à un

[109] La lettre ÉduNum n°18 thématique (2022) dans la section histoire des arts contextualise les plaisirs de l'immersion.

[110] Jan Blanc, *Stilleven : Peindre les choses au XVIIe siècle*, Éditions 1 : 1 (ars), 2020. L'auteur insiste sur le plaisir que suscite la représentation des choses, les effets optiques participant au « plaisir synesthésique » du spectateur. Il s'appuie sur la description du tableau *Still Life with Fruit and Flowers* de **Davidsz de Heem**, peintre hollandais du Siècle d'or, qui excelle dans le rendu des matières (fruits, métaux, fleurs), et les textures variées dans la *Vanitas Still Life* de **Pieter Claesz** autre maîtres du *stilleven* hollandais.

Jan van Eyck, *Les Époux Arnolfini*, huile sur bois, portrait, National Gallery, domaine public. Wikimedia

instant précis, et les peintres étudient attentivement la façon dont cette lumière réagit selon les surfaces qu'elle rencontre. Cet effet lumineux devient alors pour les peintres une occasion de créer l'illusion du réel et de démontrer leur virtuosité. Les surfaces lisses, comme le verre ou le métal, renvoient des éclats qui permettent de rendre avec précision les textures et la matière. Les artistes explorent également d'autres formes de reflets, qu'il s'agisse de ceux présents dans un miroir, sur l'eau ou dans la brillance de la cornée de l'œil. Cette culture de la brillance est identique à celle qui caractérise les artefacts chinois qui composent parfois ces mêmes collections. Les étoffes de soie, laques, porcelaines, papiers dorés à la feuille spécialement produits pour l'exportation traduisent un goût de l'exotisme et des jeux de surface. Dans un livre consacré à la porcelaine dans la Chine des Ming et des Qing, l'historien **Jonathan Hay**[111] explore le plaisir visuel et esthétique procuré par les formes et traitements de ces artefacts, la brillance n'est pas neutre : « on peut dire des objets qu'ils ont la capacité de penser matériellement, si l'on garde à l'esprit que la pensée qu'ils pratiquent est différente de celle des êtres humains qui les ont créés et que cette pensée a besoin d'êtres humains, d'observateurs, pour se produire. […] Je fais l'hypothèse que la fonction de ces objets est de nous connecter visuellement et physiquement au monde qui nous entoure, de nous mettre en lien avec notre environnement ». Jonathan Hay forge un concept, « surfacescape », qui redonne toute leur importance aux qualités haptiques et sensorielles des objets d'art chinois. Les recherches récentes montrent que ces objets ne sont pas de simples témoins d'un commerce mondialisé, ils révèlent aussi des hybridations matérielles et techniques. Par exemple, certaines porcelaines chinoises ont été réassemblées en Europe avec des montures rococo, créant des objets mêlant savoir-faire asiatiques et goûts européens. Au Rijksmuseum, l'exposition une journée complète dans une maison hollandaise du XVII^{e} siècle met en scène le quotidien domestique. La maison Petronella et ses meubles miniatures est une des pièce maîtresse de l'exposition. Les objets, pour certains réalisés avec des matériaux rares, souvent importés via les routes commerciales coloniales, servent autant à meubler qu'à afficher la richesse, le raffinement et le pouvoir économique de la famille — qui reposent en grande partie sur l'exploitation coloniale. La cuisine est décorée avec de la porcelaine chinoise et japonaise transportée par la la Compagnie néerlandaise des Indes orientales. Pour l'historienne, **Susan Broomhall**, la maison est interprétée comme un « ego-document », un moyen pour **Petronella Oortman** d'écrire sa propre histoire, non pas en mots, mais via la matérialité des objets. L'historienne souligne que ces maisons de poupées sont souvent réalisées par des femmes riches, conçues non comme des jouets d'enfants, mais comme des œuvres d'art et des symboles de statut. Ainsi, la miniature est un mode d'expression féminine dans un contexte où les femmes avaient des moyens limités pour exhiber leur goût, leur pouvoir social, leur influence. La maison de poupée dans sa matérialité devient un espace de représentation et de résistance.

[111] Jonathan Hay. *Sensuous surfaces: the decorative object in Early Modern China*, Londres, Reaktion books, 2010. Le concept de *surfacescape* permet d'analyser la décoration non seulement comme ornement, mais aussi comme espace sensoriel et symbolique. La surface d'un objet attire le toucher, le regard, et cette interaction façonne une expérience esthétique.

Pour aller plus loin

- **La peinture néerlandaise au siècle d'or :** les collections en ligne du Maritshuis avec des podcasts courts en français
- **Les choses et leur matérialité** : le dossier pédagogique du musée du Louvre consacré au genre de la nature morte
- **Le quotidien révélé :** trois vidéos produites par le musée du Louvre, les traces de l'empire hollandais, être moderne, être hollandais, la société hollandaise
- **La peinture néerlandaise :** les cours publics en ligne de l'historien de l'art Jan Blanc

95 Histoire des arts

Compétences lycée

- Proposer et soutenir l'interprétation d'une œuvre
- Situer une œuvre dans son contexte historique et culturel
- Interpréter l'émergence d'objets à différentes échelles, en lien avec le marché local ou les circulations internationales

Matérialité, genre et écriture de l'histoire

Les approches en l'histoire de l'art intégrant le matériau ont permis d'importantes avancées dans la connaissance de l'art du XX^{e} siècle ou du moins un déplacement du regard. Deux expositions majeures *Elles font l'abstraction* au Centre Pompidou (2021) et *Histoires entrelacées. Abstraction et textile moderne* au Musée des Beaux-Arts du Canada (2025) remettent en question les hiérarchies isolant le textile, pour redonner une visibilité à la fois à des matériaux longtemps considérés comme « mineurs » et à des artistes pionnières. L'exploration des potentialités du fil permet non seulement de reconnaître pleinement la contribution des femmes artistes, mais aussi de questionner la construction même de l'histoire de l'art abstrait. Si nous comparions deux œuvres, une aquarelle de Kandinsky de 1913 et la couverture de berceau réalisée en 1911 par **Sonia Delaunay** pour la naissance de son fils à partir de chutes de tissus, quels seraient les critères qui définiraient l'abstraction ? La technique, l'intention, le matériau ? En replaçant le matériau au cœur de l'analyse, de nouvelles perspectives transversales apparaissent entre arts plastiques, arts décoratifs, ou design. Comme Sonia Delaunay ou Sophie Taeuber-Arp, de nombreuses artistes pionnières du début du XX^{e} siècle brouillent les frontières disciplinaires et remettent en cause les hiérarchies entre Beaux-Arts et arts appliqués. Au cœur du matériau, il y a le savoir et le savoir-faire : refuser la formation pure et traditionnelle, les pratiques des disciplines de la peinture, de la sculpture souvent associées aux hommes, refuser les hiérarchies entre les matériaux nobles et les matériaux non nobles, du quotidien ou domestique, entre les compétences et les formations, refuser les frontières entre les compétences élitistes, les formations académiques et les parcours autodidactes, les habiletés populaires. Leur démarche propose une vision élargie et démocratique de la création, fondée sur le renouvellement des techniques artisanales. À partir des années 1970, une nouvelle génération d'artistes réactive ces pratiques textiles en tant que véritables médiums plastiques, porteurs d'enjeux politiques et militants. Ainsi, l'étude des arts textiles permet d'aborder simultanément des enjeux scientifiques, historiques, féministes et muséographiques : déconstruction des catégories, revalorisation des savoir-faire, renouvellement des récits de l'art et exploration de nouvelles expériences sensibles.

Pour aller plus loin

- **Matrices du design** : une conférence sur l'artiste **Anni Albers** sur canal U
- **Femmes et textile, des représentation historiques** : une exposition virtuelle réalisée par Art Explora
- **Tissage et histoire du modernisme** : un article en lien avec l'exposition au musée des Beaux-Arts du Canada, avec un focus sur le regard des artistes sur la production textile

Compétences lycée

- Analyser les liens entre art et artisanat
- Comprendre la réception d'une œuvre d'art et son évolution
- Développer son esprit critique quant à l'écriture de l'histoire de l'art

HDA et EMC

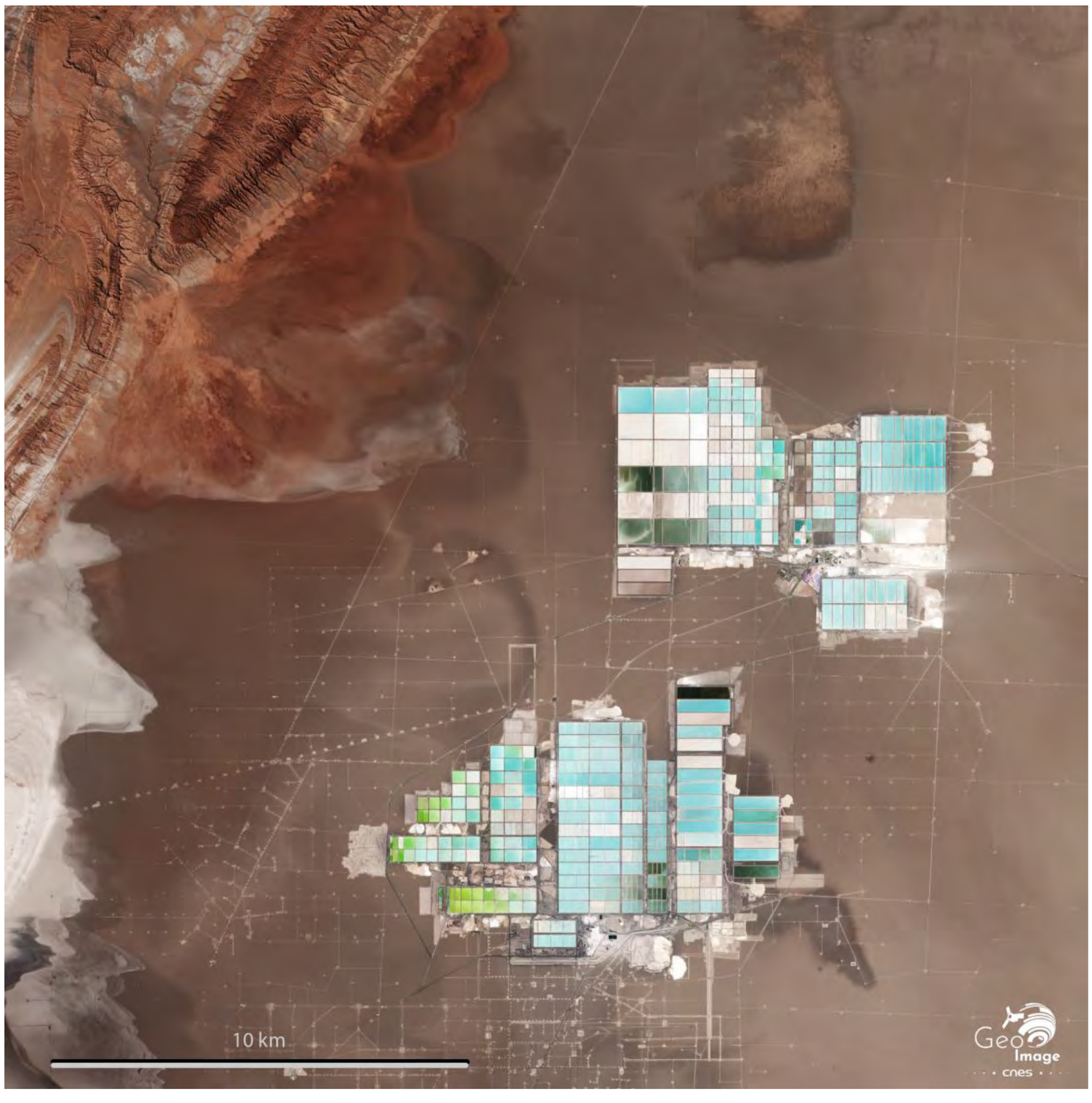
Agir contre les discriminations liées à l'orientation sexuelle et à l'identité de genre au niveau 5^{e} : livret pédagogique réalisé par **Aware** et l'académie de Créteil

Géopolitique de la matérialité

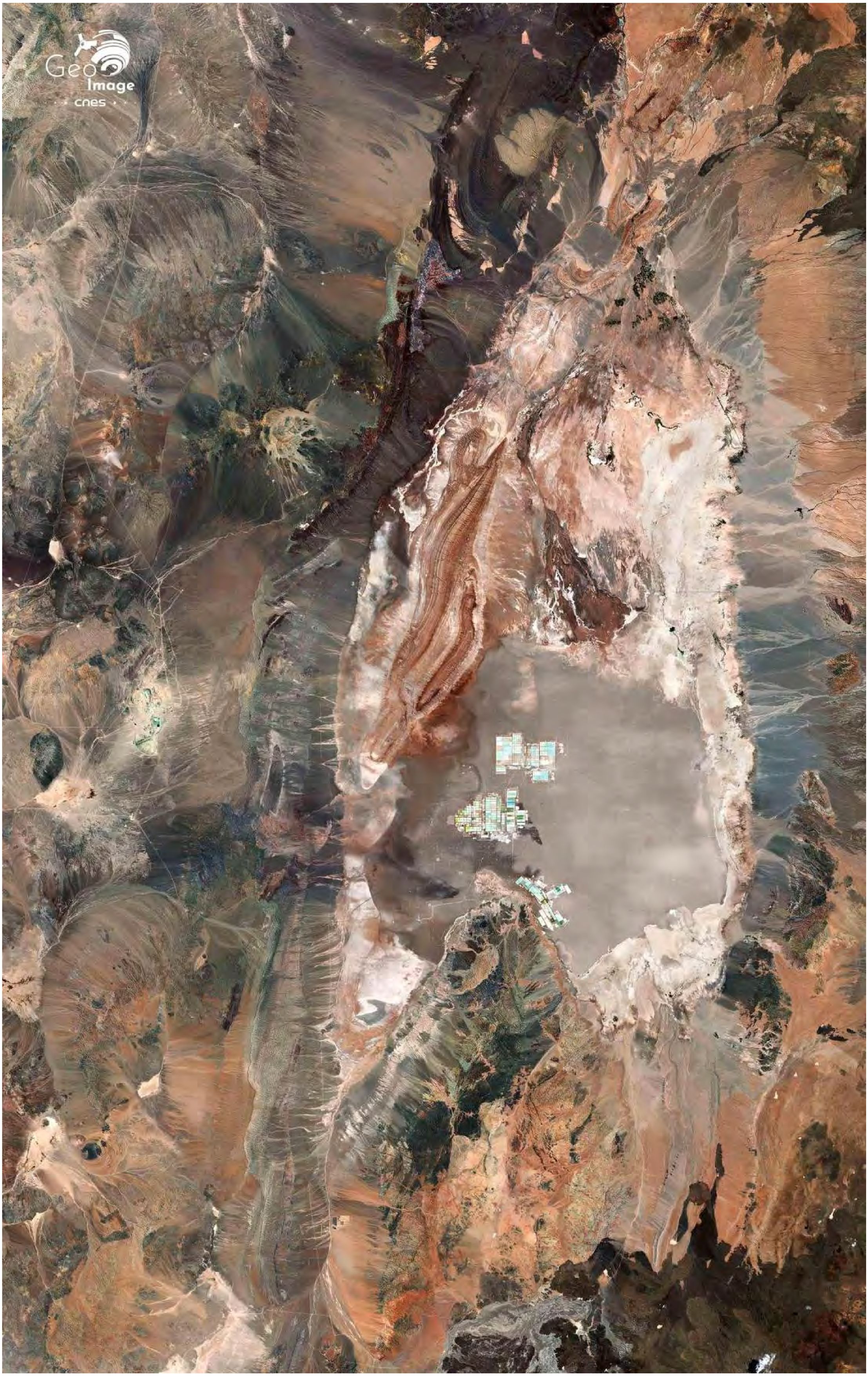
Les phénomènes de transition et de mondialisation en tant que processus géographique sont particulièrement mobilisés dans les programmes de lycée. En seconde, le thème « Sociétés et environnements, des équilibres fragiles » invite à s'interroger sur la disponibilité durable de ressources sous pression. En première générale, le thème « Une diversification des espaces et des acteurs de la production » permet une réflexion sur les recompositions des espaces productifs. En terminale technologique, « les réseaux de câbles sous-marins, infrastructures essentielles de la mondialisation », sont abordés dans le thème « Mers et océans : au cœur de la mondialisation ». En enseignement de spécialité histoire, géographie, géopolitique et science politique (HGGSP), en classe de terminale, le thème « De nouveaux espaces de conquête » étudie l'espace et les océans. Le thème « L'environnement, entre exploitation et protection : un enjeu planétaire » présente dans un premier axe les interactions entre les sociétés et leur milieu, puis, dans un second axe l'impact de l'évolution du climat sur les sociétés et son rôle dans la coopération internationale. En terminale professionnelle, l'un des deux thèmes du programme aborde « L'accès aux ressources pour produire, consommer, se loger et se déplacer ».

Substrats, systèmes et infrastructures du numérique

La transformation numérique actuelle repose sur l'exploitation de ressources matérielles essentielles telles que le lithium, les terres rares et le cobalt au service de productions immatérielles. Cela conduit à un nouvel extractivisme lié à la transition énergétique et numérique, avec une expansion rapide de l'empreinte minière dans des zones écologiquement et politiquement sensibles.



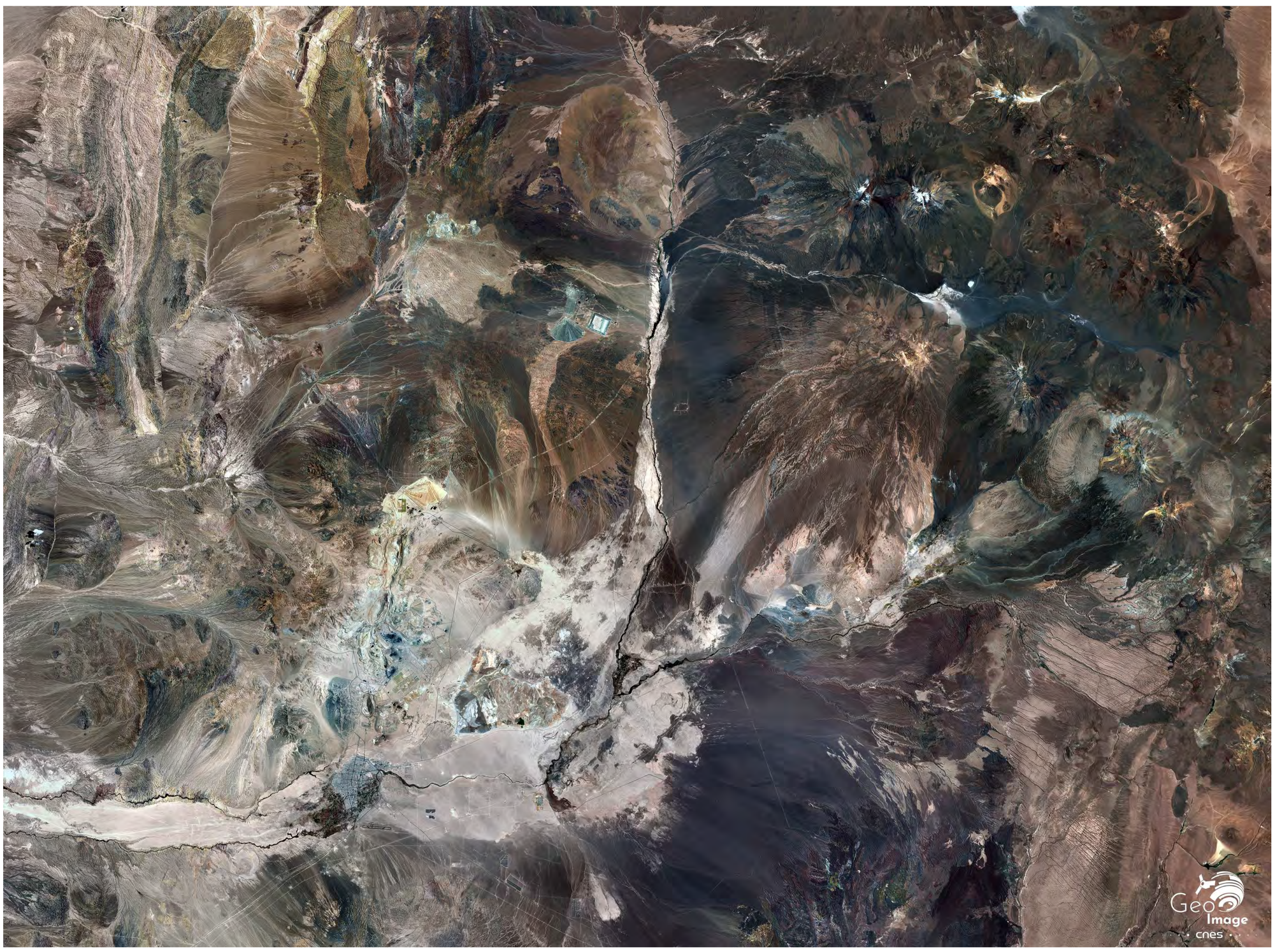
L'exploitation du lithium dans le salar d'Atacama au Chili (détail). Prise de vue réalisée le 29 avril 2017 par un satellite Sentinel-2. Ce document est extrait du site GeoImage du CNES.
Crédit : European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery



L’exploitation du lithium dans le salar d'Atacama au Chili. Prise de vue réalisée le 29 avril 2017 par un satellite Sentinel-2.
Ce document est extrait du site GeoImage du CNES. Crédit : European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery

Géographie minière

La nécessité d'exploiter des métaux ferreux et non-ferreux entraîne des recompositions territoriales, des conflits d’usage et des pressions environnementales dans certains territoires. Par exemple, les Andes qui concentrent les réserves mondiales de métaux (dont le cuivre et le lithium) illustrent la tension entre entreprises transnationales, États et populations locales autour de la maîtrise de l’eau et de l’usage des terres ; en témoigne ce scénario indexé dans Édubase, qui traite des pressions exercées sur le désert d’Atacama. L’exploitation des salars dans le « triangle du lithium » (Bolivie, Chili, Argentine) a pour conséquence une utilisation massive de l’eau dans des régions arides, ce qui soulève des questions de justice environnementale. Une séquence menée en documentation dans le cadre d'un dispositif ULIS étudie l’impact de l'utilisation quotidienne d’outils numériques. En République démocratique du Congo, la concentration de l’offre entraîne une dépendance stratégique, notamment de l’Union européenne, au cobalt. Ainsi, le numérique ne « dématérialise » pas l’économie, mais déplace les externalités écologiques et sociales, tout en créant des vulnérabilités géopolitiques.



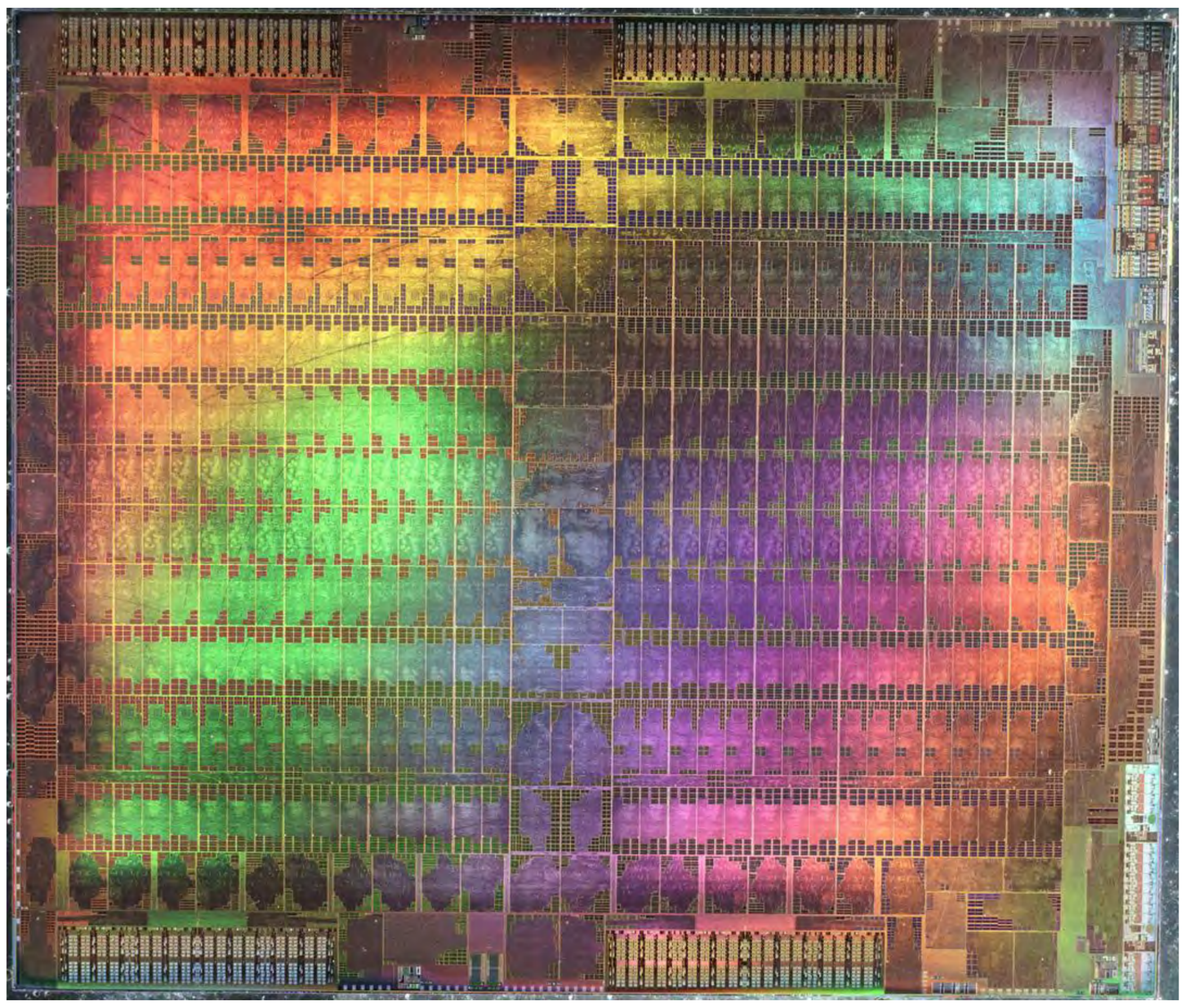
Chili - La mine de cuivre de Chuquicamata et la ville de Calama. Prise de vue réalisée le 29 juillet 2020 par un satellite Sentinel-2.
Ce document est extrait du site GeoImage du CNES. Crédit : European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery

Une « guerre des puces »

La fabrication des semi-conducteurs équipant les objets du quotidien est un système complexe qui combine conception, matériaux purs, photolithographie, énergie et eau. Certains processus constituent des goulets d’étranglement technologiques, avec une faible substituabilité et une forte dépendance, comme évoqué dans cet article de **Jacques Fontanel**, professeur émérite à l'université Grenoble-Alpes et au Centre d'études sur la sécurité internationale et les coopérations européennes. Trois entreprises transnationales incarnent ces maillons critiques :

- L'entreprise TSMC est le principal fondeur de puces avancées, déterminantes pour l'intelligence artificielle et l'électronique mondiale ;
- L'entreprise ASML dispose d'un quasi-monopole sur la lithographie EUV, technologie essentielle dans la fabrication des semi-conducteurs ;
- L'entreprise Nvidia est une société multinationale majeure de production de GPU pour l'IA, toutefois concurrencée par d'autres fournisseurs comme AMD.

Cette configuration crée une « diplomatie du silicium »[112] : alliances, relocalisations, contrôles d'exportation et subventions traduisent la volonté des États de sécuriser l'ensemble de la filière. La dépendance mondiale à la production taïwanaise fait de cette île un pivot stratégique : elle montre comment une spécialisation productive peut constituer à la fois un levier de puissance et un facteur de vulnérabilité. À noter cependant que des projets de relocalisation voient le jour comme la construction de la première usine de TSMC en Arizona, projet soutenu par la loi américaine CHIPS and Science Act de 2022.



Fritzchens Fritz. *GPU shot etched 3* / https://betterimagesofai.org / https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[112] Carroué, Laurent. « L'essor des centres de données : intelligence artificielle, cyberespace, pouvoir et territoire ». *Géoconfluences*, juillet 2025.

Infrastructures : « colonisations » maritimes et extra-atmosphériques

Les flux immatériels, dont le transit est rendu possible par le cyberespace, reposent sur des infrastructures tangibles. En effet, les câbles sous-marins et terrestres transportent environ 95 % du trafic Internet mondial, une part importante de ces flux numériques étant de nature intercontinentale. Leur géographie révèle des points faibles, faisant de certains détroits ou façades littorales des espaces stratégiques. Cette séquence permet de mettre en avant le passage sensible qu'est le détroit de Malacca. La surveillance et la protection de ces zones cruciales implique États, opérateurs privés et organisations internationales.

Le New Space contribue à l'accroissement rapide de la densité de l'orbite terrestre basse : en découlent des problèmes de congestion orbitale et de réglementation sans omettre les risques liés au syndrome de Kessler, à la pollution lumineuse et aux perturbations magnétiques. La mer et l'espace deviennent les nouvelles limites physiques du monde numérique, où se mêlent connectivité, rivalités géopolitiques et gestion des communs.

Lecture et écritures numériques

Bien que l'adjectif *virtuel* soit souvent associé au numérique, ce dernier n'est en réalité **jamais immatériel**, mais toujours pris dans des supports, des infrastructures et des gestes qui reconfigurent nos manières de lire, d'écrire, d'enseigner et de transmettre, tant dans le travail du professeur que dans les apprentissages de l'élève.

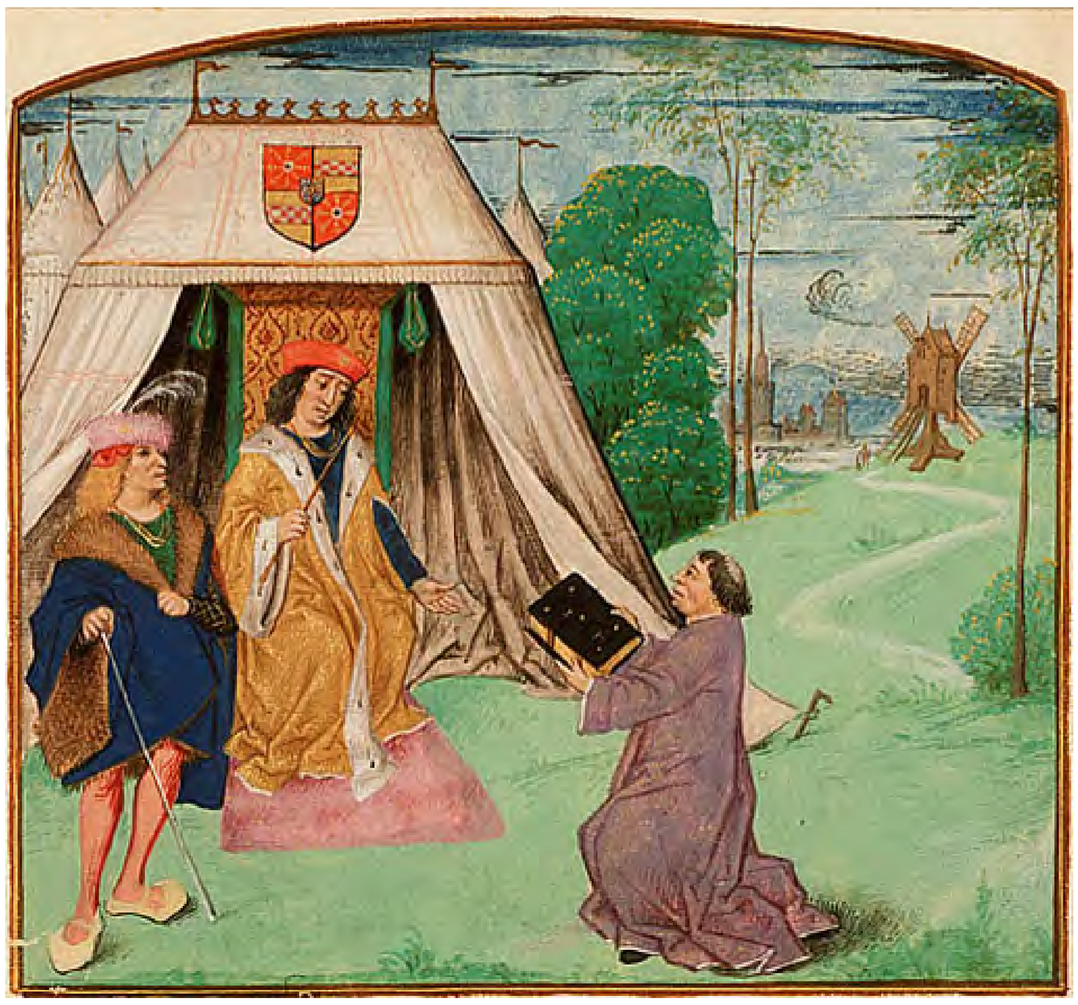
Pour mobiliser le numérique à bon escient, il est donc nécessaire d'analyser les modifications qu'il implique du point de vue de la **création**, mais aussi de celui de la **réception** ; en contexte scolaire, une attention particulière vis-à-vis de ses impacts sur le plan **cognitif** est indispensable pour identifier les plus-values que le numérique, dans sa matérialité, peut apporter à l'enseignement, et plus particulièrement à celui des Lettres, mais également les points de vigilance à avoir dans son utilisation.

Lecture et écritures numériques : quand la matérialité stimule la créativité

Si les premiers **livres au format électronique** remontent au début des années 70 (avec par exemple Project Gutenberg en 1971), il a fallu attendre la fin des années 90 pour qu'apparaissent les premières **liseuses électroniques**, et les années 2000 pour que la lecture au format numérique se démocratise. Au-delà d'une simple évolution des supports, ce sont la **constitution des œuvres** et leur **fonctionnement** qui sont impactés, ce que donnent à voir plusieurs expériences littéraires jouant sur la **combinatoire** et l'**hypertexte** pour créer une navigation non-linéaire à travers les œuvres, sur la **matérialité numérique** et les **contenus multimédia** pour créer une interactivité physique aussi bien que psychologique, ou sur les facultés de **génération** des appareils numériques pour proposer un texte qui s'engendre de lui-même.

L'art de la combinatoire

L'**art de la combinatoire** est illustré dès le XVe siècle par la poésie des Grands Rhétoriqueurs. En 1464, les *Litanies de la Vierge* de **Jean Meschinot**, qui ont pour sous-titre *« Oraison qui peut se dire par huit ou seize vers, tant en rétrogradant que autrement »*, proposent, par un jeu de rimes intérieures, d'extraire jusqu'à 43 008 litanies différentes correctement rimées des 8 vers du poème initial. En 1962, **Marc Saporta** publie le premier



Maître d'Antoine Rolin, *Le grand rhétoriqueur Jean Molinet présentant son ouvrage à Philippe de Clèves*. Domaine public. Wikimedia

roman combinatoire, *Composition n°1*. L'ouvrage est constitué de 150 feuillets non-numérotés, écrits uniquement au recto. Chacun d'eux décrit une scène centrée sur un personnage ; l'ouvrage comporte 149 pages que le lecteur peut lire dans n'importe quel ordre, et une conclusion unique où tous les personnages interviennent. Dans sa préface, l'auteur indique ainsi la marche à suivre :

« Le lecteur est prié de battre ces pages comme un jeu de cartes. De couper, s'il le désire, de la main gauche, comme chez une cartomancienne. L'ordre dans lequel les feuillets sortiront du jeu orientera le destin de X. Car le temps et l'ordre des événements règlent la vie plus que la nature de ces événements. »

Le lecteur peut ainsi construire $5{,}7 \times 10^{262}$ romans différents, ce qui est potentiellement la plus grande quantité de livres jamais écrits par un écrivain. En 1961, **Raymond Queneau** propose une nouvelle œuvre majeure avec *Cent mille milliards de poèmes*, l'ouvrage fondateur de l'**OuLiPo** : le livre est découpé en languettes permettant de choisir chaque ligne d'un sonnet parmi 10 possibilités, dotées chacune de la même scansion et de la même rime. Un sonnet comptant 14 vers, il y a 10^{14}, soit cent mille milliards de poèmes potentiels. Plusieurs versions informatiques de ce poème hypertexte avant la lettre ont été programmées ; les ayants droit de Raymond Queneau se sont cependant opposés à leur diffusion.

L'hypertexte ou l'œuvre-labyrinthe

Dans ce contexte, apparaît l'**hypertexte**. Dès 1965, ce terme désigne un champ de recherche d'orientation littéraire, fonctionnant sur un système de liens permettant une circulation inédite dans l'œuvre. Par l'hypertexte, il devient possible de donner une nouvelle dimension à la combinatoire. À partir des années 90, les Américains s'emparent de cette possibilité pour réaliser des œuvres narratives dans lesquelles il devient possible de réaliser des parcours complexes, poussant très loin la **rupture avec la linéarité du livre papier**. Considéré comme le premier roman hypertexte et mis en place grâce au système de création hypertexte Storyspace, *afternoon, a story* de **Michael Joyce** invite ainsi dès 1990 le lecteur à suivre différents chemins grâce à des liens internes qui ouvrent ou ferment des fragments de texte. L'intrigue, très fluctuante selon trajectoires dans l'œuvre, suit le personnage de Pierre, un homme récemment divorcé qui a été témoin d'un accident de voiture.

Plus complexe, *Victory Garden* de **Stuart Moulthrop** propose en 1991 un hypertexte[113] labyrinthique sur la guerre du Golfe; le texte est découpé en dizaines de nœuds reliés par des liens que le lecteur peut suivre dans différents ordres. Chaque parcours crée une version légèrement différente de l'histoire, ce qui rend la lecture particulièrement « non-linéaire ». L'œuvre montre comment la navigation du lecteur peut devenir une partie intégrante de la signification du texte, avec de nombreux chemins et plusieurs fins possibles.

En 1992, *Quibbling* de **Carolyn Guyer** fait entrer le lecteur dans une narration hypertexte féministe qui donne la parole à un groupe de personnages, quatre couples, sans centre narratif distinct autour duquel les autres voix graviteraient. La perspective masculine est systématiquement rejetée comme trop linéaire pour laisser place à une poétique fragmentaire, à des narrations brèves et aux dimensions sensuelles du langage et du corps.

[113] Une nouvelle édition de cet hypertexte a été proposée en 2022

En 1994, *Lust* de **Mary-Kim Arnold** se compose de courts paragraphes[114] qui s'entrelacent grâce à des liens internes pour former une prose poétique interactive. Chaque lien ouvre une nouvelle « branche » du poème, souvent en modifiant légèrement le ton ou le vocabulaire, pour illustrer la manière dont les représentations numériques du désir peuvent à la fois amplifier et fragmenter l'expérience humaine.

[114] Ce roman est présenté de façon détaillée dans l'article « Distances digitales: combinatoire et oubli dans *Lust* de M.-K. Arnold (1993) » d'Hélène Campaignolle, avril 2007

En 1995, *Patchwork Girl* de **Shelley Jackson** reprend le personnage de la *Patchwork Girl*, compagne de la créature de Frankenstein chez Mary Shelley et propose une narration fragmentée où chaque « patch » est cliquable, créant ainsi une expérience de collage numérique. Cet effet est renforcé par le fait que les cinq sections utilisent chacune une structure différente et sont écrites dans des styles variés.

Créé par **Talan Memmott** en 2002, *Lexia to Perplexia* se présente comme un texte interactif où chaque clic déclenche de nouvelles séquences, mêlant poésie, jeu et réflexion sur la navigation hypertextuelle, tout en accentuant le déroutement du lecteur par le recours aux néologismes. Enfin, *The Dreamlife of Letters* de **Brian Kim Stefans** (2005) est un roman hypertexte où chaque lettre du texte devient un nœud interactif, offrant plusieurs lectures parallèles. L'œuvre explore le terrain entre la poésie concrète classique, la pratique féministe d'avant-garde et l'*ambient poetics*.

La caractéristique commune de ces œuvres est que le sens n'est jamais donné d'emblée : c'est le lecteur qui, par le parcours qu'il trace dans une œuvre par nature labyrinthique, se fait constructeur de ce sens.

Jeux sur la dimension multimédia

À l'hypertexte, se combinent rapidement les images et les fichiers audio, pour créer des œuvres dotées d'une forte dimension multimédia qui parfois reprennent certains aspects du jeu vidéo. En 1992, *La Belle Zohra* de **François Coulon** raconte ainsi l'histoire d'une jeune femme nommée Zohra à travers une série de fragments de texte et d'images accompagnés de musique. Les liens permettent de passer d'une scène à l'autre, un gestionnaire d'incohérences empêchant que certains fragments soient affichés tant que d'autres ne l'ont pas été.

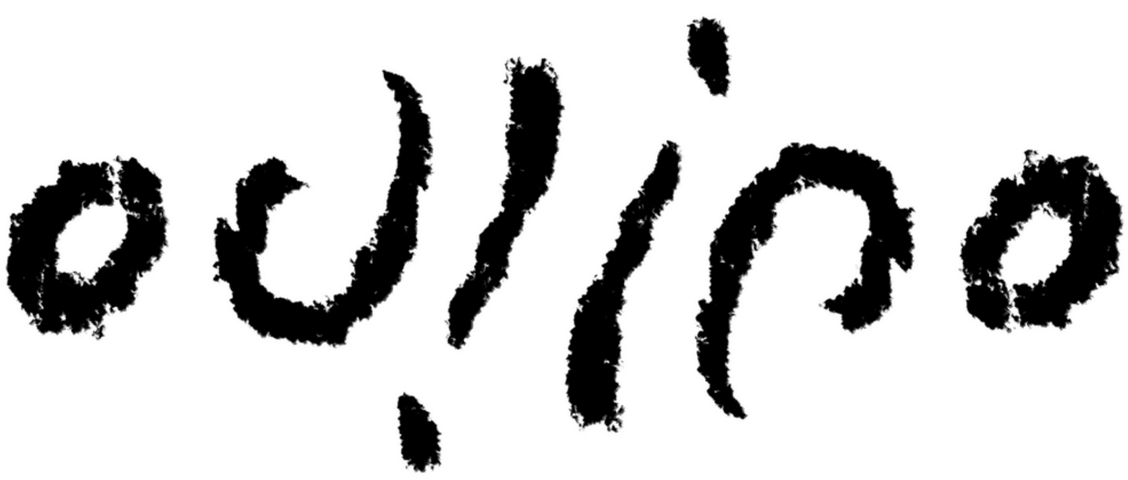
Toujours dans les années 90, **Reiner Strasser** propose, avec *In the white darkness*, une œuvre interactive sur la mémoire, combinant fragments de textes, sons et images pour évoquer l'expérience de patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Elle fait apparaître la fragilité et la fluidité des souvenirs d'un point de vue subjectif. **Gérard Dalmon** va plus loin avec, dans les années 2010, *My Google Body*, qui exploite[115] le moteur de recherche Google pour construire la représentation d'un corps humain. Le logiciel recherche des images associées aux mots clés *arm*, *head*, *leg*, et ainsi de suite, pour créer un corps hybride qui, comme la *Patchwork Girl*, rappelle le monstre de Frankenstein. Cette œuvre crée des effets intéressants grâce à la polysémie des mots, les membres du *Google Body* pouvant être représentés par diverses images qui n'ont parfois que peu à voir avec le corps humain.

[115] Voir l'article de Serge Bouchardon « Digital Manipulability and Digital Literature », 2020

La littérature générative

Un autre courant fondé sur l'exploitation des caractéristiques particulières des outils numériques est celui de la la **littérature générative**. À son origine, on retrouve les écrits à contraintes, poussés vers une approche mathématique et algorithmique de la littérature par l'**OuLiPo** : les expérimentateurs se donnent un certain nombre de règles fixes et

prédéfinies qu'ils utilisent de façon systématique pour produire leurs textes. L'une des plus célèbres est la méthode « S+7 », inventée par **Jean Lescure**, qui consiste à changer tous les substantifs d'un texte donné en prenant dans un dictionnaire le 7e qui le suit.



Par Basile Morin — Travail personnel, ambigramme Oulipo. CC BY-SA 4.0, Wikimedia

Le **Nouveau Roman** développe ce jeu sur les contraintes sans recourir au numérique : qu'il s'agisse de la suppression d'une lettre dans *La Disparition* de **Georges Perec** ou, plus subtilement, du recours à un procédé de grammaire progressive dans *Djinn* d'**Alain Robbe-Grillet**, la contrainte interfère avec l'imaginaire du romancier pour donner naissance au texte. Avec la démocratisation des ordinateurs, ce processus évolue cependant en tirant parti des algorithmes et de la puissance de calcul des appareils.

Dès les années 60, apparaissent les **premiers programmes de génération combinatoire**, à l'origine de nombreuses œuvres : on peut notamment citer *Tape Mark I* (1961) et *Tape Mark II* (1963) du poète italien **Nanni Balestrini**, et, en 1964, *La machine à écrire* de l'informaticien canadien **Jean Baudot**, *« premier recueil de vers libres créés par un ordinateur électronique »*. Jean Baudot qui explique le fonctionnement de son programme en ces termes :

« Lors de cette expérience de rédaction automatique, le processus qu'exécute l'ordinateur peut se décrire en quatre étapes :

1. la machine élabore une structure d'éléments phraséologiques qui respecte les règles de syntaxe ;

2. la machine détermine le genre, le nombre ou le temps de chacun de ces éléments ;

3. la machine choisit des mots dans un lexique, afin de construire la phrase définie par la structure syntactique ;

4. la machine rédige la phrase en respectant les règles de concordance, d'accord, d'élision, etc.

Dans ce processus, les trois premières étapes sont entièrement aléatoires : la machine exécute tous ses choix au hasard (en simulant par des opérations mathématiques les lois du hasard). Ceci s'applique tant au choix des mots dans le lexique qu'à l'existence de certains mots ou éléments dans la phrase, aux genres et nombre de certains éléments, aux temps des verbes, etc.… Il est donc rigoureusement impossible de prévoir les phrases que va rédiger l'ordinateur électronique, lorsqu'il exécute un programme de ce genre. »

Les textes générés par le programme sont réunis dans un recueil ; Jean Baudot considère que c'est ce dernier et non le programme de génération qui constitue l'œuvre. Dès les années 80, l'écrivain et chercheur **Jean-Pierre Balpe** expérimente la génération de texte, par d'abord par algorithmique combinatoire en BASIC, puis par HyperCard[116]. Cet article donne une vue synthétique de son travail. En 1982, deux membres de l'OuLiPo, Paul

[116] Logiciel hypermédia développé par Apple et lancé en août 1987. Créé par Bill Atkinson (co-créateur du Macintosh), il démocratise la création d'applications interactives sans programmation complexe, en passant par l'image intuitive de « piles de cartes » reliées par des hyperliens.

Braffort et **Jacques Roubaud**, créent l'**ALAMO** (Atelier de Littérature Assistée par la Mathématique et les Ordinateurs), qui se fixe pour objectif de développer les relations entre les contraintes littéraires et l'informatique, mais ne produit pas d'œuvre littéraire à proprement parler : il est surtout à l'origine de plusieurs travaux de recherche, notamment sur le rythme (avec par exemple **Pierre Lusson**) et sur la narration automatique (avec **Simone Balazard** et **Mario Borillo**).

Entre 1992 et 1996, l'auteur portugais **Pedro Barbosa** met au point *Sintext*, une œuvre majeure de la génération combinatoire. Il s'agit d'un un logiciel de construction de générateurs combinatoires, un « générateur de générateurs » qui fonctionne selon le principe des phrases à trous. Pour lui, l'œuvre est le logiciel :

« En concevant le logiciel de SINTEXT on a présupposé que tout texte (ou structure de texte) est le résultat d'un projet toujours incomplet. C'est-à-dire que l'auteur, à travers le labyrinthe des infinies possibilités de choix qui lui sont offertes pendant le travail créatif, sait très bien que ses choix ne sont jamais les seuls, ni peut-être les meilleurs. S'il travaille en symbiose avec un ordinateur, la machine peut donc l'aider à exploiter cet immense champ de possibilités, [à] y trouver peut-être des solutions inattendues, et finalement la certitude (relative, bien sûr) d'avoir choisi un meilleur chemin à l'intérieur de ce labyrinthe d'articulations de sens… »

Le lecteur-utilisateur de *Sintext* est invité à créer deux fichiers textes utilisés comme données par le logiciel :

- le premier contenant les phrases à trous et les dictionnaires ;
- le second apportant un ensemble de règles qui décrivent la façon dont le texte généré doit apparaître à l'écran.

Le logiciel est susceptible de simuler tous les générateurs combinatoires qui l'ont précédé et qui utilisent le principe des phrases à trous. Dans la revue *alire 8* l'auteur présente plusieurs de ces simulations, toutes poétiques. Elles sont destinées à être exécutées en temps réel et lues sur écran, les textes générés n'étant pas imprimables, ce qui représente de fait une rupture radicale : l'informatique constitue bien, ici, le médium de l'œuvre.

Cette évolution se poursuit avec les œuvres ultérieures : en 2013, **J. R. Carpenter** crée ainsi, avec *Notes on the Voyage of Owl and Girl*, une œuvre HTML générative qui, elle aussi, ne peut être lue que sur écran. Mais réalisée sur support numérique, la génération de texte n'est pas exempte de *bugs* ; dans *Glitch Poetics* (2022), **Nathan Allen Jones** montre ainsi les écrivains et les artistes contemporains intégrant le *glitch*[117] comme un effet littéraire, à une époque caractérisée par la rupture, la corruption et la crise. En langue française, le roman *Internes* de l'artiste **Grégory Chatonsky**, coécrit avec l'IA, joue lui aussi sur les *glitches* pour déstabiliser le lecteur.

Lecture numérique : une matérialité coûteuse sur le plan cognitif

Si la matérialité numérique peut s'avérer stimulante pour les créateurs et les chercheurs, force est toutefois de constater qu'elle n'en demeure pas moins coûteuse sur le plan cognitif, notamment en contexte d'enseignement. En 2014, **Pascale Gossin**[118] illustre bien ce problème en décrivant un ouvrage numérique destiné aux jeunes enfants, qui se veut foisonnant mais n'en demeure pas moins décevant sur le plan des apports, ce qui l'amène à conclure sur l'idée d'un *« lecteur […] bêtifié, conduit à faire voler ou piailler des oiseaux »*.

[117] En anglais, défaut ou anomalie technique (dus à un problème logiciel ou matériel), qui provoque un comportement inattendu, une corruption ou une interruption du fonctionnement prévu)

[118] Gossin, P. « De la lecture papier à la lecture numérique, le paradoxe où nous entraîne Morris Lessmore ». *Le Français aujourd'hui*, 2014.

L'idée de l'amélioration des compétences de lecture et d'écriture par le passage au format numérique ne constitue-t-elle donc qu'un simple mirage ?

La question des liens hypertextes

Dès 2009, les chercheurs **Franck Amadieu**, **André Tricot** et **Claudette Mariné**[119] soulignent le coût cognitif élevé de la navigation dans les documents hypertextes, en particulier pour de jeunes élèves : il faut notamment être en capacité de prendre des décisions, d'organiser son parcours, de se représenter le document et sa position au sein du document, et d'établir des liens sémantiques dans les informations.

Dans leur article « Chercher de l'information dans un hypertexte : vers un modèle des processus cognitifs »[120], **André Tricot** et **Jean-François Rouet** analysent plus finement les trois phases de la recherche d'information dans les hypertextes : évaluation, sélection, traitement, pilotées par des différents mécanismes de gestion comme la planification, le contrôle et la régulation. Ils concluent sur les **implications ergonomiques** à avoir en tête dans la conception de ce qu'ils nomment les *systèmes hypermédias* :

- aider l'**évaluation** en rendant visibles les ressources disponibles (vue d'ensemble, plans, tables des matières) pour permettre la construction d'un plan réaliste ;
- aider la **sélection** via une catégorisation intelligible (organisation sémantique claire, compromis profondeur/largeur), des intitulés explicites, une iconographie non obscure, des outils de navigation (plan, indices hiérarchiques) ;
- aider le **traitement** par des principes de lisibilité (mise en page, hiérarchie typographique) et des organisateurs typo-dispositionnels interprétables, en évitant les « paginations » séduisantes mais illisibles ;
- soutenir la **gestion** (planification, contrôle, régulation) avec des outils comme historiques de parcours, traceurs, arbres dynamiques, prise de notes intégrée, liens d'annotation permettant de revenir facilement au texte de départ.

Tout en mettant en valeur ce qui doit être amélioré dans les documents hypermédias pour les rendre praticables par tous, ces préconisations soulignent également leur inévitable complexité. Cette dernière peut toutefois agir comme stimulant dans le supérieur ; **Stéphane Simonian** et **Jérôme Éneau**[121] relèvent ainsi, en 2011, le fait que le travail de recherche sur internet favorise le développement de processus métacognitifs tels que la connaissance sur sa connaissance mais aussi la connaissance sur son manque de connaissance. Ils notent également que les inconvénients liés à la navigation dans des environnements réseaux, notamment à la sérendipité, s'amenuisent avec le temps pour les étudiants.

La question des documents composites

Par ailleurs, les **documents composites**, associant texte et image voire, sur support numérique, texte et vidéo, posent également problème. En 2012, une étude de **Tzu-Chien Liu**[122] à Taïwan étudie les performances de trois groupes d'élèves équipés de tablettes, qui doivent étudier une plante :

- le groupe A se voit proposer du texte et des images ;
- le groupe B, du texte et la plante en réel ;
- le groupe C, le texte, les images et la plante en réel.

[119] Franck Amadieu , André Tricot & Claudette Mariné, « Exploratory Study of Relations Between Prior Knowledge, Comprehension, Disorientation and On-Line Processes in Hypertext », *The Ergonomics Open Journal*, 2009.

[120] Jean-François Rouet, André Tricot, « Chercher de l'information dans un hypertexte : vers un modèle des processus cognitifs », *Hypertextes et Hypermédias*, 1998, hors série, pp.57-74

[121] Stéphane Simonian & Jérôme Éneau, « L'usage de l'hypertexte : une dynamique favorisant les processus métacognitifs », 2011.

[122] Tzu-Chien Liu, Yi-Chun Lin, Meng-Jung Tsai & Fred Paas, « Split-attention and redundancy effects on mobile learning in physical environments », *Computers & Education*, Volume 58, Issue 1, January 2012, p.172-180

C’est le groupe C qui fonctionne le moins bien : la redondance entre texte, images et plante en réel provoque une diminution de l’attention des élèves.

De manière générale, les études montrent que la combinaison de trop de médias (texte, images, audio, vidéo voire élément réel) crée une surcharge ; il est notamment déconseillé d’associer lecture audio et texte écrit, les rythmes de lecture et d’écoute différents créant un conflit au sein de la mémoire verbale dans la boucle phonologique. Ce qui fonctionne le mieux reste l’association d’un texte et d’un schéma.

Ces premiers résultats sont approfondis en 2013 par l’étude de **Lucia Mason**[123] sur les mouvements oculaires dans la prise de connaissance d’un document composite. Confrontés en sciences à un document composé d’un texte associé à un schéma, les étudiants mettent spontanément en œuvre trois stratégies, étroitement liées à leurs performances de compréhension :

- ceux présentant un niveau faible se focalisent principalement sur le **texte** ;
- ceux présentant un niveau moyen se concentrent d’abord sur le **texte**, puis regardent l’**image** ;
- ceux qui présentent des performances de compréhension élevées font de nombreux **allers-retours entre le texte et l’image**.

[123] Lucia Mason, Patrik Pluchino, Maria Caterina Tornatora & Nicola Ariasi, « An Eye-Tracking Study of Learning From Science Text With Concrete and Abstract Illustrations ».

Expérimentation reprise par Réseau Canopé dans l’article « L’oculométrie : perspectives pour une meilleure conception des interfaces pour l’apprentissage »

Si l’association du pictural et du verbal fonctionne mieux globalement mieux, elle nécessite donc cependant de s’engager dans un processus d’intégration et de mémorisation. L’apprenant doit être capable de faire les connexions entre l’image et le texte ; à partir de là, il construit un modèle mental, plus abstrait, permettant un apprentissage plus profond et plus pérenne dans le temps.

Les apprenants sont meilleurs à l’arrivée quand ils sont engagés dans l’intégration active des différentes sources d’informations, mais cela n’est possible que pour des lecteurs déjà experts. **Tous les élèves ne sont donc pas égaux face à un document multimodal.**

Biais de la lecture à l’écran

Dans un article de 2021[124], **Thierry Baccino** et **Véronique Drai-Zerbib** attirent enfin l’attention sur deux derniers problèmes liés à la lecture sur écran :

- rétro-éclairé, ce dernier génère souvent un fort contraste qui agresse l’œil, nécessitant davantage de fixations oculaires pour lire le texte, avec une prise d’informations réduite par rapport à la lecture sur papier ;
- si au format papier l’information ne change plus de place une fois fixée, ce qui facilite la mise en place de stratégies de lecture ou de recherche d’éléments, elle devient au contraire très instable sur les supports numériques : mobile, déplaçable et effaçable à l’envi, qu’il s’agisse d’ordinateurs, de *smartphones*, de tablettes ou de même de liseuses, l’information devient alors difficile à retrouver et à vérifier.

[124] Thierry Baccino et Véronique Drai-Zerbib, « Lire sur des documents numériques à l’école : avantages et inconvénients », *Multilinguales*, numéro spécial, décembre 2021

En 2019, **Frédéric Bernard**[125] relève par ailleurs que « la différence de performances de compréhension entre écran et papier s’accroît dans les études les plus récentes par rapport aux plus anciennes » : ce n’est donc pas le manque relatif d’expérience par rapport à la technologie qui explique les meilleures performances sur papier en matière de lecture.

[125] Frédéric Bernard, « Lire sur papier, lire sur écran : en quoi est-ce différent ? », The Conversation, 22 mars 2019

Henri Matisse. *Intérieur à la fillette*. MoMA. Domaine public. Wikimedia

Mettant à son tour ces caractéristiques en avant, **Xavier Aparicio**[126] rappelle les mécanismes de la compréhension de texte et conclut que *« si l'utilisation des outils numériques présente des avantages indéniables, des améliorations ergonomiques semblent nécessaires pour optimiser les supports de lecture et les rendre plus compatibles avec les aptitudes cognitives des lecteurs »*.

[126] Xavier Aparicio & Ugo Ballenghein, « Mémoire, attention : est-il plus difficile de lire sur écran ? », *The Conversation*, 2 mai 2023

Dans le rapport *Pratiques de lecture et maîtrise de la littératie* de novembre 2025, l'IGÉSR, Inspection générale de l'Éducation, du Sport et de la Recherche, relève de son côté un déclin de la lecture à partir de 12 ans, âge du *« premier téléphone portable »*. Dans un cadre scolaire, il s'avère donc *a fortiori* nécessaire de penser et d'organiser en amont le recours au numérique dans le travail des compétences de lecture et d'écriture, en prenant en compte le coût cognitif lié au passage par cet outil, et en conservant à l'esprit le fait que **la matérialité numérique peut faire écran au travail des compétences que l'on veut faire acquérir aux élèves**.

Dans un contexte où *« la lecture sur écran augmente considérablement »*[127], des organismes comme **Réseau Canopé** invitent cependant, tout en pointant ces difficultés, à *« enseigner la littératie numérique »*[128] pour rendre les jeunes aptes à rechercher et à trouver l'information quels que soient les contextes de travail.

[127] France Culture, « Les Français et la lecture : la lecture sur écran augmente considérablement et on ne sait pas encore bien la mesurer ». 2026

[128] Réseau Canopé, « Enseigner la littératie numérique. Pourquoi ? Comment ? », septembre 2024

Ariyana Ahmad & The Bigger Picture. *AI is Everywhere* / https://betterimagesofai.org / https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Lecture numérique : vers une meilleure ergonomie

Pour un meilleur confort de lecture : la liseuse électronique

Avec l'invention de l'**encre électronique** dans les années 2000, on passe des écrans rétro-éclairés et de l'hypertexte, encore très présent de nos jours sur internet, à des formats numériques plus soucieux du confort de l'utilisateur, mimant et augmentant le format papier et favorisant une lecture plus sereine.

Focus : de l’encre électronique à la liseuse

L’encre électronique ou *e-Ink* est une technologie d’affichage imitant le papier imprimé, apparue au tournant des années 1990-2000. Elle révolutionne la lecture numérique. Si les premiers prototypes apparaissent dès les années 70, il faut attendre 2007 pour que cette technologie soit popularisée par le Kindle d’Amazon.

Les apports pour la lecture de l’encre électronique et des liseuses sont nombreux :

- **confort visuel**, avec une réflexion ambiante similaire à celle du papier, sans rétroéclairage donc sans fatigue oculaire ni scintillement, même en plein soleil ;
- **autonomie**, les appareils consommant l’énergie uniquement lors des changements de page ; elle se compte en semaines voire en mois, contre seulement quelques heures pour les écrans LCD ;
- **matérialité hybride** , avec des liseuses se caractérisant par leur légèreté, leur robustesse et leur bistabilité (capacité à conserver l’affichage d’une image fixe sans consommer d’énergie) ; l’utilisation de ces appareils mobilise des gestes proches de ceux qui interviennent dans la lecture au format papier, mais avec des *affordances* [1] tactiles numériques (possibilité de zoom, accès facilité aux notes).

Les **liseuses** présentent donc de réels avantages pour favoriser une **lecture longue**, **sans distraction** puisqu’au contraire des *smartphones*, elles ne proposent pas de notifications.

[1] Les *affordances* sont les propriétés perçues d’un objet, d’un environnement ou d’une interface qui suggèrent intuitivement les actions possibles, rendant l’interaction naturelle et évidente, même sans instructions explicites.

Si elles demeurent encore inégalement répandues dans la société, les liseuses sont généralement appréciées des personnes qui les utilisent à la fois pour leur confort de lecture et leur facilité d’utilisation, mais aussi pour le fait qu’elle permettent d’emporter avec soi des milliers d’ouvrages réunis sur un seul appareil léger.

Les écrans en classe : quelques préconisations simples

Que ce soit sur ordinateur, tablette ou tableau interactif, des études montrent que pour des textes en pleine page (sans *scrolling*, c’est-à-dire sans défilement sur l’écran), il n'y a pas de différence des performances de lecture entre le papier et l'écran. En cas de lecture prolongée avec défilement, le papier demeure supérieur.

En ce qui concerne la disposition des tableaux interactifs dans les salles de classe, le Livre blanc du Laboratoire des Usages en Technologies d'Information Numériques (LUTIN) demeure d’actualité et offre des préconisations en matière d’ergonomie simples à mettre en œuvre mais souvent ignorées, comme l’inclinaison des tableaux interactifs de 5 à 10 degrés pour réduire les reflets, ou l'importance des contrastes et de l'espacement pour une meilleure lisibilité.

Camille Pissarro. *Conversation*. Musée national de l'Art occidenta. Domaine public. Wikimedia

Le numérique pour oraliser les textes

Le **livre audio**, imaginé dans la continuité directe de l'invention du phonographe (Thomas Edison, 1877), qui avait connu un premier boom dès les années 70 avec l'apparition des cassettes, a rencontré un regain d'intérêt au tournant des années 2000 avec l'apparition du format MP3, l'apparition de services de vente en ligne puis la popularisation des baladeurs numériques (premiers iPod en 2001), et enfin du *streaming*.

D'après le baromètre « Les Français et la lecture 2025 » du Centre National du Livre (CNL), le format audio en matière de lecture **progresse plus vite que le simple format numérique**, avec 32 % de lecteurs ayant écouté un livre audio au cours des 12 derniers mois, contre 15 % seulement qui ont lu un livre au format numérique. De leur côté, les **logiciels de lecture à haute voix**, ou **synthétiseurs vocaux**, sont également de plus en plus répandus, notamment sur les *smartphones*.

Le format audio apparaît donc de nos jours comme une alternative à l'écrit de mieux en mieux acceptée ; d'abord très utile pour les personnes mal- ou non-voyantes, il tend à se généraliser et il est actuellement courant de proposer aux élèves, notamment à ceux porteurs de dyslexie, une **oralisation au format numérique** des textes, des livres, des consignes et même des corrections d'évaluations : c'est ce que proposent, à l'heure actuelle, des plateformes en ligne comme mon-oral.net ou Logbook. Dans l'enseignement, l'apport de ce passage par l'oral est unanimement reconnu, pour la compréhension des consignes et textes comme pour la correction ; c'est ce que font ressortir deux scénarios de l'académie de Versailles (indexés dans Édubase) : « Rendre l'évaluation plus explicite et plus lisible avec l'annotation audio » et « Annotations audio avec mon-oral.net ».

Cependant, il convient de distinguer, dans un contexte d'apprentissage, entre allègement provisoire de la charge cognitive, dans lequel on permet à l'élève de passer par une oralisation pour se concentrer sur une tâche précise, et travail des compétences de lecture proprement dites, qui nécessitent malgré tout la confrontation à l'écrit. Le détour par l'oralisation permet de lever provisoirement les difficultés qui lui sont liées pour travailler d'autres compétences, notamment de compréhension ou d'interprétation ; il reste toutefois important de **ménager également, même pour les élèves dyslexiques, des temps de travail sur des supports écrits**, de façon à ce qu'ils gagnent également en efficacité face à ces derniers. Des services comme Lire Couleur ou AccessDoc permettent d'ailleurs de faciliter ce passage à l'écrit en adaptant les documents pour les rendre accessibles. AccessDoc est une plateforme numérique conçue pour rendre accessibles les documents pédagogiques aux élèves en situation de handicap, notamment les non-voyants, malvoyants ou présentant des troubles cognitifs. Ressource pour l'École inclusive (Édu-Up), elle aide les enseignants à adapter leurs contenus grâce à l'intelligence artificielle.

Logo FALC © European Easy-to-Read. Inclusion Europe.

Travailler sur la matérialité numérique en Lettres : quelles pistes ?

Comparer des matérialités de lecture

En prenant appui sur le dossier « La lecture numérique : réalités, enjeux et perspectives » de l'ENSSIB ou sur les travaux de **Serge Bouchardon**, il peut être intéressant de poser aux élèves la question des **modifications apportées à l'expérience de lecture par différents supports**, en leur proposant par exemple un même texte au format papier, au format PDF sur ordinateur ou tablette, et sous forme de page web enrichie par des liens hypertextes et/ou par des illustrations. Il est alors envisageable de leur faire analyser et formuler quels sont les repères, *affordances*, ajouts, gestes et éventuellement distractions qui orientent et ponctuent leur lecture, pour les mener vers un un écrit ou un oral réflexifs sur ce qui, pour eux, facilite ou au contraire entrave la lecture et la compréhension.

Travailler les gestes et la navigation

Dans une perspective d'amélioration de leur littératie numérique, il est également envisageable de confronter les élèves à un support complexe, comme par exemple un site web, de leur faire effectuer un **repérage** des éléments permettant de faciliter leur navigation dans ce document, et de leur faire travailler les **étapes de cette navigation** telles qu'elles sont définies par Tricot et Rouet : évaluation, sélection, traitement, gestion. À l'heure actuelle, l'amélioration de ces compétences est en partie prise en charge par PIX ; il demeure toutefois peu réaliste de déléguer à cette plateforme la totalité du travail des compétences de littératie numérique.

Travailler les gestes et la navigation

Il s'agit sans doute de la perspective la plus investie par les professeurs de Lettres : en témoignent les scénarios « Mise en voix d'un album de littérature de jeunesse par des élèves petits lecteurs » et « De la découverte de LittéraTube à la création de vidéopoèmes » (académie de Créteil), « Cartes postales sonores » (académie de Grenoble) ou, dans le premier degré, le scénario « Création d'un livre de contes numérique » (académie de Mayotte). Dans les expérimentations récentes, c'est cependant généralement la création de documents aux formats audio et vidéo qui est privilégiée, l'intégration à un document multimédia restant souvent peu travaillée. Il pourrait être intéressant de poser aux élèves la question de la **répartition entre document audio ou vidéo, texte et image au sein d'un même document**, pour les amener à se questionner sur le rôle de ces différents éléments, les contraintes qui président à leur organisation et les aider à mieux appréhender le fonctionnement des documents numériques composites.

L'essor du numérique représente un défi important pour l'enseignement des Lettres. Il ne s'agit pas de rejeter ces outils, mais d'analyser lucidement leurs implications et de les intégrer de manière réfléchie dans les pratiques pédagogiques. En prenant en compte le coût cognitif lié à la matérialité numérique, en privilégiant une ergonomie adaptée aux besoins des élèves et en encourageant une réflexion critique sur les supports et les formats, nous pouvons faire du numérique un allié précieux pour développer les compétences littéraires et préparer les jeunes générations à naviguer avec pertinence dans un monde de plus en plus complexe. Il est donc impératif d'investir les parcours de formation des enseignants, de suivre les recherches abordant l'impact du numérique sur les apprentissages et de promouvoir une culture de l'innovation pédagogique responsable.

Le travail de la matérialité, au seuil de la monstruosité

Les propos qui suivent donnent à penser la nécessaire transversalité des questions au sein des disciplines. S'interroger sur le sens de la matérialité c'est mettre en perspective les apports des techniques, des arts et des sciences comme autant de constellations pour l'appréhender. À la différence du matérialisme qui intègre la pensée au sein de la matière, la matérialité interroge la forme dans son rapport à la mise en ordre de la matière, tenant à l'écart toute expression de la subjectivité. Pour le dire autrement nous vivons l'époque de l'intelligence artificielle qui produit ses propres récits à partir de ses propres matériaux. Sortir la matière de son mutisme, lui donner l'expression, tel est l'objectif. Donner l'expression au silence des matériaux lorsqu'ils rencontrent la matière, c'est introduire la forme dans le temps du discontinu. La matérialité serait ce moment de la fusion où matière et matériaux deviennent matériels. C'est le moment où le virtuel se fait réalité, dans un récit de la véracité.

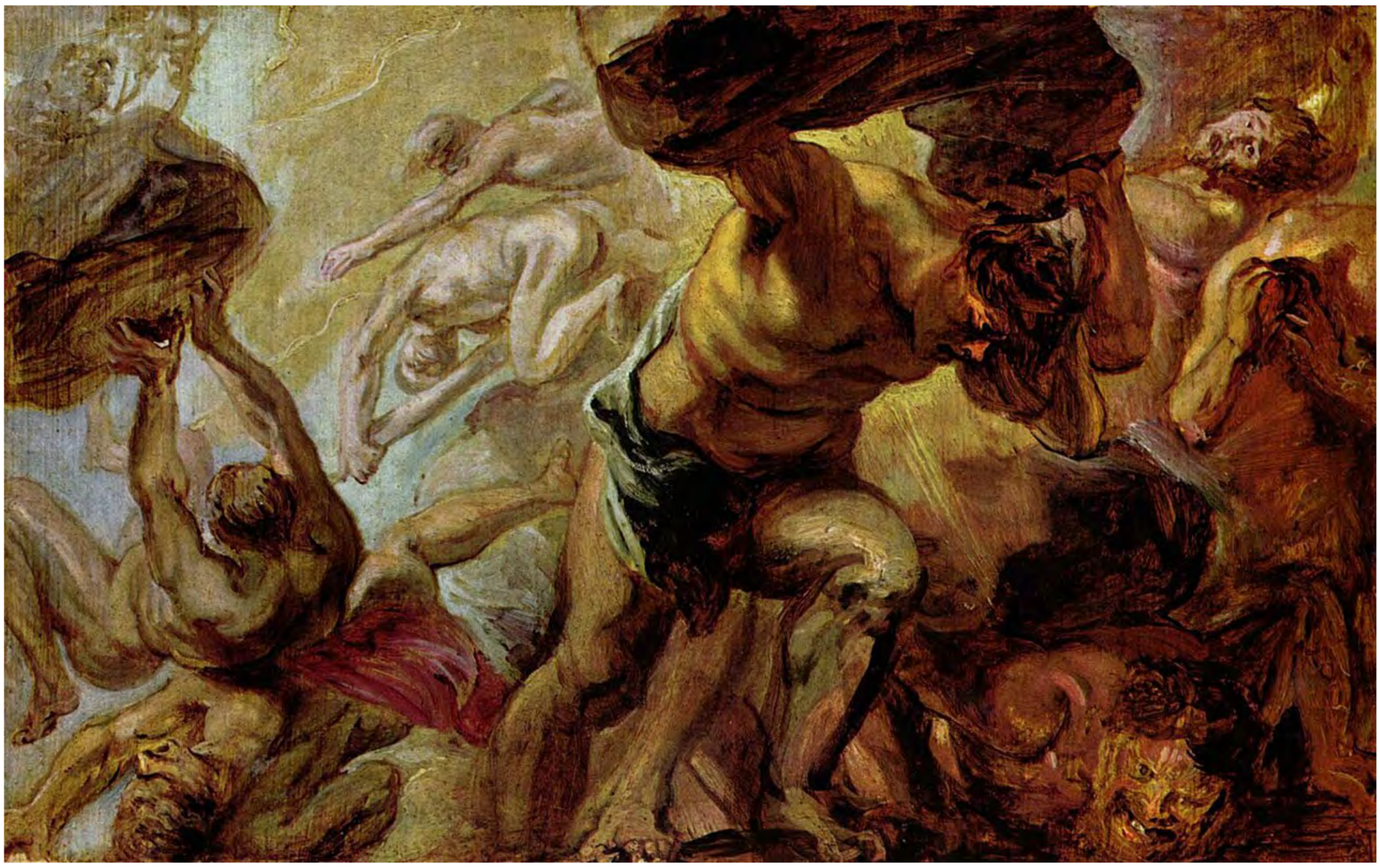
Si la matérialité est un moment dans l'histoire de l'art, nous tenterons de montrer que ce concept, en interrogeant la forme transformatrice, questionne le sens de la relation de cette dernière à la matière et aux matériaux. Pour le matérialisme tout se ramène à la matière ; c'est ce que le début du *Phédon*[129] rappelle en faisant référence aux premiers physiciens. Dans ce passage, Socrate montre que la sensation ne nous apprend rien, du fait de son éparpillement dans la mobilité du réel, aboutissant bien souvent à une généralité. Comment comprendre lorsqu'on se perd aussi dans les mots, comme il l'écrit : « C'est précisément ce que je vois faire à la plupart des hommes, qui, tâtonnant comme dans les ténèbres, se servent d'un mot impropre pour désigner cela comme la cause. Voilà pourquoi l'un, enveloppant la terre d'un tourbillon, la fait maintenir en place par le ciel, et qu'un autre la conçoit comme une large huche, à laquelle il donne l'air comme support. » Allons plus loin : ce que l'on ne connaît pas, on le ramène au connu, principe de l'analogie capable d'établir des liens de causalité continus. La mise en œuvre de l'intelligence est fondamentalement un dispositif relationnel : demandons-nous en quoi consiste cette relation de l'intelligence à la matière. Cette relation est-elle ordonnée, organisée ou en demeure-t-elle au hasard et à la contingence ?

[129] Source du texte du Phédon. Télécharger le manuel ou le fichier ZIP sous réserve des droits de propriété intellectuelle de tiers. Les contenus de ce site sont proposés dans le cadre du droit français sous licence CC BY-NC-SA 4.0

Passer du poète **Hésiode** au philosophe **Aristote**, croiser **Socrate** dans le *Phédon*, c'est comprendre le sens, ou du moins s'y efforcer. Si la matière n'explique rien, la cause formelle cherche à faire sens et donne à voir plus qu'un assemblage. On ne sort cependant pas de la composition-juxtaposition des parties de l'œuvre, qui participent du meilleur sans parvenir à expliquer ce principe. Et on se trouve fort embarrassé lorsqu'on doit expliquer les « erreurs de la nature ». Derrière la causalité n'est-ce pas notre récit du monde qui se cache ? Ou qui se montre ?

Cette notion d'erreur nous renvoie à la notion de monstre. Les Titans monstrueux d'Hésiode ne sont-ils pas l'expression de ce monstrueux qui échappe à la règle ? Et que l'on tient à l'écart pour peut-être en faire à nouveau usage ? **Georges Canguilhem** dans *La Connaissance et la vie* écrivait : « Quand la monstruosité est devenue un concept biologique, quand les monstruosités sont réparties en classes selon des rapports constants, quand on se flatte de les pouvoir provoquer expérimentalement, alors le « monstre » est naturalisé, l'irrégulier est rendu à la règle, le prodige à la prévision. Il paraît alors aller de soi que l'esprit scientifique trouve monstrueux que l'homme ait pu croire autrefois à tant d'animaux monstrueux. À l'âge des fables, la monstruosité dénonçait le pouvoir monstrueux de

l'imagination. » La question qui se pose alors est celle de l'héritier d'un monstrueux qui n'en finit pas de réapparaître, la science cherchant à faire taire « le cri » de l'énigme.



Pierre-Paul Rubens, *La chute des Titans*, Musées royaux des beaux-arts. Domaine public. Wikimedia

Pour Aristote la matière femelle est matière qui attend de la forme sa détermination. Par ses observations, il donne à voir et fait de ses nombreux exemples des images porteuses de sens. **Pierre Pellegrin**, dans son introduction aux *Parties des animaux,* écrit à ce propos : « La nature selon l'essence doit montrer de l'ingéniosité pour imposer ses vues en rusant avec ces données matérielles qu'elle ne peut ignorer » (GF p.55). Ces données matérielles, c'est la non-coïncidence des projets de la nature avec la réalité. Une autre façon de dire l'impuissance de la forme sur la matière… Ou à l'inverse l'« ingéniosité » de la nature, réintroduisant une finalité ailleurs que là où on l'attend… C'est ainsi que des *Parties des animaux* et *La génération des animaux* sont bien plus qu'un recueil d'anecdotes. Il ne s'agit pas de figer une opposition entre la cause matérielle et la cause finale, ou encore la cause formelle. Au lieu de figer le rapport de la forme et de la matière, corriger la forme par la matière, ce que Léonard de Vinci entreprend dans son œuvre. À ce processus on donnera le nom de « matérialité » qui porte en lui la disparition du sujet.

Si Aristote consacre tant de pages à ces vivants, c'est pour montrer que la substance – l'être – ne recoupe pas le réel : « la nature a souvent l'intention d'agir ainsi » et elle n'y parvient pas. Parce que la nature ne peut ramener à l'unité, à l'unique, ses divers phénomènes. Le discours de la science aristotélicien classe selon une fin, la meilleure possible, les actions de la cause finale, dont la plus problématique est celle qui consiste à laisser se confondre la matière et la forme au moment de la génération. Version inversée de la *Théogonie* d'Hésiode où Ouranos et Gaïa ne font qu'un jusqu'à l'acte castrateur de Chronos. Cette fusion s'achève dans la séparation. Le souci d'Aristote est de faire comprendre par l'observation des animaux, une question qui naît dans sa *Physique*. Si en effet, le souci du meilleur est au cœur de la finalité (« la nature ne fait rien en vain ») pourquoi y-a-t-il des échecs au sein d'une matière incontrôlable (Aristote Livre 1 *Physique*) ? Séparer pour mieux comprendre. Telle est la fin poursuivie par Aristote lorsqu'il distingue la forme et la matière.

Dans un cours de 1984, **Gilles Deleuze** déploie une image : celle du cri d'Aristote ; qui dit

« il faut bien s’arrêter » . Inutile d’aller plus loin pour construire le concept. Une variété de cris pour arrêter le questionnement et l’enfermement dans la définition et la continuité ; le cri est appel au discontinu. La matérialité ne se limite pas à une conception esthétique ou à un moment de l'art, mais appartient depuis le commencement à ce « caché », pour citer Deleuze, ce caché qu'évoque aussi le titre de l'ouvrage de **Daniel Arasse**, *On n'y voit rien*, ce caché fondateur d'un rapport au monde qui est énigmatique. Le défaut, le manque, l’absence, sont autant de termes associés à la rencontre avec la matière. Mais parce qu’elle est mouvement, la matière ne se laisse pas aisément enfermer dans la forme, à l'exemple de cet escargot fugueur du tableau de **Francesco del Cossa** dont l'historien propose une remarquable lecture dans *On n'y voit rien*. L'escargot ne serait-il pas cette image mouvante, l'imprévisible ? Ce qui ouvre sur l'inachevé ?

Francesco del Cossa. *L'annonciation*. Collections nationales de Dresde. Domaine public. Wikimedia

Dès lors on comprendra que la matérialité est une alternative en réponse à la théorie des quatre causes. Plus largement la fenêtre, dans les œuvres de la Renaissance, est ouverture sur la perspective et intégrée dans l'œuvre. Ne serait-ce pas la tentation de sortir de la problématique du sujet ? La technique de **Léonard de Vinci** intervient sur le réel et cherche ce qu'on nommera « véracité », une approche du vrai.

Dans le mythe d’Hésiode, le chaos est cette matière qui n’est pas entièrement réductible à la matière. Dérivé du grec hylè (ὕλη) puis du latin *mater* (cœur d’un tronc d’arbre, origine mère des choses), la matière désigne la substance dont sont faits les corps perçus par les sens et dont les caractéristiques essentielles sont l’étendue et la masse. Les présocratiques ont tendance à identifier matière et nature, et les atomistes de l’Antiquité en font – avec le vide – l’un des deux principes explicatifs de l’univers. Simple réceptacle, nommé khora (χώρα), pour Platon, elle est pour Aristote ce qui est déterminé par une forme, chaque réalité individuelle résultant de l’association d’une forme et d’une matière, ce qu’on appelle : l’hylémorphisme.

Que nous faut-il comprendre de cette matière gouvernée par le hasard et la contingence, et cette forme qui introduit de la nécessité et de la détermination dans cette même matière, non pas pour se la soumettre mais pour actualiser ce qui au départ est virtuel en elle : la liberté ? La question est de comprendre cette forme créatrice à l’œuvre qui naît de la matière, non pas comme ce qui appartient au possible, dans une actualisation de ce qui serait déjà programmé (position de **Lamarck**) mais dans un élan créatif du radicalement neuf (théorie de l’évolution), à l'aide de ce que **Bergson** nommera « l'élan vital ». Un récit sans chose ni sujet. On retourne à la fusion générative de *La génération des animaux* d'Aristote citée plus haut. Ni transformisme, ni mimétisme, tandis que le réel est à l’image et à la ressemblance du possible qu’il réalise sur la ligne du temps, l’actuel au contraire ne ressemble pas à ce qu’il incarne. L’actuel est mouvement de l’inachevé ou, pour citer l’ouvrage que Gilles Deleuze consacre à Bergson, « la vie comme mouvement s’aliène dans

la forme matérielle qu'elle suscite [...] toute espèce est donc un arrêt de mouvement ».

Représentation du Chaos. Basilique papale de Sainte Marie Majeure.
Le correcteur automatique, CC BY-SA 4.0. Wikimedia

Ainsi la matérialité est ce qui s'oppose aussi au donné phénoménologique. La montagne Sainte Victoire est peinte par Cézanne dans une succession de moments et d'espaces que décrit le texte phénoménologique de Merleau-Ponty : *Le doute de Cézanne*. Ce texte sur

Paul Cézanne. *La Montagne Sainte-Victoire vue des Lauves.* Musée des Beaux-Arts de Philadelphie. CC BY 3.0. Wikimedia

Cézanne défait la représentation. Il reprend la démarche du doute cartésien mais pour s'en affranchir. On peut aller jusqu'à dire qu'il défait la révolution copernicienne. Le peintre habite par ses couleurs un monde qui est mise en relation mais pas représentation ; mais

cette représentation conserve la conscience et ne remet pas en question la vision. La matérialité en se débarrassant du sujet, oublie l'éthique. Il y a des notions qui, en se déplaçant, deviennent dangereuses pour une humanité qui perd ainsi son statut de sujet. Il faut changer de point de vue, sortir de l'illusion du donné et de la continuité. Laisser travailler l'œuvre dans ses mises en relation des matériaux appartenant à d'autres lieux et d'autres temps que le sien. La matière se donne dans la confusion d'un espace dépourvu de forme, mais qui, en se faisant réceptacle, accueille l'informe. Difficulté à laquelle se heurta le *Timée* de Platon, en tant qu'ouvrage de physique, à moins qu'on ne voie dans le récit cosmologique un ordonnancement de ce chaos primitif. Une autre façon de voir le monde. Pas de sujet du *cogito*, pas d'objet jeté devant soi, pas de conscience. Des troubles psychiatriques qui perdent l'attache au sujet. Le cri de Munch. Fusion-confusion : nouveau monstrueux qu'interroge Aristote au *Livre III de la Génération des animaux.*

¶ La question de la matérialité du numérique en DGEMC[130]

[130] éduscol : Droit et grands enjeux du monde contemporain

Le droit distingue entre deux catégories de biens : les biens corporels (ou matériels, qui ont une existence physique, qui sont tangibles) et les biens incorporels (ou immatériels). Si les supports où sont stockées les données numériques sont matériels, les données sont quant à elles des biens incorporels. Cette seconde contribution pour la philosophie examine tout d'abord la question de savoir si la qualification de vol peut être retenue en cas d'extraction frauduleuse de données sans qu'il y ait soustraction d'un support matériel. L'intervention du législateur en 2014 a mis fin aux débats et à une insécurité juridique mais le développement des Intelligences artificielles génératives fait surgir de nouvelles questions relatives à un usage litigieux de données. La question de la matérialité du numérique est ensuite appréhendée sous l'angle de ses effets sur l'environnement et les conditions de travail. Les nouvelles technologies numériques nécessitent en effet des infrastructures matérielles qui engendrent des risques environnementaux et transforment les conditions de travail. Une régulation est donc nécessaire, même si elle reste encore insuffisante, surtout dans les pays dans lesquels des tâches sont externalisées.

Peut-on qualifier de vol le fait de s'approprier frauduleusement des données ?

L'article 311-1 du code pénal dispose que « Le vol est la soustraction frauduleuse de la chose d'autrui. ». Appliquée au données informatiques qui sont des biens incorporels, immatériels, la qualification de vol pose deux problèmes.

Premièrement se pose la question de savoir si « la chose » soustraite à autrui doit être nécessairement corporelle. Pendant longtemps, la jurisprudence ne retenait la qualification de vol que s'il y avait soustraction du support matériel contenant les données (par exemple, le vol d'une disquette). Avec le développement de nouvelles technologies, il est devenu possible de s'approprier frauduleusement des données sans voler un support matériel. La qualification de vol peut-elle alors s'appliquer aux seules données numériques ? Peuvent-elles, en l'absence de tout support matériel faire l'objet d'une « soustraction », au sens de l'article 311-1 du Code pénal ?

Deuxièmement, lorsque des données sont modifiées, reproduites, partagées frauduleusement, il n'y a pas à proprement parler de « soustraction », qui suppose, dans la conception traditionnelle, une dépossession, c'est à dire que la chose passe de la possession du légitime détenteur à celle de l'auteur de l'infraction. Le propriétaire des données téléchargées à son insu et contre son gré n'est pas privé de leur possession car il peut encore en disposer. Ce qui serait soustrait serait alors seulement l'exclusivité de la maitrise d'une information. Certes, les données numériques doivent être protégées, mais

un usage abusif de la qualification de vol peut conduire à une grande insécurité juridique. Si s'approprier une information peut être qualifié de vol, faudrait-il alors dire que celui qui se cache pour écouter une conversation commet un vol ?

Par un arrêt rendu le 20 mai 2015, la chambre criminelle de la Cour de Cassation a rejeté le pourvoi du blogueur Olivier Laurelli, alias « Bluetouff », qui avait été condamné par la Cour d'appel de Paris à 3 000 € d'amende pour maintien frauduleux dans un système de traitement automatisé de données (STAD) et pour vol. La cour de cassation a employé l'expression « a soustrait des données », alors qu'en l'espèce, le blogueur avait téléchargé ces données sans déposséder leur propriétaire d'un support matériel. Cet arrêt vient marquer une rupture avec la jurisprudence précédente qui ne retenait pas la qualification de vol d'un bien incorporel en l'absence de soustraction d'un support matériel. Dans son commentaire de l'arrêt du 20 mai 2015, Matsopoulou Haritini[131], souligne que la Cour de cassation a soumis « la répression du vol d'informations à une condition supplémentaire, à savoir l'utilisation desdites informations », ce qui est selon lui très critiquable : « Selon les hauts magistrats, la seule soustraction, réalisée ici par le téléchargement des données, ne suffit pas à constituer le délit ; il faut, en plus, que l'agent ait utilisé ces données. Ce faisant, la Cour de cassation s'est montrée peu respectueuse de la règle de l'interprétation stricte de la loi pénale, en limitant de manière arbitraire le champ d'application de l'article 311-1 du code pénal, dès lors qu'il s'agit de biens incorporels »[132]. Le vol est « la soustraction frauduleuse de la chose d'autrui », que l'auteur en fasse ou non usage n'a pas à être pris en compte. La portée de cet arrêt est d'autant plus limitée que la loi du 13 novembre 2014 a introduit dans le code pénal l'article 323-3, qui dispose que « Le fait d'introduire frauduleusement des données dans un système de traitement automatisé, d'extraire, de détenir, de reproduire, de transmettre, de supprimer ou de modifier frauduleusement les données qu'il contient est puni de cinq ans d'emprisonnement et de 150 000 € d'amende ». Les juges n'avaient pu fonder leur décision sur le texte de 2014, car les faits avaient été commis avant sa promulgation.

Nitot, *Palais de justice de Paris*. CC BY-SA 3.0, Wikimedia

[131] Matsopoulou, H. (2015). « Infractions contre les biens ». *Revue de science criminelle et de droit pénal comparé*, 4(4), 857-869.

[132] Matsopoulou, H. (2015).

Pour tous les faits commis après l'entrée en vigueur de la loi du 13 novembre 2014 concernant l'introduction, l'extraction, le partage, l'utilisation, la modification, la suppression frauduleuse de données, ce n'est pas la qualification de vol qui est retenue : les données numériques sont d'un point de vue juridique des biens incorporels et non des choses qui peuvent être soustraites à autrui, ce qui a mis un terme à une grande insécurité juridique. Avec le développement des IA se posent de nombreux problèmes d'usages litigieux de données, mais les termes juridiques employés ne sont pas « vol », car rien de matériel n'est soustrait mais « appropriation non autorisée de données » , « collecte illicite de contenus protégés », « reproduction non autorisée », « violation de droits d'auteur », etc. Plusieurs entreprises ou systèmes d'intelligence artificielle ont été poursuivis pour extraction frauduleuse ou collecte illicite de contenus protégés dans le cadre de l'entraînement de leurs modèles. La société Anthropic, attaquée en justice en 2025 pour avoir téléchargé des œuvres à partir de sites pirates, afin d'alimenter ses modèles d'IA, a choisi la voie d'un accord amiable et a accepté de verser au moins 1,5 milliard de dollars (environ 1,28 milliard d'euros) à un fonds d'indemnisation d'auteurs, ayants droit et éditeurs[133]. Meta reconnaît avoir téléchargé, via des réseaux de type *torrent* ou *shadow*

[133] Le Monde, 6 septembre 2025

libraries, des ouvrages protégés pour alimenter ses IA. De nombreuses plaintes pour violation de droits d'auteurs ont été déposées. Après avoir assigné OpenAI et Microsoft devant le tribunal fédéral de Manhattan en décembre 2023, le New York Times a intenté une action en justice le 5 décembre 2025 contre Perplexity AI, alléguant l'utilisation abusive sans autorisation de millions d'articles du NYT. En Allemagne, Open AI a été condamnée le 11 novembre 2025 par le Tribunal fédéral de Munich[134].

[134] Pressemitteilung vom 11.11.2025 : *Urteil GEMA gegen Open AI*

Deux décisions sont particulièrement attendues. La première sera rendue par le Tribunal judiciaire de Paris : en mars 2025, les organisations représentatives des éditeurs et des auteurs français ont porté plainte contre Meta. Elles l'accusent d'avoir utilisé, sans autorisation, des œuvres protégées (livres notamment) pour entraîner son IA générative Llama et exigent le retrait complet des répertoires de données illégalement constitués et utilisés. La seconde sera rendue par la Cour de Justice de l'Union européenne (CJUE) à laquelle la cour de Budapest (Budapest Környéki Törvényszék) a adressé le 3 avril 2025 des questions préjudicielles à l'occasion de l'affaire C-250/25 Like Company/Google Ireland Limited. Il est demandé à la CJUE de se prononcer sur les questions suivantes : le fait pour un moteur d'IA de reprendre un extrait protégé dans sa réponse constitue-t-il une communication au public au sens de la directive 2019/790 ; l'utilisation de contenus protégés dans la phase d'apprentissage des modèles est-elle assimilable à une reproduction non autorisée ? qui porte la responsabilité lorsqu'un utilisateur fournit un texte protégé dans sa requête et que le système le restitue en tout ou partie ?

Un enjeu pour le droit de l'environnement

Le numérique repose sur des infrastructures matérielles qui entraînent des conséquences sur l'environnement. L'extraction des métaux rares nécessaires aux équipements accélère la déforestation, et provoque une pollution des sols et de l'eau. La fabrication des appareils est extrêmement énergivore, nécessite une très forte consommation d'eau et émet une grande quantité de CO_2 tout en générant des déchets industriels. Avec le développement de l'IA, du *cloud* ou du *streaming*, les centres de données, réseaux et terminaux ont besoin pour fonctionner d'une énergie croissante et leurs dispositifs de refroidissement sont très polluants. Par ailleurs, la prolifération des terminaux entraîne une explosion des déchets électroniques, souvent mal recyclés et exportés illégalement, contaminant sols, air et nappes phréatiques. Les réseaux et câbles sous-marins perturbent les milieux naturels et contribuent à l'artificialisation des sols. Une régulation par le droit était donc nécessaire.

Le droit pose un cadre pour chaque étape du cycle de vie des équipements. Cette régulation s'opère principalement au moyen de directives et règlements européens. La fabrication et la production des équipements électroniques sont régulées par la directive RoHS, qui limite l'usage de substances dangereuses et le règlement REACH (*Registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals*), qui contrôle les produits chimiques utilisés dans les composants. La directive DEEE impose aux producteurs la responsabilité de la collecte et du recyclage des déchets électroniques afin de réduire leur impact écologique. Le droit encourage aussi la durabilité des équipements : la France a introduit un indice de réparabilité, lutte contre l'obsolescence programmée et encadre la disponibilité des pièces détachées. L'empreinte énergétique des infrastructures (data centers, réseaux) est régulée par des obligations de bilan carbone, d'écoconception et d'efficacité énergétique, inscrites dans le Code de l'énergie, la loi « Climat et Résilience » et des normes européennes. Les grandes entreprises du numérique doivent aussi respecter le devoir de vigilance et, à l'échelle européenne, la CSRD (*Corporate Sustainability*

Reporting Directive), qui impose un *reporting* environnemental renforcé. La Loi REEN (réduction de l'empreinte environnementale du numérique) adoptée en novembre 2021, marque également un tournant en matière de numérique responsable. Les trois premiers articles du chapitre premier intitulé « Faire prendre conscience aux utilisateurs de l'impact environnemental du numérique (Articles 1 à 4) » inscrivent cette action de sensibilisation dans le *Code de l'éducation*. Enfin, on trouve dans l' IA Act, par exemple l'Article 1, des considérations environnementales[135].

Un enjeu pour le droit du travail

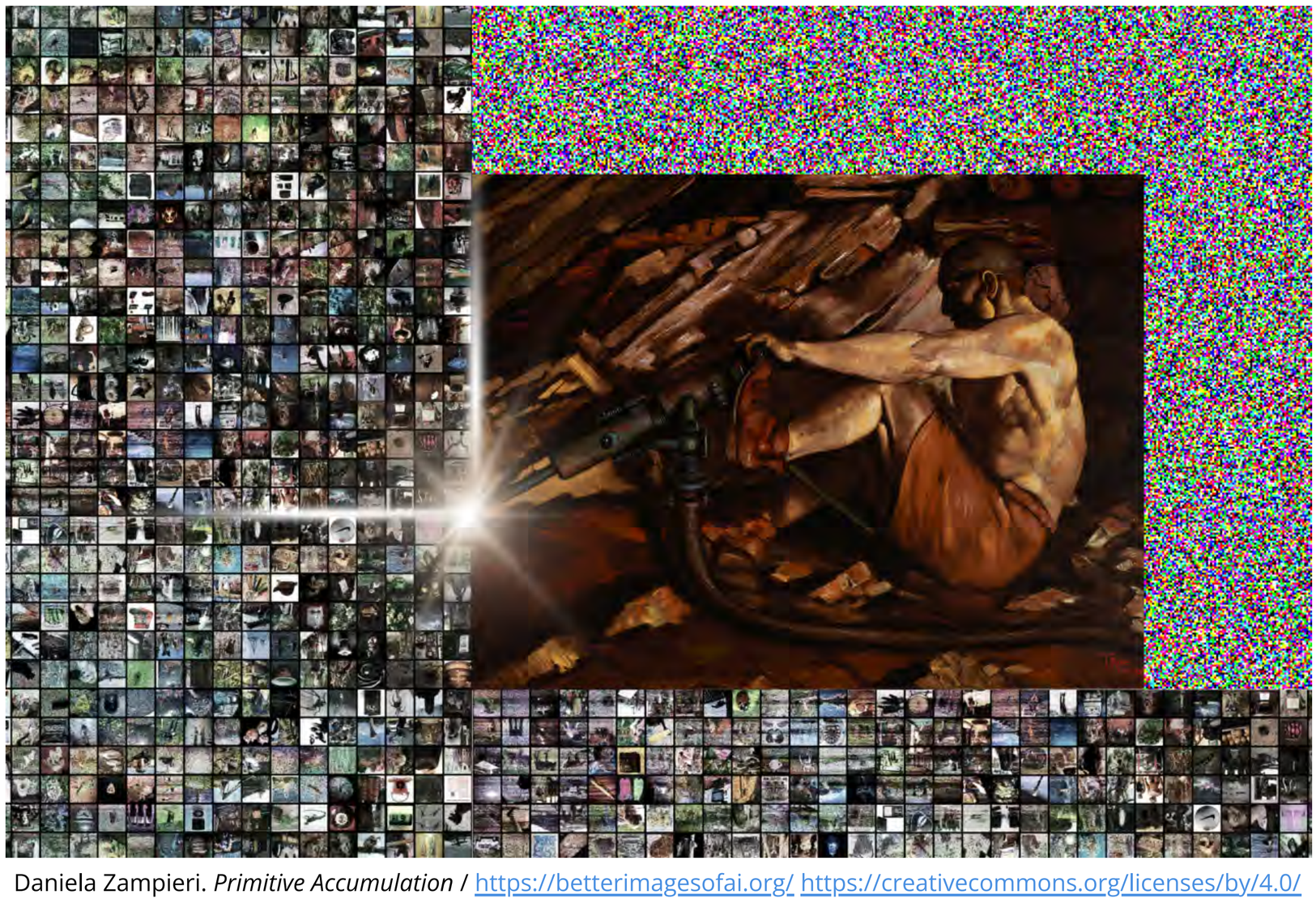
L'usage massif d'ordinateurs, *smartphones* et terminaux connectés introduit de nouveaux risques et de nouvelles formes d'organisation du travail. Il peut générer des troubles musculosquelettiques, de la fatigue visuelle et des risques psychosociaux que l'employeur doit prévenir dans son évaluation des risques. Les infrastructures physiques du numérique, comme les data centers et entrepôts logistiques, exposent par ailleurs les salariés à des contraintes thermiques, électriques ou de manutention qui nécessitent des mesures de sécurité renforcées. L'intensification du travail et l'hyper-connexion provoquée par la multiplication des outils numériques a justifié la mise en place d'un droit à la déconnexion et l'encadrement du télétravail. Par ailleurs, l'utilisation de capteurs, objets connectés et dispositifs de géolocalisation renforce la surveillance des salariés, ce qui impose un contrôle strict de proportionnalité et l'information du personnel. Enfin, le développement du travail de plateforme et des infrastructures logistiques qui lui sont associées - dispositifs matériels qui permettent à une plateforme numérique de fonctionner dans le monde physique, en transformant le travail en tâches traçables, mesurables et souvent intensives - a pour conséquence des conditions de travail souvent pénibles, et nécessite un encadrement par le droit. Ainsi, la matérialité du numérique oblige le droit à intervenir pour prévenir, protéger et réguler.

Si le droit interne et européen met en place des mesures pour réguler les nouvelles conditions de travail générées par la multiplication d'outils numériques, il n'en va pas de même dans les pays où sont extraits les métaux nécessaires aux *smartphones* et autres équipements numériques. Les composants électroniques (cobalt, lithium, coltan, nickel…) sont souvent extraits dans des conditions extrêmement précaires, notamment en Afrique centrale, en Amérique latine ou en Asie : les travailleurs sont exposés sans protection adéquate à des risques chimiques, physiques et sanitaires (effondrements, poussières toxiques, métaux lourds).

Coordenação-Geral de Observação da Terra/INPE, CC BY-SA 2.0. *Mine de Mutanda*. Wikimedia

[135] Voir aussi *référentiel général pour l'IA frugale* et l'article rédigé par David Latouche (DRANE Versailles) : *Quel est l'impact environnemental d'une IA générative ?*

Les rémunérations sont très faibles et ne permettent pas de conditions de vie décentes. En violation des conventions internationales sur le travail des mineurs, des enfants sont exploités pour cette extraction. L'ampleur de ces pratiques souligne la nécessité de réglementations et de mécanismes de contrôle plus stricts pour protéger les travailleurs du domaine de la chaîne d'approvisionnement numérique. Le droit international existe, mais il est très insuffisamment respecté. Par ailleurs, le contrôle s'avère difficile à mettre en œuvre, car les grandes entreprises technologiques achètent les matières premières via plusieurs intermédiaires, ce qui rend difficiles la traçabilité et l'identification des responsables de la violation du droit international.

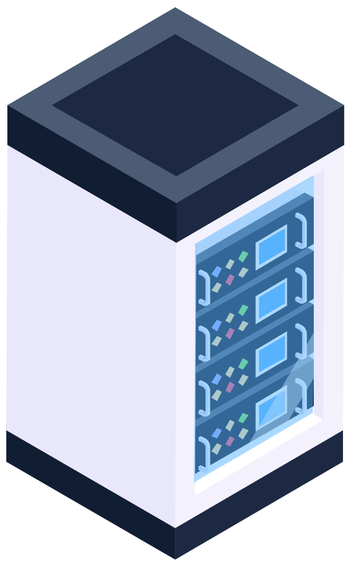


Daniela Zampieri. *Primitive Accumulation* / https://betterimagesofai.org/ https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La matérialité du numérique et les effets qu'elle a sur les conditions de travail, surtout dans les pays où le droit international est peu respecté peut être analysée à travers une grille de lecture proche de celle de Marx, car elle révèle des dynamiques de production, d'exploitation et d'aliénation. En ce sens, réfléchir sur la matérialité du numérique revient à dénoncer une nouvelle forme de capitalisme mondialisé où la valeur est produite par des travailleurs précaires et dispersés dans le monde, tout en étant concentrée et appropriée par une minorité d'entreprises, reproduisant ainsi les logiques fondamentales décrites par Marx sur l'exploitation, l'aliénation et la circulation du capital. Elle met ainsi en lumière la persistance des rapports d'exploitation et d'inégalités.

Matérialités et impact environnemental

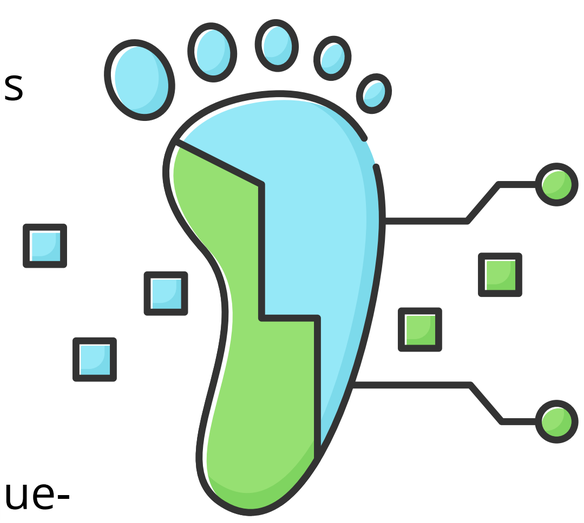
Internet imprègne l'ensemble de notre quotidienneté, assurant une connectivité continue et omniprésente. Plus qu'un moyen, l'accès en ligne devient un besoin, variable selon l'âge et le contexte socio-économique, la plupart des jeunes vivant le portable à la main pour consulter en temps réel leur(s) messagerie(s) instantanée(s) et autres outils de réseautage social. L'hyperconnexion et la surconnexion ne doivent pas pour autant masquer la nécessité de mesurer les conséquences des usages : l'impact de l'extraction des matériaux pour fabriquer les objets numériques connectés, l'incidence écologique de la consommation énergétique des centres de données, des serveurs, etc.



L'esprit des usagers est davantage tourné vers la performance, l'innovation, finalement vers le moyen le plus rapide et le plus efficace pour avoir accès à l'information, à la solution, ou encore à la communication. L'essor fulgurant de l'IA notamment générative propulse encore davantage d'usages non éclairés et non raisonnés quant aux coûts énergétiques et environnementaux des algorithmes et des modèles d'apprentissage automatique sur lesquels elle repose.

Les études montrent en effet que, sans action pour limiter la croissance de l'impact environnemental du numérique, son empreinte carbone pourrait tripler entre 2020 et 2050 (Étude ADEME – Arcep sur l'empreinte environnementale du numérique en 2020, 2030 et 2050 consacrée à une évaluation prospective de l'impact du numérique en France, à l'horizon 2030 et 2050). Cette prédiction alarmante renforce l'importance éducative et pédagogique de faire « conscientiser », en particulier chez les plus jeunes, les incidences réelles sur le dérèglement climatique des usages liés au numérique.

C'est dans cet esprit que la ressource *Comment calculer mon empreinte carbone numérique ?* – ancrée dans les programmes d'enseignement scientifique de terminale dans la discipline physique-chimie – propose de réaliser un simulateur d'empreinte carbone et de l'appliquer notamment aux usages quotidiens d'appareils numériques, aux envois de courriels et plus largement aux diverses pérégrinations sur les réseaux. À l'issue de l'activité, les élèves doivent trouver et exprimer des moyens viables de réduire l'empreinte environnementale des technologies numériques. Ainsi sensibilisés, ils peuvent mettre à profit leurs connaissances et tendre vers des usages plus raisonnés et plus raisonnables du numérique. C'est l'une des finalités de l'enseignement de physique-chimie dans le secondaire : conduire les élèves à exercer une citoyenneté responsable.



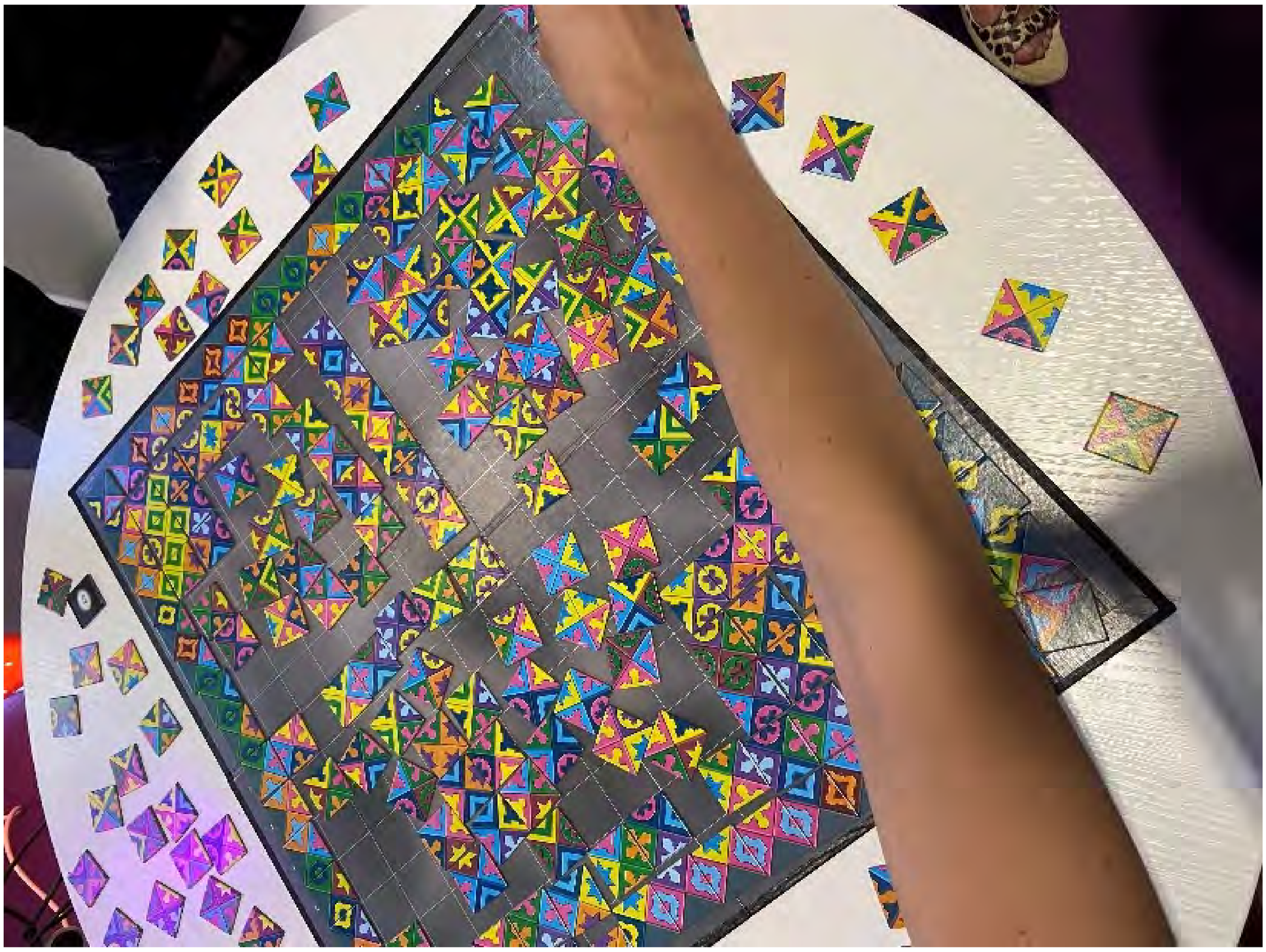
N.B : voir également en **Langues vivantes** (espagnol) ce scénario autour de de l'empreinte carbone des systèmes d'IA générative (travaux académiques mutualisés 2023-2024).

Sciences numériques et technologie, Numérique et sciences informatiques

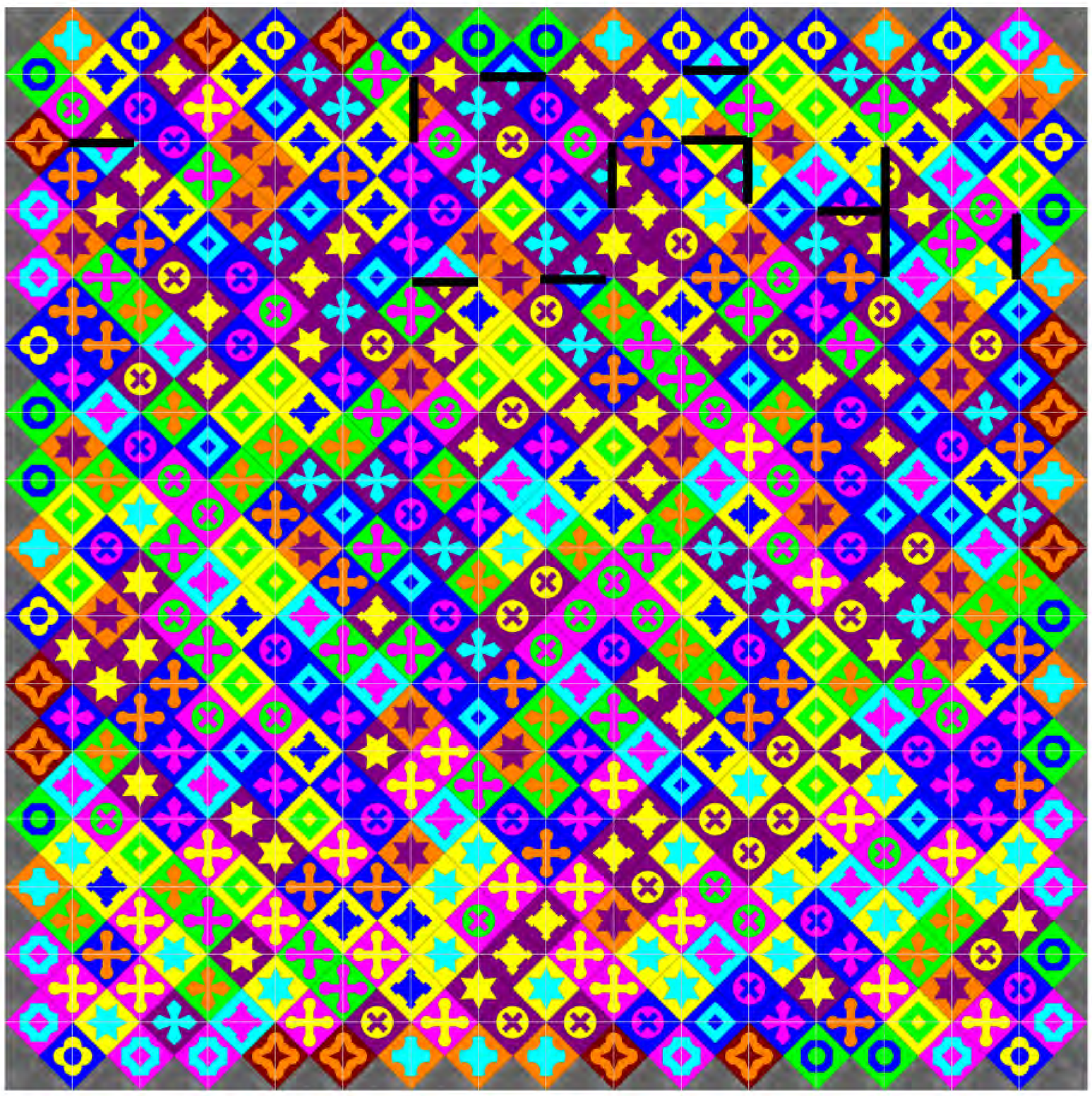
Cet article cherche à montrer une autre forme de matérialité du numérique. À partir de la situation extrêmement concrète de puzzles à résoudre, nous montrons comment l'informatique permet d'accéder à une solution. La composante « temps » est cependant essentielle et peut constituer un frein pour l'homme comme pour la machine. Pour illustrer cela, nous présentons un puzzle de 256 pièces à ce jour non résolu. Cette démarche vise à montrer aux élèves des applications concrètes du numérique en matière d'algorithme de résolution, de puissance de calcul et à inciter certains d'entre eux et certaines d'entre elles à s'engager dans des études d'informatique pour rechercher des méthodes de résolution plus performantes (et pourquoi pas gagner des millions de dollars !).

Le puzzle « Eternity II » est un casse-tête complexe composé de 256 pièces carrées, chacune présentant un motif unique. L'objectif est de placer ces pièces dans une grille de 16 x 16, en faisant correspondre les bords colorés de chaque pièce avec ses voisins afin de créer une grille parfaitement alignée. L'éditeur du puzzle, Eternity II, offrait 2 millions de dollars à quiconque arriverait à finir ce puzzle avant le 31 décembre 2010. Malgré l'intérêt du défi, personne n'a remporté ce prix, et personne n'a jusqu'à présent revendiqué avoir terminé ce puzzle de manière définitive. La meilleure solution à ce jour a été obtenue par le Suédois Louis Verhaard. Sa solution comporte toutes les 256 pièces, mais les motifs ne coïncident pas en 13 endroits. Le nombre de configurations possibles pour le puzzle Eternity II est estimé à $256 ! \times 4^{256}$, en supposant que toutes les pièces sont distinctes et en ignorant les pièces fixes à position prédéterminée. Pour comprendre ce nombre, considérons que pour la première pièce, il y a 256 choix de position sur le puzzle et 4 rotations possibles (0 degrés, 90, 180 et 270 degrés), ce qui donne 4 x 256 possibilités. Pour la seconde pièce, il y a 255 choix de position sur le puzzle, puis 4 rotations, et ainsi de suite jusqu'à la dernière pièce. Cela représente en tout (256 x 4) x (255 x 4) ... x (1 x 4), qui est le résultat indiqué.

Un algorithme dit de « méthode brute » permet de tester toutes les configurations, case par case, et d'afficher la solution s'il parvient à la trouver. Cependant, étant donné le nombre de positions à étudier, le temps de résolution est inaccessible à l'échelle humaine, même avec les ordinateurs les plus puissants. Plusieurs bornes supérieures ont été obtenues en considérant la position de certaines pièces (les bords), ce qui permet de baisser l'ordre de grandeur du nombre de configurations à étudier. Un programme de résolution possible se base sur un algorithme dit du « retour sur trace » (ou « backtracking » en anglais). À chaque étape, il parcourt l'ensemble des pièces restantes non encore essayées en une position. S'il en trouve une, il la place et continue sur la position suivante. S'il n'y en a pas, il rebrousse chemin. Cet algorithme du « retour sur trace » s'applique également à d'autres jeux, notamment à la recherche d'une solution pour le jeu du Sudoku. L'algorithme affecte une valeur possible dans une case, puis poursuit la construction d'une solution. En cas d'impossibilité, l'algorithme revient sur les affectations déjà faites, puis essaie avec d'autres valeurs. Nous vous présentons dans cet article et sur une version simplifiée du puzzle « Eternity II », le fonctionnement d'un algorithme de résolution selon deux approches : la méthode « brute » (on teste toutes les pièces une par une) et la méthode de « retour sur trace ».



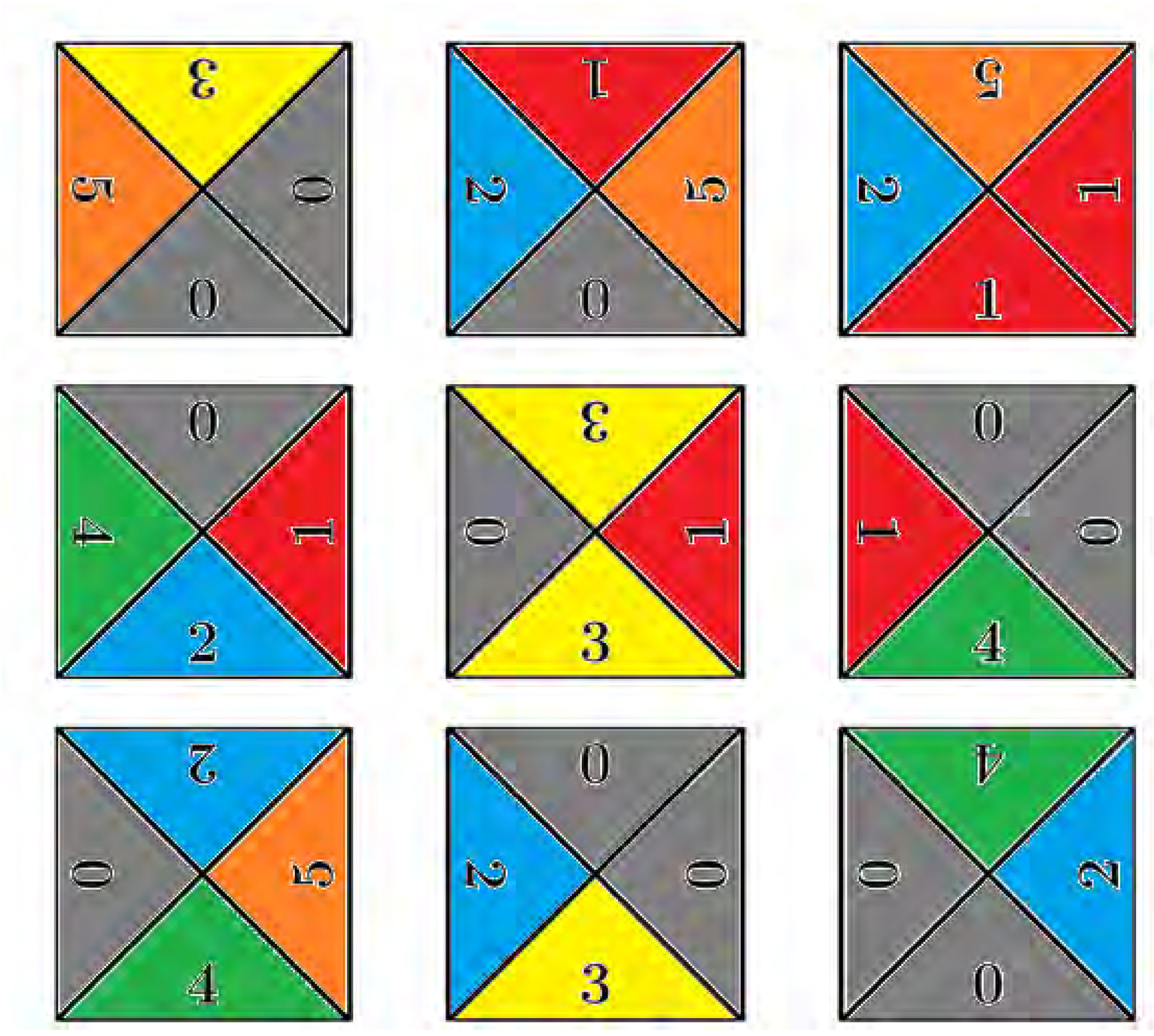
Sur le site **Terra Numerica** (Valbonne), le jeu est présenté et les visiteurs peuvent le manipuler. Avec l'aimable et gracieuse autorisation de © Terra Numerica, consortium fondé par CNRS, Inria et Université Côte d'Azur



La solution ci-dessus est celle obtenue par Louis Verhaard. Elle comporte toutes les 256 pièces, mais les motifs ne coïncident pas en 13 endroits (indiqués par un trait noir). Avec l'aimable et gracieuse autorisation de © Terra Numerica, consortium fondé par CNRS, Inria et Université Côte d'Azur

Une illustration sur un modèle réduit : la méthode « brute »

On considère les 9 pièces ci-dessous, dont les nombres indiqués sont associés à une couleur. Le zéro indique un bord, identifié par la couleur grise sur le puzzle original. L'objectif est de placer ces 9 pièces sur une grille 3 x 3 de manière que chaque chiffre indiqué sur les bords des pièces coïncide avec celui de ses voisins, afin de créer une grille parfaitement alignée.



Il est relativement facile de trouver une solution « à la main » en utilisant des stratégies de sélection des pièces associées à des bords ou des coins (sur la bordure), ce qui permet d'identifier la pièce centrale. À partir de là, il devient facile de construire la grille. Il est également possible d'identifier la pièce centrale, puis de chercher les connexions possibles « à la main », ce qui permet de trouver une solution rapidement.

Le programme écrit ci-dessous en langage Python illustre la méthode « brute », qui consiste à positionner les éléments de la liste de pièces sur la grille **de bas en haut et de gauche à droite**, en vérifiant si la configuration est correcte. Pour cela, il suffit d'analyser la position des zéros (autour de la grille) et des 12 liaisons de compatibilité entre les pièces. Il aurait été possible d'optimiser davantage ce programme en prenant en compte la position des bords ainsi que la symétrie. En effet, s'il existe une grille solution, il y en a 3 autres obtenues par rotation de 90, 180 et 270 degrés. Il y a en tout possibilités à étudier. En disposant d’un ordinateur capable d’étudier 1 000 000 de configurations à la seconde, il faudra à la machine un peu plus d’une journée pour trouver toutes les configurations.

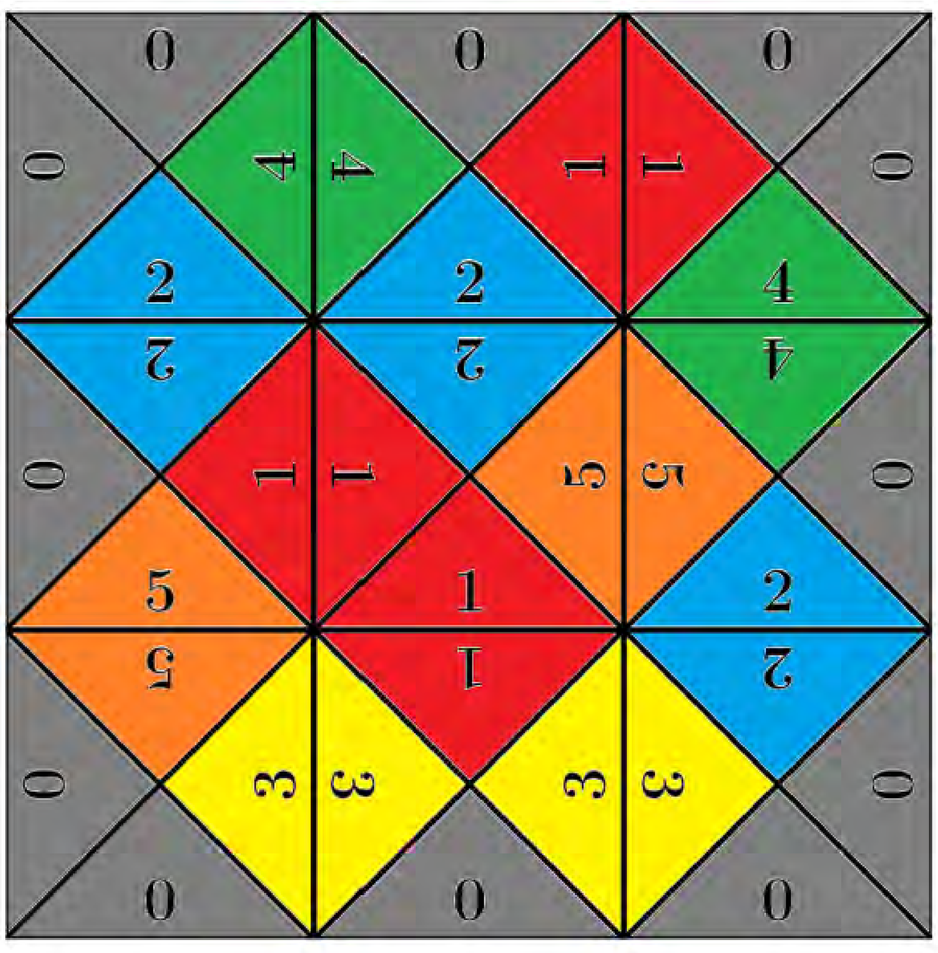
```
import itertools

liste = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]
permutations = itertools.permutations(liste)
pieces = [[3, 5, 0, 0], [1, 2, 0, 5], [4, 0, 0, 2], [3, 1, 3, 0], [5, 2, 1, 1], [1, 0, 4, 2], [0, 2,
3, 0], [0, 4, 5, 2], [0, 0, 1, 4]]

def tourne(liste, n):
    return liste[-n:] + liste[:-n]

def tester(p):
    if p[0][0] + p[0][3] != 0:
        return (1)
    if p[1][0] + abs(p[1][3] - p[0][1]) != 0:
        return (2)
    if p[2][0] + p[2][1] + abs(p[2][3] - p[1][1]) != 0:
        return (3)
    if p[3][3] + abs(p[3][0] - p[0][2]) != 0:
        return (4)
    if abs(p[4][0] - p[1][2]) + abs(p[4][3] - p[3][1]) != 0:
        return (5)
    if p[5][1] + abs(p[5][0] - p[2][2]) + abs(p[5][3] - p[4][1]) != 0:
        return (6)
    if p[6][2] + p[6][3] + abs(p[6][0] - p[3][2]) != 0:
        return (7)
    if abs(p[7][0] - p[4][2]) + p[7][2] + abs(p[7][3] - p[6][1]) != 0:
        return (8)
    if p[8][1] + p[8][2] + abs(p[8][3] - p[7][1]) + abs(p[8][0] - p[5][2]) != 0:
        return (9)
    else:
        return (0)

for i in list(permutations):
    for j0 in range(4):
        for j1 in range(4):
            for j2 in range(4):
                for j3 in range(4):
                    for j4 in range(4):
                        for j5 in range(4):
                            for j6 in range(4):
                                for j7 in range(4):
                                    for j8 in range(4):
                                        p = [tourne(pieces[i[0]], j0), tourne(pieces[i[1]], j1),
                                             tourne(pieces[i[2]], j2), tourne(pieces[i[3]], j3),
                                             tourne(pieces[i[4]], j4), tourne(pieces[i[5]], j5),
                                             tourne(pieces[i[6]], j6), tourne(pieces[i[7]], j7),
                                             tourne(pieces[i[8]], j8)]
                                        if tester(p) == 0:
                                            print(p)
```

Méthode brute, codage en langage Python

À la 3 406 910 806e itération (signalée par l'instruction « if tester(p) == 0 »), le programme affiche :

[[0, 3, 5, 0], [0, 3, 1, 3], [0, 0, 2, 3], [5, 1, 2, 0], [1, 5, 2, 1], [2, 0, 4, 5], [2, 4, 0, 0], [2, 1, 0, 4], [4, 0, 0, 1]]

qui correspond donc à la solution suivante :



Une illustration sur un modèle réduit : la méthode du « retour sur trace »

On dira qu'une grille est « testée » lorsque l'on vérifie si les pièces posées sur la grille à un moment donné de la construction satisfont aux contraintes du puzzle (les zéros de toutes les pièces sont bien positionnés et les connexions entre elles sont cohérentes). Les positions des pièces sur la grille sont numérotées de 0 à 8, de gauche à droite et de bas en haut :

6	7	8
3	4	5
0	1	2

Lorsqu'on considère une grille non complète sur laquelle figurent certaines pièces bien placées (ce qui signifie que le test de la grille est positif à cette étape), on place une nouvelle pièce sur la grille. Si le test est concluant, on passe à l'étape suivante, c'est-à-dire que l'on considère la case suivante et l'on pose une pièce différente de toutes celles qui ont été posées précédemment. Si le test n'est pas concluant, on tourne la pièce. Si cela ne fonctionne toujours pas, on la tourne à nouveau (à trois reprises au maximum). Si cela n'est toujours pas possible, on change de pièce. S'il n'y a plus de pièces disponibles, on revient à la pièce précédente et on la remplace par une autre pièce (en cohérence avec toutes les pièces qui figurent sur la grille). Si, malgré toutes les configurations testées, l'algorithme ne trouve pas de solution, cela signifie que la grille est impossible et donc que le puzzle est impossible à résoudre.

Voici un programme Python qui traduit cet algorithme :

```
possible = [[3, 5, 0, 0], [1, 2, 0, 5], [3, 1, 3, 0], [4, 0, 0, 2], [5, 2, 1, 1], [1, 0, 4, 2], [0,
2, 3, 0],[0, 4, 5, 2], [0, 0, 1, 4]] #inventaire de toutes les pièces

def tester(g,niveau):
    match niveau:
        case 0:
            return (g[0][0] + g[0][3] == 0)
        case 1:
            return (g[1][0] + abs(g[1][3] - g[0][1]) == 0) and tester(g,0)
        case 2:
            return (g[2][0] + g[2][1] + abs(g[2][3] - g[1][1]) == 0) and tester(g,1)
        case 3:
            return (g[3][3] + abs(g[3][0] - g[0][2]) == 0) and tester(g,2)
        case 4:
            return (abs(g[4][0] - g[1][2]) + abs(g[4][3] - g[3][1]) == 0) and tester(g,3)
        case 5:
            return (g[5][1] + abs(g[5][0] - g[2][2]) + abs(g[5][3] - g[4][1]) == 0) and tester(g,4)
        case 6:
            return (g[6][2] + g[6][3] + abs(g[6][0] - g[3][2]) == 0) and tester(g,5)
        case 7:
            return (abs(g[7][0] - g[4][2]) + g[7][2] + abs(g[7][3] - g[6][1]) == 0) and tester(g,6)
        case 8:
            return (g[8][1] + g[8][2] + abs(g[8][3] - g[7][1]) + abs(g[8][0] - g[5][2]) == 0) and
tester(g,7)

def rotation(liste, n): #fait tourner les éléments de la liste de n unités à gauche
    return liste[-n:] + liste[:-n]

tous_les_possibles=[] #on construit la liste de tous les possibles à partir de possible et des 3
éléments obtenus par rotation
for i in range(9):
    for j in range(4):
```

```
        tous_les_possibles.append(possible[i][-j:]+possible[i][:-j])

grille=[[] for i in range(9)] #grille sur laquelle on applique l'algorithme

def trouve(position, liste_possibles): #position est le numéro de case de la grille sur laquelle on
teste les possibles
    if position > 8:
        return(True) #on a résolu la grille
    for i in liste_possibles:
        grille[position] = i #on teste le i-ème élément de tous les possibles
        liste_sauvegarde=liste_possibles.copy()
        if tester(grille, position):
            liste_possibles.remove(i)  # on enlève l'élément testé des possibles...
            liste_possibles.remove(rotation(i, 1))  # ...ainsi que ses trois homologues obtenus par
rotation
            liste_possibles.remove(rotation(i, 2))
            liste_possibles.remove(rotation(i, 3))
            if trouve(position + 1, liste_possibles):
                return(True)  # on avance dans la résolution à la case suivante
        liste_possibles=liste_sauvegarde.copy() #aucun élément n'a marché, on annule la modification
de la liste des possibles
    return(False)

if trouve(0, tous_les_possibles):
    print("grille résolue")
    print(grille)
else :
    print("impossible")
```

En moins d’une seconde, il affiche le résultat suivant :

[[0, 3, 5, 0], [0, 3, 1, 3], [0, 0, 2, 3], [5, 1, 2, 0], [1, 5, 2, 1], [2, 0, 4, 5], [2, 4, 0, 0], [2, 1, 0, 4], [4, 0, 0, 1]]

qui est la même solution trouvée par l’algorithme de force brute en beaucoup plus de temps.

Prolongements possibles

- Créer une grille 4 x 4 en utilisant 7 couleurs (gris compris), découper les 16 pièces et les mélanger. Essayer de reconstruire la grille initiale « à la main »
- Adapter l’algorithme du « retour sur trace » à cette grille 4 x 4 en procédant à des ajustements au niveau du programme Python puis tester le programme.

Pour information, la grille 16 x 16 du puzzle « Eternity II » comporte :

- Sur sa bordure (réunion des rangées extrêmes) : 5 couleurs distinctes en plus du gris
- Sur sa partie intérieure : 17 couleurs distinctes

N.B : contribution réalisée avec le concours de **Kévin Perrot**, enseignant-chercheur au Laboratoir d'informatique et des systèmes (LIS-Aix Marseille Université) sur la conception du code Python lié à la méthode du « retour sur trace ».

Le voyage d'un clic

Dans tout système de traitement de l’information, les substrats, les supports et les canaux physiques constituent en effet la base matérielle indispensable : des structures microscopiques de la micro-électronique des semi-conducteurs jusqu’aux infrastructures de transmission qui assurent la circulation globale des données, chaque élément participe à cette matérialité. Dans les enseignements de Sciences et Techniques Industrielles (STI) et de Sciences de l’Ingénieur (SI), l’étude de la conception et de la mise en œuvre matérielles des moyens de communication permet d’éclairer les choix technologiques et stratégiques opérés par l’industrie pour transporter l’information à l’échelle mondiale. Le développement proposé, volontairement restreint, vise ainsi à expliciter ces évolutions, à comprendre les raisons qui ont conduit à privilégier certaines solutions techniques, et à mettre en perspective les enjeux qu’elles soulèvent. Cette réflexion s’appuie sur des points de programmes issus de différentes filières industrielles (STI2D-SIN, SI, BTS CIEL, CPGE PTSI, CPGE TSI, etc.) et offre un appui possible aux questionnements sociétaux du Grand oral au baccalauréat. Les considérations liées au développement durable, articulées autour du triptyque économique, sociétal et environnemental, seront également mobilisées pour analyser et justifier les choix industriels.

Dans le cadre des programmes et référentiels de formation (CPGE TSI, CPGE PTSI, BTS CIEL, BAC spécialité SI, BAC STI2D) ce développement vise à analyser le cheminement d’une donnée numérique afin d’en caractériser les supports de transmission. L’étude des pertes, des atténuations et des phénomènes qui dégradent le signal permet de comprendre les contraintes physiques et techniques propres à chaque canal de communication. Cette approche éclaire les raisons pour lesquelles certaines solutions techniques ont été retenues plutôt que d’autres, et constitue un levier pour appréhender de manière structurée les choix industriels en matière de transport de l’information.

Une ébriété technologique

Depuis plus de vingt ans, le volume des données échangées à travers les réseaux numériques connaît une très forte croissance continue. Chaque clic, chaque vidéo, chaque transaction ou échange en ligne alimente un flux mondial d’informations qui double environ tous les trois ans. Les évolutions conjuguées des différents canaux de transmission comme les réseaux optiques, satellite et hertziens associés aux algorithmes de compression, du *cloud computing* ont entraîné une augmentation annuelle moyenne de 25 à 30 % du volume de données échangées. Entre 2010 et 2025, le trafic mondial est ainsi passé de quelques centaines d’exa octets (10^{18} octets) à plus de six zetta octets (10^{21} octets) par an, soit une multiplication par plus de vingt. Selon l’Union internationale des télécommunications (UIT), le trafic Internet mondial dépasse aujourd’hui plusieurs zettaoctets annuels, représentant des milliards de milliards d’octets circulant chaque année entre data centers, câbles sous-marins, satellites et terminaux connectés. Cette expansion vertigineuse mérite de s’attarder sur les routes transportant les données, leur puissance économique et environnementale mais aussi leur fragilité stratégique, tout en rappelant que cette apparente dématérialisation s’appuie sur une infrastructure physique colossale, énergivore et planétaire bien réelle.

Les pérégrinations d'un « clic »

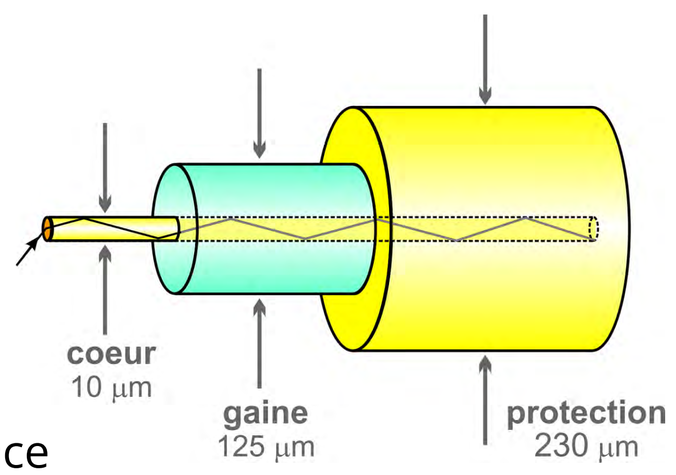
Quoi de plus banal qu’un clic de souris. Ce petit geste, si anodin qu’on ne le remarque plus, est pourtant le point de départ d’une aventure technologique vertigineuse. Derrière la pression d’un doigt se cache une chaîne d’événements parfois d’une grande complexité :

l'action mécanique de ce geste se transforme en information électrique, passe par l'état d'onde électromagnétique puis en lumière pour parcourir des milliers de kilomètres à travers les terres, l'air, les mers et jusque dans l'espace. Le « clic » que nous croyons immatériel va emprunter des chemins bien réels, faits de cuivre, de verre, d'air et de vide ; nous les appelons canaux de transmission. Chacun de ces supports possède ses caractéristiques, ses contraintes physiques, ses limites de fonctionnement, qui conduisent l'ingénierie des sciences et techniques industrielles à faire cohabiter ces supports de transmission. L'expression « nuage informatique » évoque souvent quelque chose d'évanescent, flottant au-dessus de nos têtes. Pourtant, le numérique n'a rien d'immatériel : il repose sur des kilomètres de câbles, des milliers d'antennes, des flottes de satellites, et des centres de données gigantesques, parfois dissimulés au cœur des déserts ou au fond des mers. Cette matérialité du numérique est l'un des paradoxes de notre époque. Nous vivons dans un monde où l'information semble circuler instantanément, mais cette vitesse repose sur des lois physiques mesurables : l'atténuation d'un signal, la bande passante, le rapport signal/bruit, le temps de propagation, le débit d'information, le taux d'erreurs, etc. Ces notions, fondamentales pour les élèves en sciences et techniques industrielles (STI), deviennent ici les outils pour décrypter l'invisible.

Prenons la situation d'étude où les personnages d'Élodie à Paris, Amina à La Réunion et Gabriel en Nouvelle-Calédonie se rencontrent lors d'une réunion en visioconférence à travers une plateforme couramment utilisée. Dans une architecture centralisée la plus courante de type SFU (Selective Forwarding Unit), les flux de données de chaque participant sont réceptionnés et redistribués et chaque utilisateur reçoit uniquement les données nécessaires. Les serveurs SFU hébergés dans un *datacenter* au plus près de chaque interlocuteur centralisent les communications et dialogues.

Le clic d'Élodie : un voyage à travers la fibre optique sur un support de verre

Selon l'Arcep (Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse), fin mars 2025 on compte environ 25,1 millions d'abonnements en fibre optique (FTTH - Fiber to the Home) en France, ce qui représente 77 % du total des abonnements Internet fixe. Pour Paris (75) le taux de couverture est d'environ 98,1 % (données juin 2025). Le clic d'Élodie chemine à travers la fibre optique depuis sa *box* jusqu'à l'OLT (Optical Line Terminal) du central de quartier, puis rejoint, par la dorsale optique, le *datacenter* le plus proche où se trouve le serveur de visioconférence (serveur SFU). Différents types de raccordements se succèdent mais la nature du canal de transmission reste un câble de fibre optique. Pourquoi la fibre optique remplace les câbles de cuivre ? Le câble en cuivre transporte un signal électrique sous forme de tension et de courant. La perte principale provient de la résistance ohmique du conducteur, donnée par :



Christophe Finot. *Schéma de principe d'une fibre optique.* Wikimedia. CC BY-SA 2.5

$$R = \rho . \frac{L}{S}$$

où ρ est la résistivité du cuivre (~1,7. 10^{-8} Ω.m), L la longueur du câble et S sa section. Cette résistance engendre une chute de tension et une perte de puissance par effet Joule :

$$P_{Perdue} = I^2 . R$$

L'affaiblissement linéique α_e, exprimé en dB/km, caractérise la diminution de la puissance transmise :

$$\alpha_e = 10 \times \log_{10}\left(\frac{P_{entrée}}{P_{sortie}}\right)$$

avec pour le cuivre (ADSL), on a typiquement $\alpha_e \approx 13$ dB/km à 1 MHz. Dans le cuivre (ADSL), le signal est électrique : les pertes augmentent fortement avec la longueur, la fréquence et la température, ce qui limite la portée et le débit transmissible. Avec la fibre optique, on change de nature de signal : il devient lumineux. L'atténuation ne provient plus de pertes ohmiques, mais de phénomènes optiques (diffusion, absorption, microcourbures).La puissance s'exprime par la relation :

$P_L = P_0 . e^{-\alpha L}$ et α est le coefficient d'atténuation optique (km^{-1}).

En décibels : $A_{dB} = 10 \log_{10}\left(\frac{P_0}{P_L}\right) = \alpha_{dB} . L$

Pour une fibre monomode, $\alpha_{dB} \approx 0,2\ dB/km$ à $\lambda = 1550nm$ (λ: $longueur\ d'onde$)

La fibre optique remplace progressivement les câbles en cuivre car elle repose sur des lois physiques beaucoup plus favorables à la transmission de l'information. Alors que le cuivre subit des pertes importantes liées à la résistance électrique et à l'effet Joule, la fibre présente une atténuation environ 60 à 70 fois plus faible, permettant de transmettre des signaux sur de longues distances sans amplification fréquente, avec des débits très élevés et une meilleure fiabilité. La transition du cuivre vers la fibre n'est donc pas un choix technologique arbitraire, mais une conséquence directe des limites physiques du transport électrique de l'information face aux performances du transport optique.

Le débit D est limité par la bande passante B et le rapport signal/bruit (SNR) selon la loi de Shannon : $D = B.log_2\ (1+ SNR)$

Le SNR diminue avec l'atténuation : $SNR = \frac{P_0 \times e^{-\alpha L}}{P_{Bruit}}$. Ainsi, le débit décroît rapidement

avec la distance pour le cuivre, alors qu'il reste quasi stable sur la fibre (même s'il dépend aussi d'autres paramètres comme la dispersion, les non-linéarités, les amplifications, multiplexage). La latence qui n'est autre que le temps que met une information pour aller d'un point à un autre dans un réseau, dépend de la vitesse de propagation du signal : $t = \frac{L}{v}$ Dans la fibre, la lumière se propage à environ 2×10^8 m/s (≈ 0,67c). Sur 100 km, cela représente environ 0,5 ms, mais la fibre ajoute peu de retard supplémentaire. On démontre ainsi que la supériorité de la fibre n'est pas technologique mais initialement fondamentalement physique. On démontre ainsi que la supériorité de la fibre n'est pas *technologique* mais initialement fondamentalement *physique*. Les différences clés entre cuivre et fibre sont illustrées ci-dessous :

Paramètre	Cuivre (ADSL)	Fibre Optique	Unité	Commentaire
Atténuation A_{dB}	~ 13	~ 0,2	dB/km	Fibre : ≈ 65× moins de pertes
Débit Utile D	< 20	> 10 000	Mb/s	Selon la loi de Shannon
Latence t	10 - 30	~ 1	ms/100 km	Propagation quasi identique
Taux d'erreurs BER	10^{-6}	10^{-12}	-	Fibre plus stable

La fibre optique transporte l'information sous forme de lumière confinée dans un cœur de verre quasi parfait. L'énergie s'affaiblit très peu (0,2 dB/km) contre 13 dB/km pour le cuivre. Cette faible atténuation maintient un rapport signal/bruit élevé et un débit quasi constant, avec une latence minimale. Ainsi, la fibre permet de transporter plus de bits par seconde sur des distances beaucoup plus grandes, avec une stabilité quasi parfaite. Ce tableau synthétise les effets cumulés des lois physiques précédentes et explique pourquoi la fibre est le support privilégié pour le transport massif de données.

Le parcours du clic d'Élodie soulève des enjeux économiques concernant les ordres de bourse automatisés et la question de la latence, quand la vitesse devient un avantage financier : sur les marchés modernes, une grande partie des ordres de bourse (achats/ventes d'actions, devises, produits dérivés) est passée non plus par des humains, mais par des algorithmes de *trading* automatisé appelés robots de trading ou HFT (High Frequency Trading). Ces programmes analysent en temps réel les variations de prix et passent des ordres en quelques microsecondes (µs). Dans ce contexte, la latence devient un facteur économique. Celui qui envoie son ordre le plus vite peut acheter ou vendre avant les autres, et donc profiter d'un avantage de quelques millièmes de seconde. Pour réduire cette latence, les sociétés de trading haute fréquence ont cherché à rapprocher physiquement leurs serveurs des *datacenters* où sont hébergés les plateformes d'échanges (bourses électroniques). Par exemple, le moteur de négociation d'Euronext Paris est hébergé dans un *datacenter* situé à Basildon, au Royaume-Uni. Afin de réduire au maximum la latence, les grandes sociétés de trading ont installé leurs propres serveurs en colocation dans ce même site, ou à très courte distance, de façon à minimiser le temps de propagation du signal optique, contrainte physique incompressible. Dans le trading haute fréquence, la performance ne dépend plus seulement des algorithmes, mais de la géographie : quelques centaines de mètres de fibre peuvent décider d'un avantage économique.

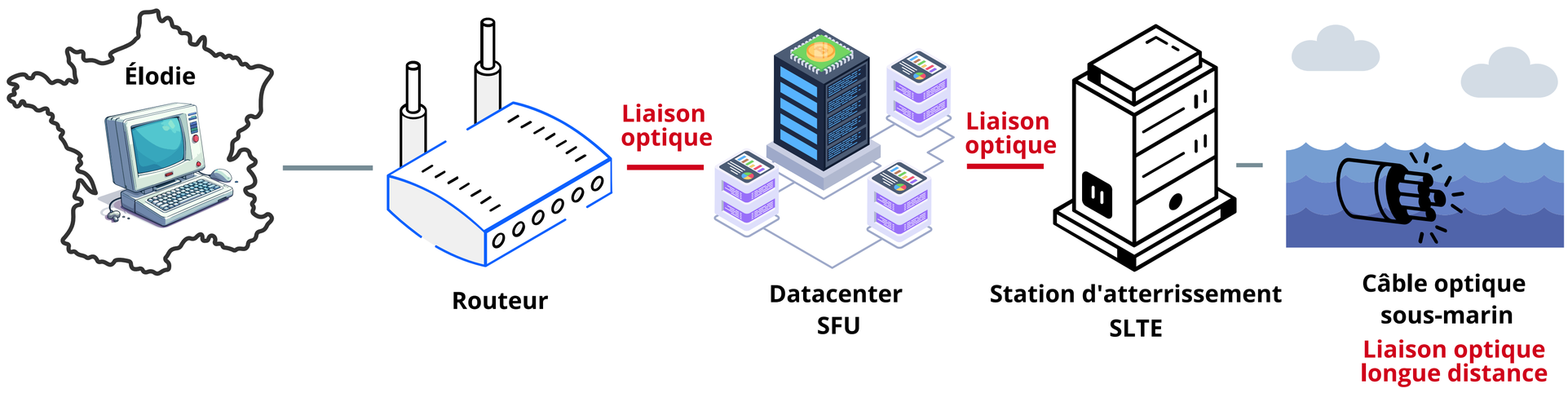
$$t = \frac{L}{v} \text{ où } v \approx 2.10^8 m/s \; dans \; la \; fibre$$

Ainsi, 1 km de fibre = 5 microsecondes de retard environ. Pour éviter qu'une société ne soit avantagée uniquement par sa proximité géographique, certains opérateurs boursiers imposent une règle d'équidistance. Tous les robots de trading doivent se connecter sur des lignes de même longueur optique vers le serveur central, même si cela signifie ajouter artificiellement de la fibre pour les plus proches. Ainsi, chaque acteur subit exactement la même latence physique, assurant une égalité des chances entre concurrents. Les câbles, techniquement, sont parfois enroulés en spires supplémentaires dans les *racks* pour obtenir la même distance optique (par exemple : 3 km de fibre enroulée pour compenser 15 µs de différence).

De la fibre optique à la FTTH

Bien que cette ressource ait été élaborée dans le cadre de l'ancien programme du BTS SN (systèmes numériques), elle demeure pertinente et peut être adaptée à une exploitation pédagogique dans le cadre du nouveau programme du BTS CIEL ((cybersécurité, informatique et réseaux, électronique). Développée à partir dudit référentiel, cette ressource constitue un prolongement utile dans le domaine de la transmission de l'information. De la même manière, elle aborde les supports de transmission (cuivre, fibre, radio), les paramètres influençant la propagation, les phénomènes d'affaiblissement, les débits, les modulations, le bruit ainsi que les bilans de liaison.

Le périple du clic de souris d'Élodie n'en finit pas : après avoir quitté son domicile traversé les différentes installations (routeur, fibre optique FTTH, *datacenter*, SFU, le voilà arrivé dans un équipement de terminaison de ligne SLTE (*submarine line terminal equipment*) au sein de la station d'atterrissement CLS (*cable landing station*). C'est l'ultime étape avant la traversée des mers et des océans.



Les câbles optiques sous-marins constituent aujourd'hui la colonne vertébrale de l'Internet mondial : plus de 1,48 million de kilomètres de fibres parcourent les océans, assurant près de 95 % des échanges intercontinentaux de données. Leur déploiement connaît une croissance soutenue, avec environ 300 000 km de nouveaux câbles prévus entre 2023 et 2025, pour un investissement global supérieur à 10 milliards de dollars. Ce marché stratégique est dominé par quatre acteurs principaux : ASN (France), SubCom (États-Unis), NEC (Japon) et HMN Tech (Chine). La France occupe une place centrale : son industriel Alcatel Submarine Networks reste le dernier grand fabricant européen, tandis que la ville de Marseille s'impose comme un nœud majeur d'atterrissage en Méditerranée. Les GAFAM détiennent ou co-financent désormais plus d'une douzaine de câbles privés, tels que Dunant, Grace Hopper ou 2Africa, pour relier leurs data centers et réduire la latence. Les technologies actuelles reposent sur des fibres optiques multiplexées (DWDM), des répéteurs EDFA espacés d'environ 80 km et des stations d'atterrissement alimentant le système en courant continu. Les grands navires câbliers, dont le Sophie Germain (Orange Marine), posent jusqu'à 4 000 km de câble par mission, à raison de 100 à 200 km par jour, pour un coût moyen de 6 000 à 20 000 $ par km. Depuis le TAT-8 (1988, 280 Mbit/s) jusqu'à Grace Hopper (2022, 352 Tbit/s) ou Amitié (2023, 368 Tbit/s), les capacités ont été multipliées par plus d'un million. Ces infrastructures traversent des zones stratégiques – Méditerranée, Suez, Singapour, Atlantique, Pacifique – et subissent chaque année 150 à 200 incidents, principalement dus à la pêche ou aux ancres de navires. Véritables artères du numérique, les câbles sous-marins sont à la fois technologiquement sophistiqués, économiquement vitaux et géopolitiquement sensibles.

Carte des câbles par Greg Mahlknecht , contributeurs d'Openstreetmap CC BY-SA 2.0. 2015. Wikimedia. Voir carte 2025 sur TeleGeography.

Dans un câble sous-marin, l'information numérique est transportée sous forme de lumière émise par un laser. Cette lumière circule dans une fibre optique, un fil de verre extrêmement pur dont le coeur guide le signal par réflexion totale interne. Chaque impulsion lumineuse correspond à un bit d'information ('0' ou '1'). La propagation d'un signal lumineux n'est toutefois pas parfaite : au cours de son trajet, une partie de l'énergie se perd. Ces pertes sont regroupées sous le terme d'atténuation, exprimée en décibels par km (dB/km). La loi d'atténuation s'écrit de façon simple (voir p. 131).

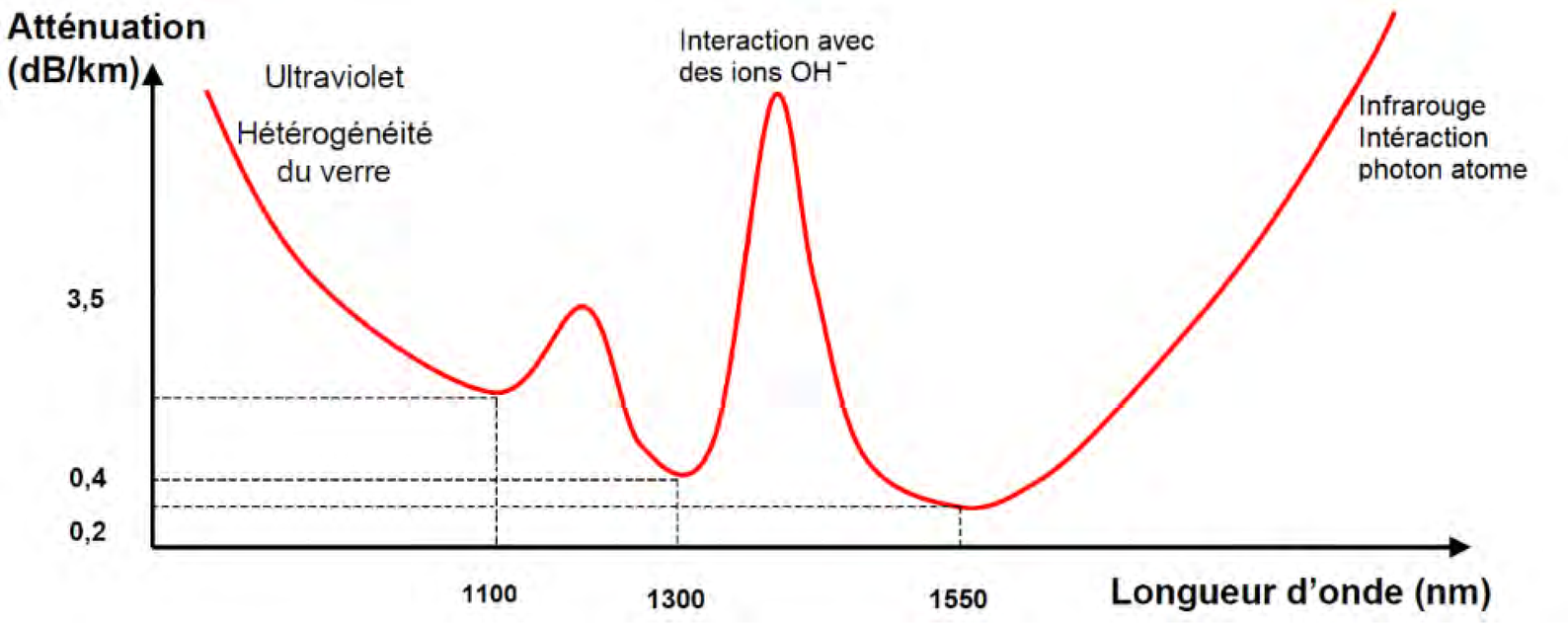
En décibels, on peut aussi écrire : $A_{dB} = 10 \log_{10}(\frac{P_0}{P_L}) = \alpha_{dB} \cdot L$

Cette expression montre que les pertes augmentent linéairement avec la distance parcourue. Le graphique ci-dessous montre que l'atténuation dépend de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Trois phénomènes principaux expliquent ces pertes :

- Diffusion Rayleigh – due aux irrégularités microscopiques du verre ; elle domine dans le domaine visible et ultraviolet, provoquant de fortes pertes à courte longueur d'onde (< 1200 nm).
- Absorption – certaines impuretés (ions OH^-, traces d'eau) absorbent la lumière autour de 1380 nm.
- Absorption infrarouge – au-delà de 1700 nm, les photons sont absorbés par les vibrations atomiques du verre.

C'est pourquoi les transmissions optiques utilisent les « fenêtres de transparence » de la fibre :

- autour de 1310 nm, puis
- surtout 1550 nm, où les pertes sont minimales (≈ 0,2 dB/km), zone de transparence maximale de la fibre de verre de silice.



Concours général des lycées - Session 2019 - Sciences de l'Ingénieur

Une illustration de l'application pédagogique des longueurs d'ondes utilisées pour la transmission et la réception en est donnée dans le paragraphe « Étude des protocoles communication » du concours général des lycées de la session 2019. Malgré les faibles pertes, la fibre optique finit par ne plus transmettre le signal optique dès 100 km de distance. En effet :

$$\alpha_{dB} = 0,2\ dB/km\ \ soit\ pour\ 100km :\ \alpha_{dB} = 0,2 \times 100 = 20\ dB\ soit\ 99\%\ de\ puissance\ en\ moins$$

Ainsi, la lumière doit être amplifiée régulièrement. C'est le rôle des répéteurs optiques espacés d'environ 80 à 100 km dans les câbles sous-marins. La combinaison d'une atténuation minimale, d'une amplification optique maîtrisée et d'une immunité aux perturbations électromagnétiques explique pourquoi la fibre sous-marine est irremplaçable sur les longues distances.

Des ressources permettent de mettre en lumière une autre application de la mise en œuvre de la fibre optique dans les structures et d'approfondir la culture des sciences de l'ingénieur : Capteurs à fibres optiques : principe de fonctionnement et Surveillance en temps réel d'une poutre en aluminium à l'aide d'un capteur de déformation à fibre optique OFDR.

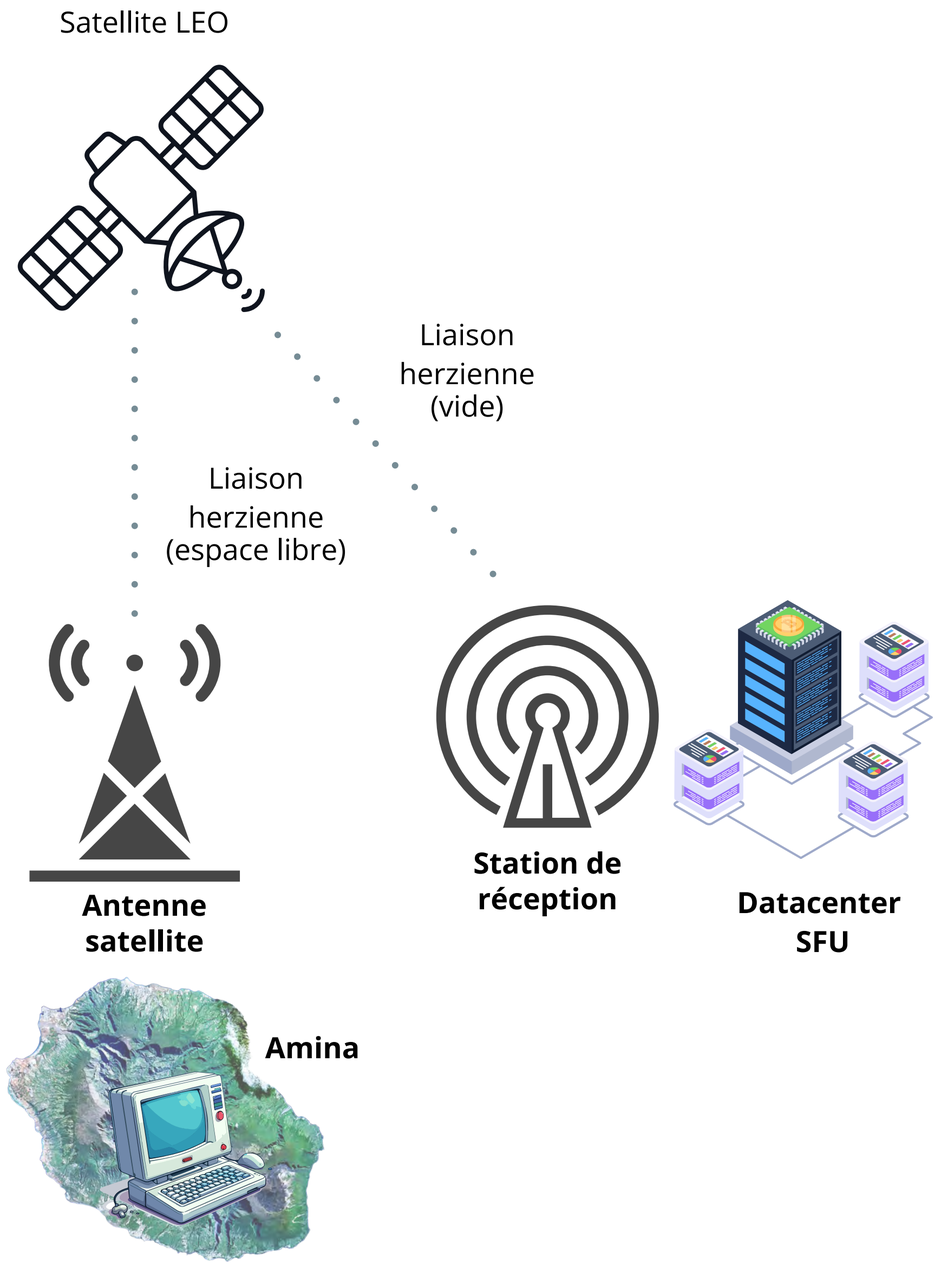
Reprenons le cheminement du clic d'Élodie : si on estime la route la plus probable, Élodie est Gabriel sont séparés par une distance de fibre optique sous-marine d'environ 19 000 km (Paris → Marseille (800 km, terrestre) → Singapour (11500 km, maritime) → Sydney (4600 km, maritime) → Nouméa (2150 km, maritime), le retard ou temps de latence entre Élodie à Paris et Gabriel à Nouméa s'estime à 93 ms :

$$t = \frac{L}{v} = \frac{19000000}{2{,}04\times10^{8}} = 0{,}093\ s = 93\ ms$$

pour un trajet aller soit *186 ms* pour un aller-retour. Cette valeur semble élevée mais reste acceptable dans une communication en visioconférence.

Le trajet du clic d'Amina depuis l'île de La Réunion : la voie satellitaire

L'île de La Réunion possède une couverture de connexion internet satisfaisante. Selon les derniers chiffres de l'Arcep en date de 2024, 79% des logements sont éligibles à un raccordement fibre de type FTTH. De manière opérationnelle, 56% sont effectivement raccordés. L'objectif est d'atteindre une couverture de clients raccordables complète de 100% d'ici 2026. La stratégie de couverture à La Réunion est triple; raccorder le maximum de foyers à la fibre, améliorer la couverture mobile 4G/5G pour couvrir les dernières « zones blanches » et enfin laisser le satellite (et surtout Starlink) combler les territoires impossibles à couvrir par les réseaux terrestres, garantissant ainsi un accès au haut débit pour tous, partout sur l'île. Depuis son village isolé dans les montagnes de La Réunion,



Amina clique sur « Rejoindre la visioconférence », où Élodie, connectée depuis Paris via la fibre optique, et Gabriel, en déplacement avec sa 4G en Nouvelle-Calédonie, l'attendent déjà. Mais le trajet emprunté par le signal d'Amina diffère radicalement : au lieu de suivre des câbles terrestres, il s'élève vers l'orbite basse. Son message est alors pris en charge par une constellation de satellites positionnés à environ 550 kilomètres d'altitude, formant un maillage numérique qui assure la liaison là où aucune infrastructure filaire ou cellulaire n'est disponible. Ce parcours singulier met en lumière la matérialité souvent méconnue de ces systèmes satellitaires, dont certaines compagnies offrent aujourd'hui les solutions les plus abouties. Pour comprendre le parcours du clic d'Amina, il faut rappeler une réalité physique

de celle de la fibre d'Élodie ou des ondes utilisées par Gabriel. Le principal obstacle n'est pas le débit, mais le délai perceptible entre son action et son apparition chez ses interlocuteurs : la latence. En communication satellitaire, celle-ci répond à une loi simple :

$$t = \frac{d}{c}$$

où *d* représente la distance parcourue et *c* la célérité de la lumière (300 000 km/s). C'est cette relation simple qui détermine les contraintes propres au trajet de son signal.
Pendant des décennies, les satellites géostationnaires (GEO) ont régné en maîtres à 35 786 km d'altitude. Une hauteur qui leur permet de couvrir un continent entier, mais au prix d'un voyage éprouvant pour les données. Dans cette situation, le clic aurait dû accomplir un aller-retour de près de 144 000 km vers cette tour de contrôle céleste. Le calcul est sans appel :

$$t_{GEO} = \frac{4 \times 35786.10^3}{300000. \times 10^3} = 477\ ms$$

Dans la pratique, avec les délais de routage, on dépasse souvent les 600 ms. Dans une visioconférence, ce délai rend la conversation hachée et désagréable. Mais le chemin d'Amina est radicalement différent : il frôle la Terre. En plaçant ses satellites en orbite basse (LEO) à seulement 550 km, la distance s'effondre littéralement et le temps de communication aussi :

$$t_{LEO} = \frac{4 \times 550.10^3}{300000. \times 10^3} = 7.3\ ms$$

Même en tenant compte du traitement par les routeurs spatiaux et des liaisons inter-satellites, la latence reste généralement comprise entre 20 et 50 ms, soit un gain d'un facteur 10 à 30. Le visage d'Amina apparaît alors presque aussi rapidement que celui d'Élodie utilisant la fibre. Cette performance implique toutefois une contrainte majeure : à une altitude aussi faible, chaque satellite ne couvre qu'une zone limitée de la surface terrestre. Pour assurer une connexion continue à un village isolé, il est donc nécessaire de déployer un grand nombre de satellites en orbite basse, ce qui constitue un défi logistique et technique important.

Le signal numérique ne part pas d'un routeur filaire, mais d'une antenne unique posée sur un toit. Comment maintenir une connexion stable avec un objet qui file à 27 000 km/h, traversant son ciel en seulement 4 minutes avant de disparaître derrière l'horizon ? La solution mécanique, une parabole qui pivoterait frénétiquement, était une impasse.
L'antenne d'Amina, surnommée « Dishy » est une technologie à balayage électronique. Derrière son design et sous sa surface hexagonale, 1280 petites antennes travaillent en parfaite synergie. Leur secret ? Le « beamforming » (formation de faisceau géré par des processeurs principaux et secondaires). Au lieu d'émettre le signal d'Amina dans toutes les directions comme une ampoule, elles synchronisent leurs émissions avec une précision nanométrique. Par un phénomène d'interférence constructive, elles fusionnent leurs ondes individuelles en un faisceau électromagnétique étroit, extraordinairement concentré et directionnel.

La puissance combinée de ce faisceau est environ 3500 fois supérieure à celle d'une seule de ces micro-antennes. L'interférence destructive élimine les lobes latéraux parasites, canalisant toute leur énergie vers le satellite cible, comme un système de miroirs paraboliques. Aucun moteur pour suivre la course des satellites, aucun mouvement

mécanique. Le système utilise l'astuce du déphasage : en introduisant un minuscule délai contrôlé dans l'émission de chaque antenne, il courbe électroniquement le « front d'onde », orientant le faisceau avec une grande agilité. Ce calcul de trajectoire est recalculé toutes les microsecondes, guidé par le GPS intégré et la connaissance parfaite des orbites des satellites. Les puissances en jeu sont pourtant modestes et intelligentes : le terminal d'Amina consomme environ 45 à 75 watts en fonctionnement, l'équivalent d'une ampoule LED puissante. Sa puissance d'émission radio est typiquement de 2 à 4 watts par élément, mais grâce au beamforming, le faisceau résultant atteint une puissance effective rayonnée équivalente à celle d'une antenne traditionnelle consommant des centaines de watts. Une efficacité énergétique remarquable pour un appareil grand public.

Mais à quoi sert un lien rapide et stable s'il ne véhicule qu'un filet de données ? Le flux vidéo d'Amina vers ses interlocuteurs relève un grand défi. Le système utilise une technique de modulation avancée, la 64 QAM (Modulation d'Amplitude en Quadrature à 64 états). Imaginez que chaque « vague » radio peut prendre 64 formes distinctes, chacune codant un motif de 6 bits d'information. C'est comme si son antenne parlait un langage où chaque syllabe porte six fois plus de sens.

Le résultat concret pour sa visioconférence : son terminal est capable d'émettre et de recevoir à des débits théoriques pouvant atteindre 540 Mbit/s (mégabits par seconde) dans des conditions optimales. En pratique, Amina mesure régulièrement des débits entre 50 et 250 Mbit/s en réception, et 10 à 40 Mbit/s en émission - des performances qui rivalisent avec la fibre d'Elodie dans bien des zones urbaines. Pour situer ces performances, rappelons qu’un flux vidéo HD nécessite environ 2 à 4 Mbit/s. Avec un débit d’émission d’environ 20 Mbit/s, Amina peut transmettre son image avec une compression moins agressive et de meilleure qualité tandis qu’une latence de l’ordre de 30 ms assure une interaction fluide avec Élodie et Gabriel. Cette qualité de communication repose sur une organisation temporelle précise : sur une seconde d’échange, l’antenne consacre environ 74 ms à l’émission du flux d’Amina et 926 ms à la réception de ceux de ses interlocuteurs. Cette répartition optimise la transmission et limite la latence perçue.

Le fonctionnement de ces constellations s’appuie sur un modèle économique qui rompt avec celui des satellites GEO traditionnels, autrefois construits à l’unité pour 300 à 500 millions de dollars (*ESA – European Space Agency, Telecommunications satellites overview)*. Starlink adopte une logique industrielle fondée sur la production de masse et le renouvellement programmé. Chaque satellite, standardisé et de faible masse (≈ 260 kg, selon *FCC, SpaceX Starlink constellation filings ; McDowell, Jonathan’s Space Pages*), est estimé à un coût variant entre 250 000 $ et 500 000 $ estimé par des analyses industrielles (Morgan Stanley, SpaceNews, Space Economy Reports (2020–2024) et est conçu pour fonctionner 5 à 7 ans avant de se désintégrer en fin de vie *(FCC, Starlink orbital lifetime and deorbit plans)*. L’usage des lanceurs Falcon 9 réutilisables réduit fortement les coûts d’accès à l’espace (Falcon User Guide, Capabilities & Services). Les volumes illustrent ce changement d’échelle : plus de 10 000 satellites auront été lancés fin 2025, dont environ 1 300 retirés, pour une flotte active proche de 8 000 unités. Avec des lancements de 60 satellites plusieurs fois par mois, la constellation est en renouvellement permanent : la résilience repose sur la quantité et le rythme de remplacement plutôt que sur la longévité individuelle (*McDowell, J., Starlink satellite catalog, Harvard–Smithsonian CfA*). L’investissement total est estimé à 10 à 15 milliards de dollars selon (Morgan Stanley, *Starlink total CAPEX estimates*). La rentabilité dépend de millions d’utilisateurs, mais aussi de marchés à forte valeur comme le maritime, l’aérien, les

gouvernements et le secteur militaire. Avec plus de 3 millions de clients et un chiffre d'affaires approchant 7 milliards de dollars en 2024, selon Bloomberg et le Financial Times, Starlink atteint la rentabilité opérationnelle. Cette performance s'explique par une intégration verticale complète : fabrication, lancement, réseau au sol et service client.

La connexion d'Amina s'inscrit également dans un contexte géopolitique marqué. En situation de crise – conflits, catastrophes climatiques – les infrastructures terrestres peuvent être détruites, alors qu'un réseau LEO peut rétablir rapidement des communications performantes. Les constellations deviennent ainsi des infrastructures critiques, conférant un avantage stratégique aux opérateurs et aux États qui les contrôlent. Cette dimension de souveraineté explique l'émergence de programmes nationaux ou régionaux : IRIS pour l'Union européenne, Guowang en Chine, Sfera en Russie, ainsi que des initiatives en Inde et dans les pays du Golfe. La compétition ne relève plus seulement du marché, mais de la maîtrise d'un outil essentiel de sécurité et d'indépendance numérique.

Le paysage concurrentiel reflète parfaitement cette nouvelle ère de tensions et d'ambitions. Face au colosse Starlink, on trouve Eutelsat OneWeb (~ 650 satellites à 1200 km), visant stratégiquement les marchés institutionnels B2B et gouvernementaux, le géant Amazon, entrant dans l'arène avec son Project Kuiper, promet une intégration parfaite avec son empire cloud AWS, les opérateurs historiques de satellites GEO (Viasat, SES, Intelsat), tentant de survivre en développant des systèmes hybrides. Starlink conserve néanmoins l'avantage décisif du *first mover* et d'une intégration verticale que personne ne peut égaler à court terme.

Quelques millisecondes après son clic, le visage d'Amina apparaît nettement sur l'écran d'Élodie à Paris. Cette connexion illustre la matérialité du numérique dans les zones où les infrastructures terrestres sont limitées et marque une évolution des modes d'accès au réseau. Alors que plus de 95 % du trafic mondial transite par les câbles sous-marins et moins de 1 % par satellite, les constellations en orbite basse ne visent pas à remplacer la fibre : elles la complètent en apportant un service là où les réseaux terrestres sont difficiles à déployer. L'enjeu est d'offrir un accès haut débit à faible latence aux 3 à 4 milliards de personnes encore mal ou non connectées, tout en renforçant la résilience des communications critiques. Le modèle économique des constellations LEO repose sur la production de masse de satellites standardisés, une durée de vie courte favorisant le renouvellement technologique, des lancements à faible coût grâce aux fusées réutilisables, et une intégration verticale qui réduit les coûts opérationnels et facilite un déploiement à grande échelle. L'orbite basse devient ainsi un complément aux réseaux fibre et hertziens. Le trajet du clic d'Amina, autrefois impossible, est désormais courant et contribue à réduire les inégalités d'accès au numérique. Sa visioconférence, en apparence banale, témoigne de l'intégration progressive de cette économie de la constellation dans l'écosystème mondial, ajoutant une dimension verticale aux réseaux et redéfinissant la couverture numérique à l'échelle planétaire.

Le clic de Gabriel : les communications cellulaires de longue portée, un espace libre

L'infrastructure des télécommunications en Nouvelle-Calédonie représente un investissement stratégique majeur du fait de l'insularité et de l'éloignement géographique. La dépendance aux câbles sous-marins internationaux en particulier Gondwana-1 et Gondwana-2 impose des coûts élevés de déploiement, de maintenance et de sécurisation, avec un impact direct sur le prix final des services numériques. Le déploiement de la fibre

optique progresse, mais reste limité par la dispersion de l'habitat et la topographie, ce qui rend le coût par abonné nettement supérieur à celui observé en métropole.

Dans ce contexte, le réseau mobile 4G et désormais 5G constitue une composante essentielle de l'accès à Internet : il offre une couverture plus homogène, nécessite moins d'infrastructures physiques par foyer et permet d'assurer une continuité de service dans les zones où la fibre n'est pas déployée. Pour de nombreux ménages, la connexion domestique repose ainsi sur une box 4G/5G ou un partage de connexion mobile, faisant du réseau cellulaire non seulement un complément, mais un pilier de la connectivité quotidienne du territoire. Cette situation illustre que, dans les territoires isolés, la performance économique et sociale dépend étroitement de la robustesse du réseau mobile.

Le clic de Gabriel est transmis sous forme d'onde électromagnétique qui doit traverser l'air et subir les contraintes de l'environnement : distance, obstacles et conditions géographiques. Cette propagation entraîne une atténuation, mesurée en décibels, qui correspond à la diminution progressive de la puissance du signal. Une perte de 10 dB divise la puissance par dix, et 20 dB par cent, ce qui illustre la sensibilité du signal aux obstacles et à l'éloignement de l'antenne. Cette baisse de puissance réduit directement le rapport signal/bruit (SNR), paramètre essentiel pour une transmission fiable. Lorsque le SNR diminue, le réseau doit abaisser le débit pour maintenir la qualité de communication, ce qui explique la dégradation progressive de la performance radio lorsque l'atténuation augmente.

En espace libre, l'affaiblissement du signal suit la relation : $P_r = P_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$

où P_t est la puissance émise, P_r la puissance reçue, d la distance l'émetteur-récepteur et λ la longueur d'onde. La puissance reçue P_r chute donc proportionnellement à l'inverse du carré de la distance $\frac{1}{d^2}$. Dans un environnement réel, il faut ajouter les pertes dues aux obstacles (murs, végétation, relief), modélisées en décibels :

$$A_{dB} = A_{espace\ libre} + A_{obstacles} + A_{diffraction}$$

La diminution de puissance reçue entraîne directement une diminution du rapport signal/bruit (SNR) :

$$SNR = \frac{P_r}{P_{bruit}}$$

La capacité maximale du canal radio est alors limitée par la loi de Shannon (voir page)

Toute perte supplémentaire en dB fait baisser P_r et donc le SNR et limite le débit disponible. C'est ce qui explique les variations de flux en 4G/5G selon la distance à l'antenne ou la présence d'obstacles.

Imaginons une communication 4G avec une bande passante de travail : B = 20 MHz

- Cas n°1 : sans pertes supplémentaires SNR = 100 (soit 20 dB)
  D = 20. 106 × log2(1 + 100) = 133 $Mbit/s$
- Cas n°2 : avec 20 dB de pertes en plus : le SNR est divisé par 100 : SNR = 1 (0 dB)
  D = 20. 106 × log2(1 + 1) = 20 $Mbit/s$

On voit qu'une perte de 20 dB fait passer le débit théorique maximal d'environ 133 Mbit/s à 20 Mbit/s. Dans un réseau 4G, la puissance reçue chute avec la distance. Une perte de 20 dB correspond approximativement à :

- un éloignement de quelques centaines de mètres à 1 km, en terrain dégagé, (200 m à 800 m d'une antenne, selon la fréquence utilisée)
- passage derrière un obstacle simple : un mur épais en béton (immeuble, infrastructure), une façade d'habitation dense, un mur + vitrage + cloison intérieure, une voiture avec vitres fermées dans une zone de réception moyenne

En termes de qualité de service, 20 dB de perte fait passer d'un excellent débit (50–150 Mbit/s) à un débit dégradé (5–20 Mbit/s).

Si les transmissions hertziennes apparaissent fragiles au regard des atténuations, des obstacles et des variations du rapport signal/bruit, leur rôle dépasse la seule dimension technique. Elles constituent un pilier sociétal majeur, en particulier dans les territoires isolés ou faiblement raccordés, comme le montre l'exemple de la Nouvelle-Calédonie où plus de 540 sites mobiles assurent une couverture 4G atteignant 99 % de la population. Dans ces contextes, l'infrastructure radio[136] représente plus qu'un canal complémentaire : elle devient la condition d'un accès équitable aux services essentiels, éducation, santé, démarches administratives et communications d'urgence.

[136] Voir ressource pédagogique : Réseau de communication: la technologie GSM-R

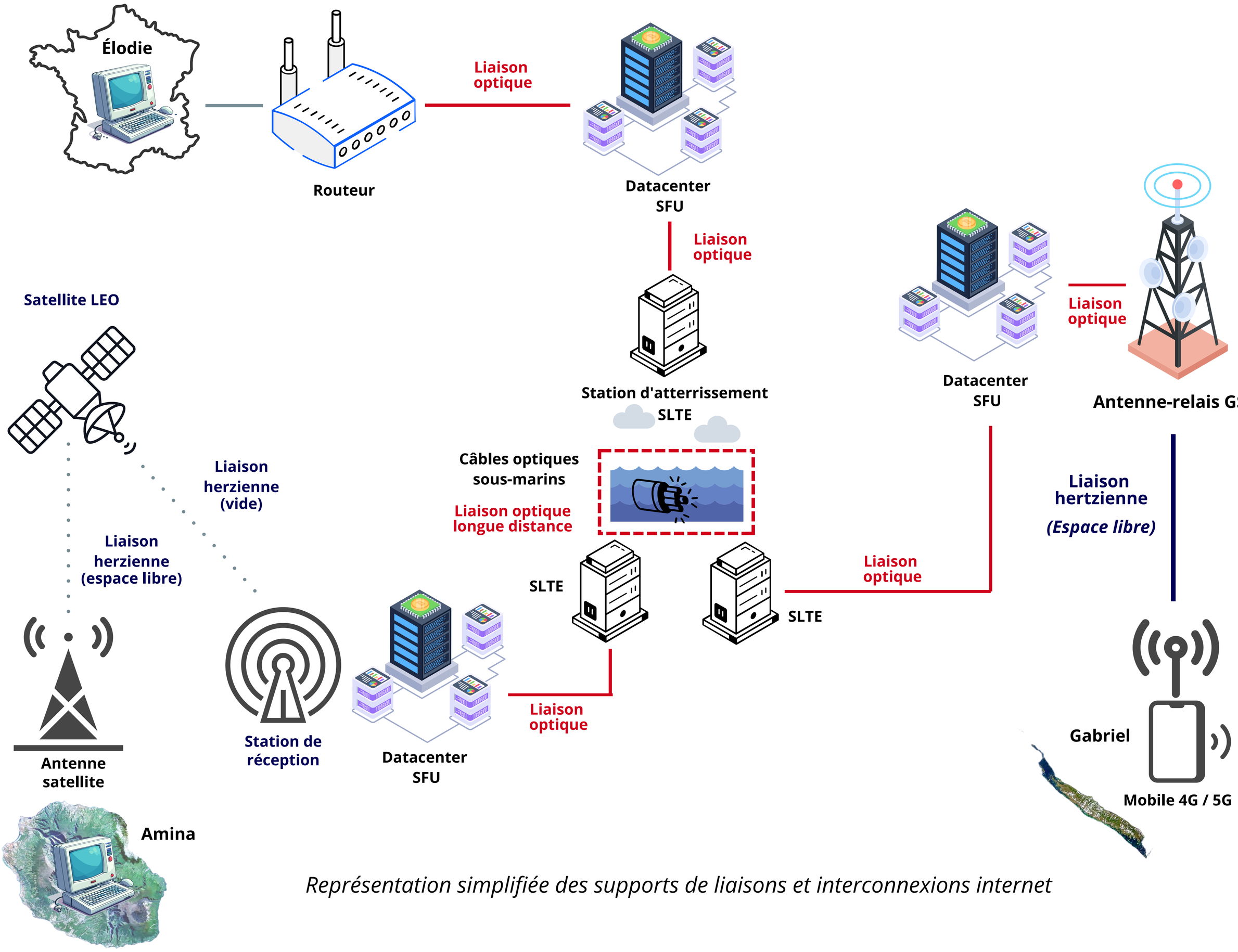
Sur le plan économique, les réseaux 4G et 5G jouent un rôle déterminant dans les zones où le déploiement de la fibre est coûteux ou techniquement difficile. Leur installation demandant moins de travaux de génie civil, offre un déploiement plus rapide et permet d'amortir les investissements sur un plus grand nombre d'utilisateurs. Les opérateurs s'appuient d'ailleurs sur une analyse fine du spectre radio, ressource publique rare, dont l'attribution conditionne les capacités de débit, la qualité de service et même la compétitivité des territoires.

Plusieurs événements survenus en Europe au cours de l'année 2023, notamment lors d'épisodes climatiques extrêmes en France (tempête Ciarán en novembre 2023) et en Italie (inondations en Émilie-Romagne au printemps 2023), ont mis en évidence la vulnérabilité des infrastructures filaires de télécommunication. Dans certaines zones touchées par des coupures simultanées d'alimentation électrique et de réseaux de fibre optique, les communications n'ont pu être maintenues que grâce au réseau mobile, via des stations de

base disposant d'une autonomie temporaire assurée par batteries ou groupes électrogènes. Ces situations, documentées par les autorités de régulation et de protection civile, ont rappelé que l'infrastructure hertzienne, malgré ses propres vulnérabilités physiques, peut constituer un ultime filet de sécurité pour les communications, en particulier dans les territoires ruraux, insulaires ou faiblement maillés.

Ainsi, loin d'être un simple canal soumis aux aléas de la propagation, le réseau hertzien occupe une place centrale dans l'écosystème numérique : il structure l'aménagement du territoire, soutient la continuité de service des infrastructures critiques et contribue à réduire les fractures numériques. Son intégration dans le parcours du clic de Gabriel n'illustre pas seulement un cas particulier : elle témoigne de l'importance stratégique de ces réseaux dans un monde où l'internet fixe n'est ni omniprésent ni universel, et où la robustesse des communications dépend autant de la physique que de choix économiques et sociétaux.

Le parcours des données d'Élodie, d'Amina et de Gabriel met en évidence un constat fondamental : derrière l'apparente immatérialité du numérique se déploient des infrastructures massives, coûteuses, énergivores et profondément ancrées dans les territoires comme dans l'espace mondial. Fibre optique, câbles sous-marins, constellations de satellites en orbite basse et réseaux 4G/5G reposent sur des principes physiques distincts, mais concourent à un même objectif : garantir la circulation continue, rapide et fiable de l'information.



Représentation simplifiée des supports de liaisons et interconnexions internet

Ces trois chemins révèlent des contrastes structurants, la fibre, support principal du trafic mondial, offre des débits exceptionnels et une latence minimale, au prix d'investissements lourds, d'opérations de maintenance complexes et d'une forte dépendance géopolitique. Les constellations satellitaires LEO, en bouleversant les modèles hérités du GEO, redistribuent les équilibres entre acteurs et nations, tout en posant des enjeux environnementaux, techniques et stratégiques inédits. Les réseaux hertziens 4G/5G, omniprésents dans la vie quotidienne, rappellent combien la diffusion du numérique dépend d'infrastructures locales denses, d'une maîtrise du spectre radio et d'un arbitrage permanent entre couverture, qualité de service et contraintes physiques. À cette matérialité technologique s'ajoutent les trois piliers du développement durable. Sur le plan économique, les choix d'architecture mobilisent des investissements majeurs, orientent les modèles d'affaires et conditionnent l'accès des territoires au haut débit. Sur le plan environnemental, l'empreinte des réseaux, la fabrication des équipements, la consommation énergétique, la maintenance, la mise en orbite et fin de vie des systèmes interrogent leur soutenabilité. Sur le plan sociétal enfin, ces infrastructures déterminent l'égalité d'accès, la réduction des fractures numériques et la résilience des communications dans un monde toujours plus connecté. En refermant ce développement, une évidence s'impose : le numérique n'a jamais été aussi matériel.

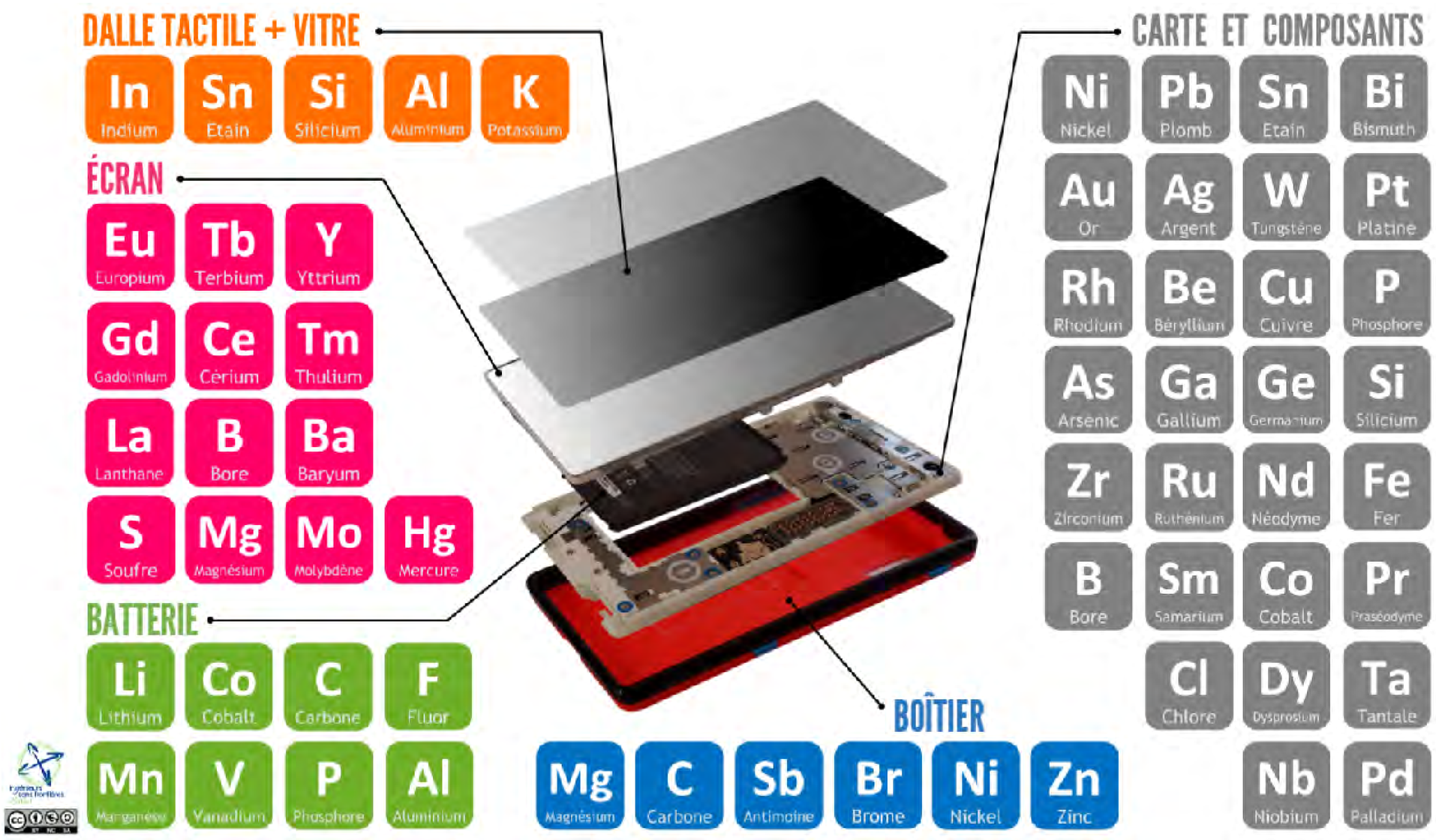
L’enseignement de la technologie au collège contribue également à aborder et déconstruire la rhétorique de l'immatérialité qui entoure souvent le numérique. Les approches développées dans les deux premiers thèmes du programme mettent en lumière la matérialité du numérique en s'appuyant sur l'étude des objets et systèmes techniques (OST) à travers le triptyque **Matière, Énergie, Information (MEI)**.

Le thème « **Les objets et les systèmes techniques : leurs usages et leurs interactions à découvrir et analyser** » vise à amener les élèves à étudier les objets et les systèmes techniques qui les entourent en décrivant leur fonctionnement global, les usages raisonnés et détournés ainsi que l’incidence de leurs usages sur notre environnement.

La séquence « Utiliser les objets connectés, est-ce polluer ? » de l’**académie de Créteil**, initialement élaborée dans le cadre des programmes de 2016 pour des élèves de 3e, peut être partiellement réinvestie pour mobiliser des compétences du nouveau programme. Au cours de la première séance, l’élève complète une frise chronologique retraçant l’évolution des objets connectés en précisant la forme d’énergie nécessaire pour fonctionner, les principaux matériaux et le principe de fonctionnement.

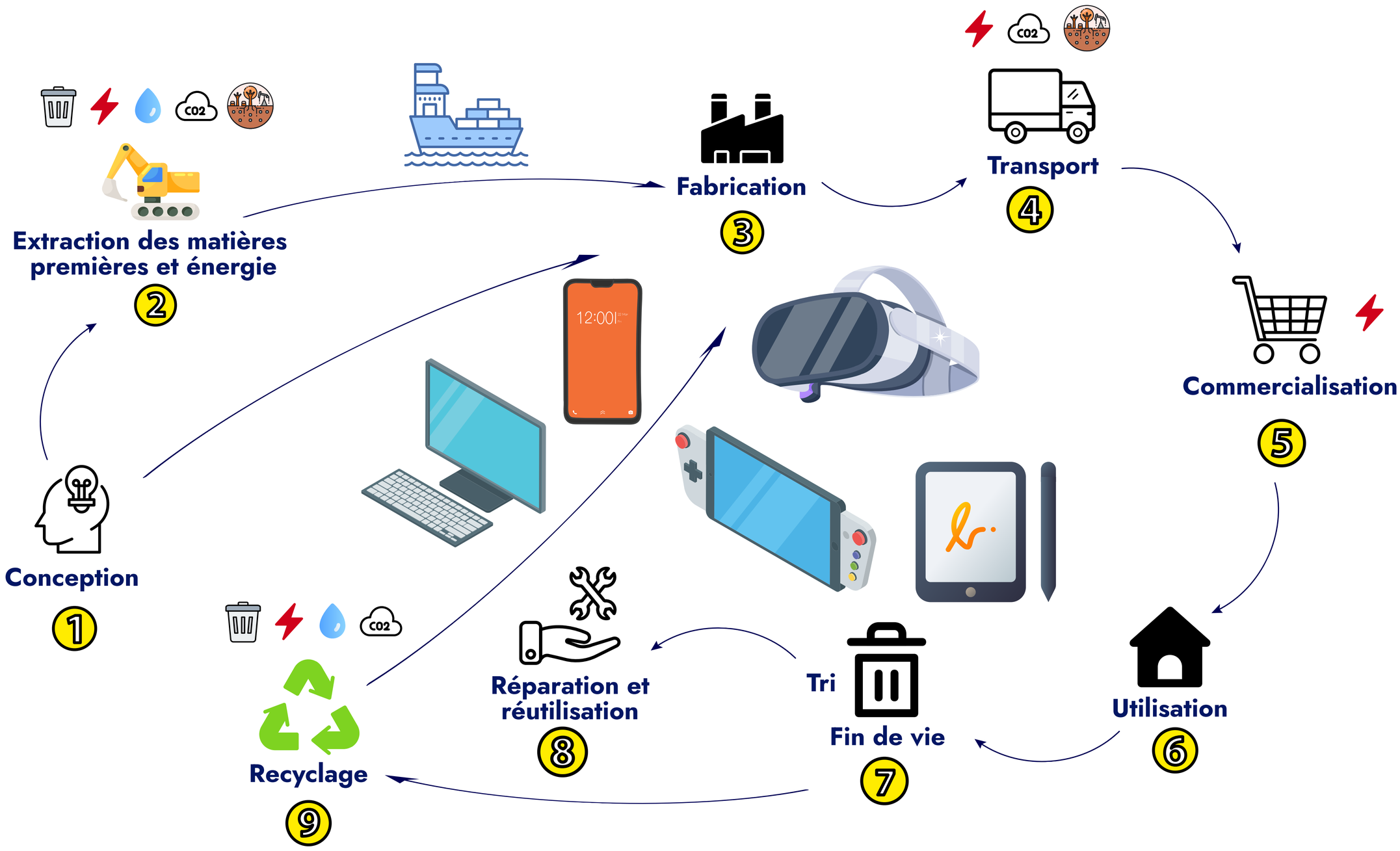
Avec les ajustements nécessaires, cette tâche peut introduire progressivement les enjeux liés à la matérialité du numérique et mettre en œuvre la compétence consistant à « **repérer pour un OST les matériaux, les sources et les formes d’énergie ainsi que les éléments du traitement de l’information** » attendue en classe de 5e. L’élève identifie la nature des matériaux des objets numériques : plastiques, verre, métaux courants (cuivre, aluminium), métaux précieux (or, argent) et métaux dits « technologiques » incluant les terres rares (néodyme, cobalt, lithium). Les ressources associées détaillent la composition chimique des objets connectés, *smartphones*, tablettes, téléviseurs, casques de réalité virtuelle, ordinateurs et consoles de jeux, en listant les éléments du tableau périodique mobilisés dans leur fabrication (voir ci-après l'outil interactif développé par ISF SystExt)[136].

[136] Voir aussi l'infographie du CEA p. 21 du dossier



Au cours de la séance suivante, l’élève est amené à analyser et quantifier les impacts environnementaux et sociétaux de ces objets à chaque étape de leur confection, de l’extraction des matières premières à la fabrication, la commercialisation, l’utilisation

et à la fin de vie. Déconstruisant la rhétorique de l'immatérialité, implique nécessairement d'en aborder les conséquences environnementales : l'élève identifie les étapes du cycle de vie d'un OST influencées par les choix de matériaux et d'énergie pour évaluer les impacts environnementaux : épuisement des ressources, émissions de gaz à effet de serre, pollution des sols et de l'eau, production de déchets électroniques.

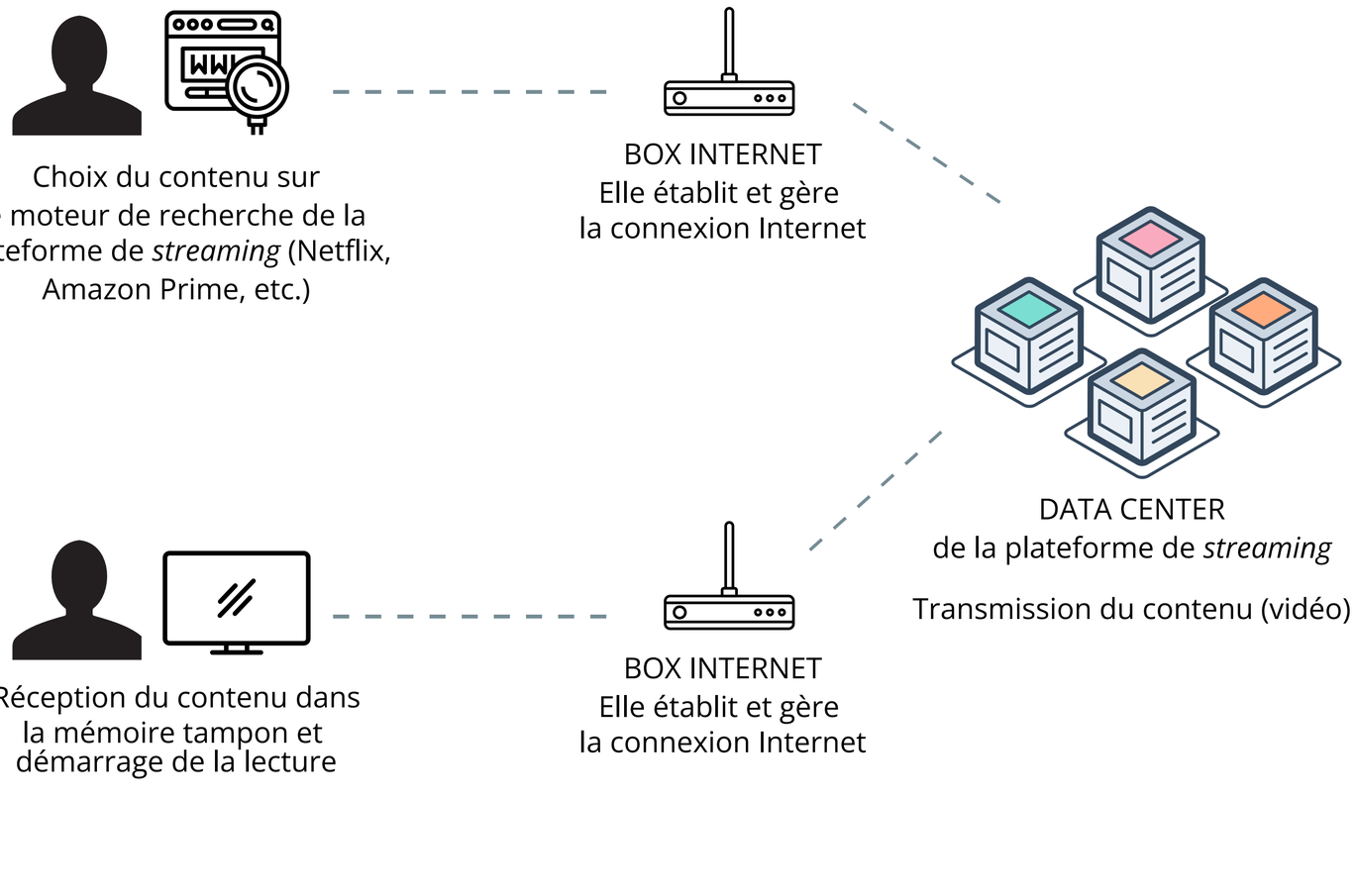


Extrait adapté de la ressource de la séquence « Utiliser les objets connectés, est-ce polluer? » de l'académie de Créteil qui présente le cycle de vie des objets connectés

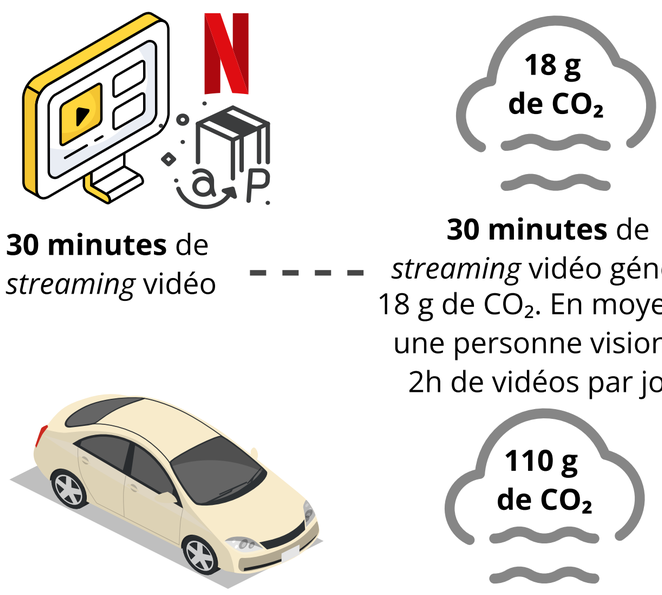
Il prend connaissance du fonctionnement des services numériques courants comme l'envoi d'un courriel, d'une requête web, du *streaming* vidéo, du jeu en ligne ou de l'utilisation des réseaux sociaux en mettant en lumière le rôle des centres de données, des réseaux câblés et des antennes. Les élèves découvrent que chaque service numérique repose sur des équipements physiques : serveurs, routeurs, systèmes de refroidissement, et qu'il génère une consommation énergétique considérable. Pour prendre réellement conscience de ces impacts, il est indispensable de les quantifier : donner des ordres de grandeur permet d'objectiver les effets du numérique sur l'environnement et d'en comprendre la portée.

À titre d'exemple, la fabrication d'un ordinateur de 2 kg implique selon l'Ademe l'extraction et la mobilisation de 800 kg de matières premières et de 1,5 tonne d'eau. Cette seule étape de fabrication émet environ 183 kg de CO_2e, tandis que la phase d'usage de cet ordinateur représente, en comparaison, seulement 7,6 kg de CO_2e.

Le *streaming* vidéo, comment ça marche ?



Les flux vidéo génèrent en 2019 80% des flux de données mondiaux et plus de 300 millions de tonnes de CO_2 par an soit 20% du total des émissions de gaz à effet de serre liées au numérique, soit 1% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (sources : rapport du The Shift Project (2019) et article de l'Ademe)



Extrait adapté de la ressource de la séquence « Utiliser les objets connectés, est-ce polluer? » de l'académie de Créteil qui présente le fonctionnement simplifié de la transmission de contenus en streaming et son impact sur l'environnement

Exprimer une quantité de rejets en kilogrammes de CO_2 équivalent peut rester très abstrait pour les élèves : cette unité, bien qu'indispensable scientifiquement, ne renvoie à aucune expérience sensible. Établir une correspondance avec une distance parcourue en voiture permet alors de donner corps à l'information et de la rendre immédiatement compréhensible. La mise en équivalence donne un ordre de grandeur concret : elle aide chacun à visualiser l'impact d'un usage numérique en le comparant à une situation familière du quotidien. Cette transposition rend possible une véritable prise de conscience, car elle permet de mesurer que des actions perçues comme « immatérielles » peuvent générer des émissions comparables à celles d'un déplacement physique.

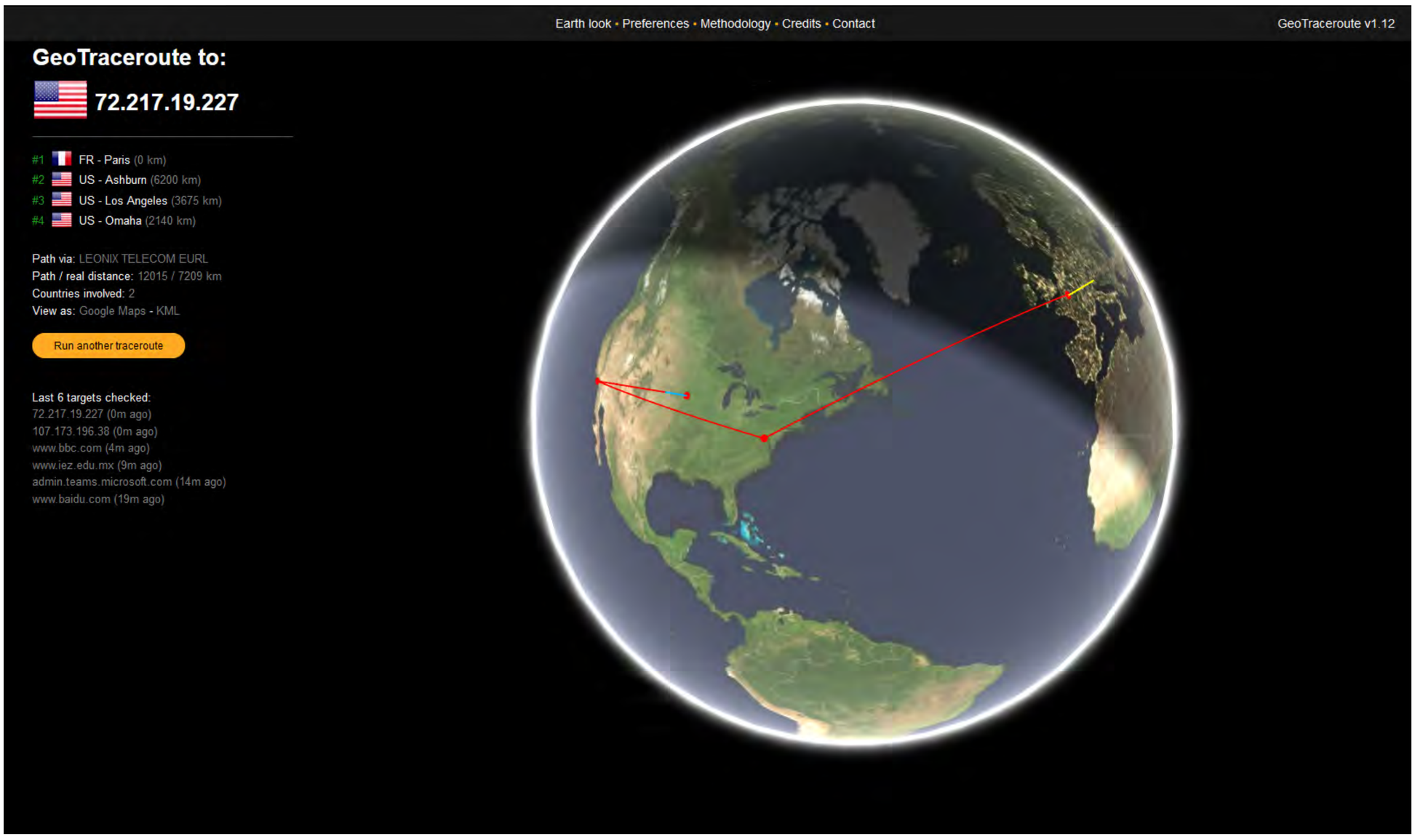
Cette mise en perspective des impacts amorcent le développement de la compétence consistant à **choisir un OST et argumenter ce choix en prenant en compte son cycle de vie et les trois piliers du développement durable**. Les ressources abordent aussi les conséquences sociales, telles que l'exploitation des enfants dans les mines de cobalt ou les conflits liés aux « minerais de sang ». Au-delà des objets eux-mêmes, la séquence permet donc d'explorer les infrastructures invisibles qui permettent aux services sollicités quotidiennement de répondre aux besoins des individus.

Le thème « **Structure, fonctionnement, comportement : des objets et des systèmes techniques à comprendre** » permet d'explorer l'intérieur des OST de manière à révéler le substrat infrastructurel des systèmes et des artefacts numériques en caractérisant l'organisation interne par la chaîne d'énergie et la chaîne d'information. L'élève étudie la circulation physique des données dans les réseaux locaux et Internet et identifie les composants matériels. L'enseignement confronte l'élève à des situations concrètes de dépannage ou de réparation qui sont des exemples de friction qui révèlent la matérialité invisible des systèmes techniques. La séquence sur le fonctionnement d'un réseau informatique de l'académie d'Orléans-Tours a aussi pour objectif de déconstruire la rhétorique de l'immatérialité du numérique en amenant les élèves à visualiser concrètement les éléments matériels qui rendent possible la communication.
Pensée pour des classes de 4e ou de 3e, elle permet d'aborder la problématique « **Comment fonctionne le réseau informatique du collège ?** ».

Dans la première séance, consacrée à l'étude des différents éléments présents dans un réseau informatique et à son architecture, les élèves observent une vidéo qui leur permet d'identifier le poste client, l'imprimante réseau, le commutateur, la borne WiFi, le modem-routeur ou encore le serveur. Cette activité conduit l'élève à identifier les composants qui constituent un réseau local (terminaux, commutateurs, liaisons filaires et sans fil) et sa topologie, dans l'objectif de réaliser le schéma du réseau du collège. Le fait de représenter les liaisons filaires et non filaires les amène également à exercer la compétence de fin de cycle « **Décrire et caractériser l'organisation interne d'un objet ou d'un système technique et ses échanges avec son environnement (énergies, données)** », car ils comprennent que la circulation de l'information dépend de connexions matérielles identifiables. Par la mise en forme schématique des relations entre les objets techniques, ils répondent enfin en partie à l'exigence d' « **identifier, selon les cas, leur mise en forme, leur transmission ou leur stockage dans des fichiers afin de comprendre le fonctionnement de l'OST** », puisqu'ils traduisent des éléments matériels en représentations abstraites.

La deuxième séance, consacrée à l'identification des équipements du réseau grâce à un logiciel d'analyse, place les élèves dans une situation où ils doivent reconnaître le nom, la nature et l'adresse IP des terminaux. En découvrant que chaque appareil possède une adresse IP unique et que celle-ci est attribuée par un serveur DHCP, ils mettent directement en œuvre la compétence de 5e qui demande de « **justifier la nécessité d'identifier les terminaux pour communiquer sur un réseau local** », puisqu'ils comprennent que la communication réseau repose sur cette identification. Ils mobilisent également la connaissance portant sur **le rôle et la structure d'une adresse IP** . Cette exploration permet d'aborder la compétence de fin de cycle consistant à « **décrire et caractériser l'organisation interne d'un objet ou d'un système technique et ses échanges avec son environnement (énergies, données)** », car les élèves constatent que la circulation des données dépend d'une organisation logique et technique des identités numériques au sein du réseau. En apprenant que l'attribution des adresses est automatisée par un serveur, ils rejoignent aussi les attendus du programme de 4e et 3e qui prévoient l'étude de l'architecture des réseaux locaux .

La dernière séance, qui porte sur le fonctionnement d'Internet, conduit les élèves à comprendre que chaque site web est associé à une adresse IP et que le protocole DNS permet de traduire un nom de domaine en adresse IP. En explorant ce mécanisme, ils développent la compétence qui consiste à « **identifier et représenter la circulation d'une information dans le réseau Internet** », puisque la résolution d'un nom de domaine n'est que la première étape du cheminement des données. L'utilisation d'un outil de traçage de route leur permet ensuite d'observer concrètement la succession des routeurs traversés, ce qui les amène à mobiliser la compétence qui demande de « **justifier la nécessité d'un protocole de routage pour faire communiquer plusieurs réseaux** ». En visualisant que l'information circule dans une infrastructure physique constituée de serveurs, de routeurs et de réseaux interconnectés, les élèves développent de nouveau la compétence de fin de cycle consistant à « **décrire et caractériser l'organisation interne d'un système technique et ses échanges avec son environnement** », cette fois à l'échelle d'un système mondial. Cette activité pédagogique met en évidence la matérialité de l'infrastructure mondiale (routeurs, serveurs, multiples réseaux) généralement occultée par l'imaginaire du « cloud ».



Capture d'écran du logiciel en ligne https://geotraceroute.com permettant de visualiser l'itinéraire d'un paquet IP vers n'importe quel hôte

L'enseignement de la technologie au collège agit comme le démontage d'une montre connectée : là où la rhétorique de l'immatérialité ne montre que l'heure ou les données de santé sur l'écran, cet enseignement ouvre le boîtier pour révéler les composants de la chaîne d'énergie et celle de la chaîne d'information, les métaux critiques utilisés pour fabriquer la batterie et le besoin d'entretien et de réparation. La séquence en classe de 5e « Les voitures autonomes, ou comment conduire une voiture sans chauffeur ? » menée dans l'**académie d'Orléans-Tours** montre que les systèmes numériques sont ancrés dans une réalité physique en analysant le fonctionnement et en réparant un robot pédagogique qui modélise le fonctionnement de la voiture autonome.

Dans la deuxième séance, le professeur a volontairement créé des pannes sur les robots (batterie usée, câble d'alimentation coupé, roue abîmée, moteur défectueux). Chaque groupe dispose d'un robot qui refuse de démarrer ou d'avancer. Les élèves observent ce robot et émettent des hypothèses qui expliqueraient les causes possibles de la panne. Cette tâche, qui consiste à relier les dysfonctionnements à des éléments techniques, permet de viser la compétence « **Associer des solutions techniques à une ou des fonctions techniques** » car ils identifient le rôle des pièces dans le fonctionnement global. Une des hypothèses émises concerne la circulation de l'énergie, il est alors nécessaire de compléter le schéma de la chaîne d'énergie qui permet d'en représenter la circulation dans l'OST. Cette activité permet de cibler la compétence « **Identifier des constituants de la chaîne d'énergie d'un objet technique (l'organisation de la chaîne d'énergie étant fournie)** ». Ils précisent ensuite la nature des énergies en entrée et en sortie, ce qui permet de mobiliser la compétence « **Indiquer la nature des énergies en entrée et en sortie des constituants de la chaîne d'énergie** ». Ils identifient que les piles ou la batterie ont pour fonction de stocker l'énergie électrique nécessaire. Les moteurs ont la fonction de convertir l'énergie électrique en énergie cinétique, et les roues, celle de transmettre ce mouvement au sol.

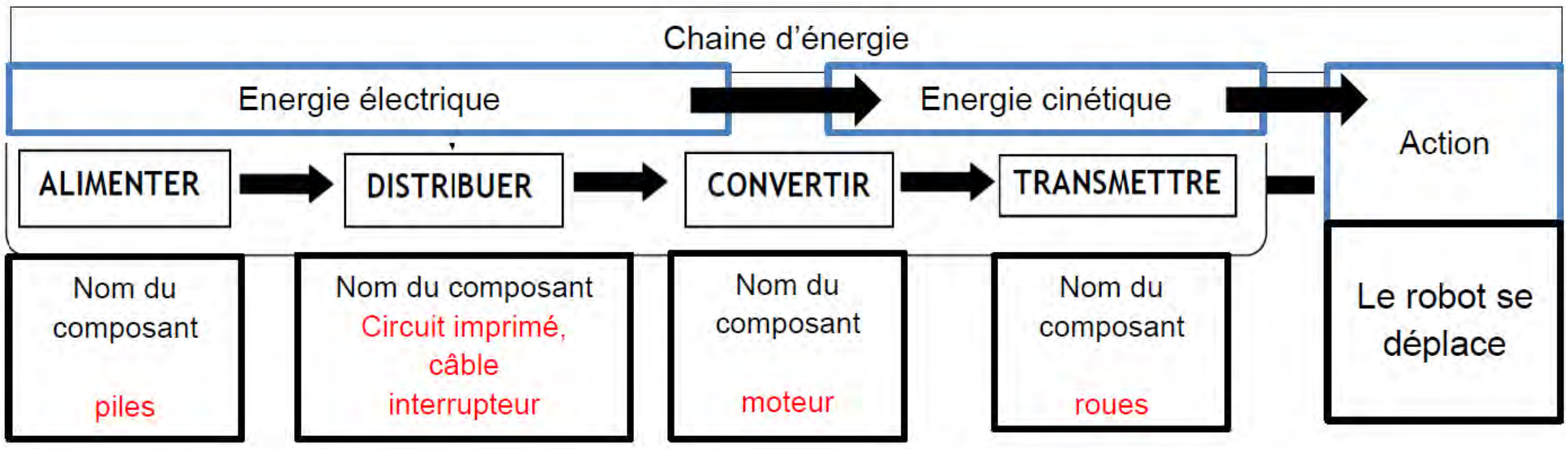


Schéma de la chaîne d'énergie du robot pédagogique modélisant le fonctionnement de la voiture autonome

Guidés par le protocole de réparation, les élèves remplacent la pièce défectueuse (roue, batterie ou moteur) et testent le bon fonctionnement du robot. Cette tâche, qui mobilise des gestes techniques, permet de traiter les compétences « **Repérer visuellement une pièce défectueuse** » et « **réaliser une réparation en suivant un protocole fourni** ».

Lors de la séance suivante, les élèves sont plongés dans une situation concrète : la voiture autonome s'arrête trop tard quand la voiture située devant s'arrête. Cela exige de laisser une plus grande distance de sécurité et l'activation d'un signal sonore quand la voiture de devant est trop proche. Les élèves proposent alors des solutions techniques. Ils sont ainsi amenés à identifier le composant qui permet de mesurer la distance entre les deux voitures puis à compléter le schéma de la chaîne d'information, ce qui permet de travailler la compétence « **Identifier des constituants de la chaîne d'information d'un OST** ».
Les constituants de ladite chaîne d'information devant être identifiés sont le capteur à ultrasons, qui acquiert l'information (la distance entre deux véhicules), la carte programmable qui permet de traiter l'information selon le programme enregistré pour savoir ce que la voiture doit faire. Les ordres sont communiqués à la chaîne d'énergie grâce à des câbles, et des informations sont communiquées au conducteur via des DEL (feux rouges) et le *buzzer* (signal sonore).

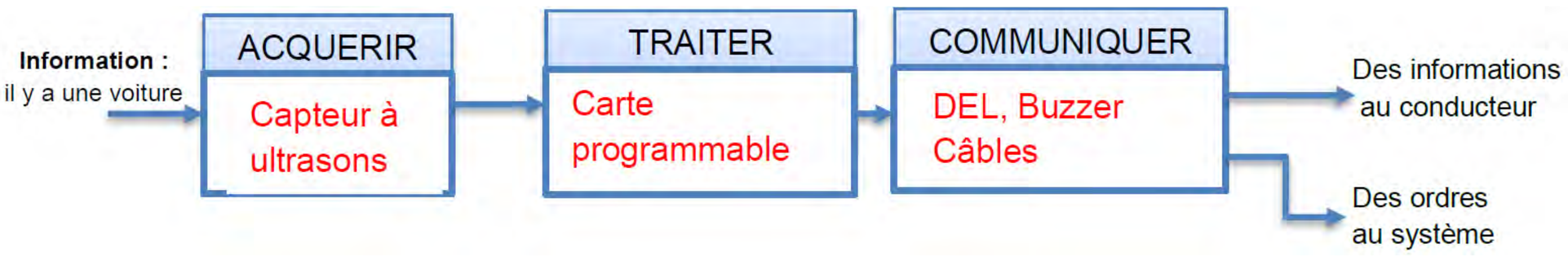


Schéma de la chaîne d'information du robot pédagogique modélisant le fonctionnement de la voiture autonome

L'étude des chaînes d'énergie et d'information démontre aux élèves que la circulation de l'énergie et de l'information nécessaire au fonctionnement de la voiture autonome a bien une réalité matérielle : le programme, implémenté dans une carte électronique, ne peut fonctionner qu'avec les données d'entrée provenant des capteurs à ultrasons. Ces données circulent à travers les câbles pour piloter les actionneurs (moteurs). Cette activité aide à comprendre le fonctionnement des voitures autonomes et, plus largement, celui des objets et systèmes techniques. Elle s'inscrit dans le « tournant matériel », qui vise à révéler la dimension physique du numérique et à déconstruire l'idée d'« immatérialité ».

Après avoir étudié la chaîne d'énergie et la chaîne d'information du robot pédagogique, il est possible d'élargir la réflexion à l'échelle réelle des véhicules autonomes. Ces systèmes ne se limitent pas à des capteurs embarqués : ils reposent sur une connectivité avancée pour échanger en temps réel des données avec leur environnement. Les voitures autonomes doivent analyser en continu leur environnement (autres véhicules, piétons, état de la chaussée) et prendre des décisions en une fraction de seconde. Cela implique

la transmission de volumes massifs de données avec une latence minimale ce qui est possible grâce à la 5G :

- un débit jusqu'à 10 fois supérieur à la 4G, pour faire transiter des flux vidéo HD, des cartes dynamiques et des données de capteurs ;
- une latence ultra-faible (quelques millisecondes), essentielle pour la sécurité : détecter un obstacle et réagir instantanément ;
- une densité de connexion inédite (jusqu'à un million d'objets connectés par km^2), permettant la communication simultanée entre véhicules, infrastructures et piétons.

Le déploiement de la 5G soulève des questions sanitaires sur l'exposition aux ondes électromagnétiques. Les mesures de l'ANFR montrent que, même avec la 5G activée, les niveaux d'exposition restent très inférieurs aux limites réglementaires (en moyenne 30 fois en dessous des seuils) malgré une légère hausse liée à l'augmentation du trafic. Ces données sont accessibles sur Cartoradio, qui propose une cartographie des antennes 5G et des mesures d'exposition sur tout le territoire. Cette ressource peut être exploitée en classe pour localiser les antennes proches du collège et discuter des enjeux de santé publique et de régulation.

150 Bibliographie

- Aresu, A. (2023). Le centre invisible de la technologie mondiale : percer le secret d'ASML. *Le Grand Continent*. https://legrandcontinent.eu/fr/2023/05/10/le-centre-invisible-de-la-technologie-mondiale-percer-le-secret-dasml
- Blake, M. F. (1998). *The films of Lon Chaney*. Vestal Press.
- Boillat, A. (2007). *Du bonimenteur à la voix-over : voix-attraction et voix-narration au cinéma*. Antipodes.
- Boltanski, C. (2011). *Minerais de sang : les esclaves du monde moderne*. Grasset.
- Coelho, O. (2025). *Géopolitique du numérique : l'impérialisme à pas de géants* (Nouvelle édition revue et augmentée). Éditions de l'Atelier.
- Collectif GéoXXI (Ed.). (2025). *Géographies, un dictionnaire*. CNRS éditions.
- Collet, I. (2025). *Le numérique est l'affaire de toutes*. Le Bord de l'Eau.
- Combs, C. S. (2014). *Deathwatch : American film, technology, and the end of life*. Columbia university press.
- Cortopassi, G. (2025). Sanaz Sohrabi, scenes of extraction. *Espace art actuel* , (141), 94.
- Des câbles aux satellites, l'Internet sans fil. (2025). [Émission]. https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-science-cqfd/reseaux-systeme-spatial-hybride-5488977
- Diguet, C. (2024). *Data centers : enjeux énergétiques et territoriaux* . Commission nationale de l'informatique et des libertés. https://video.cnil.fr/w/fsbmspMHCru5i4PJtsHF9S
- Fanen, S. (2017). Rien ne sera plus comme avant. Comment le MP3 a mangé le disque. In *Boulevard du stream : du MP3 à Deezer, la musique libérée* (p. 21-68). Le Castor Astral.
- Ficher, M. (2025). Invisibilisation infrastructurelle de l'IA. *Terrain*, (82), 187-201.
- Guien, J. (2025). *Le désir de nouveautés : l'obsolescence au cœur du capitalisme (XV^e - XXI^e siècle)*. La Découverte.
- Hache, E., Normand , É., & Roche, C. (2024). Exploitation des fonds marins : un nouveau clivage géopolitique ? *Polytechnique Insights*. https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/geopolitique/exploitation-des-fonds-marins-un-nouveau-clivage-geopolitique
- Hankin, M. (2008). *Ray Harryhausen : Master of the Majicks*. Archive Editions LLC.
- Haraway, D. (2017). Anthropocène, Capitalocène, Plantationocène, Chthulucène. Faire des parents. *Multitudes*, 4(65), 78. https://www.multitudes.net/anthropocene-capitalocene-plantationocene-chthulucene-faire-des-parents
- Haraway, D. J., & García, V. (2020). *Vivre avec le trouble*. les Éditions des Mondes à faire.
- Henry, B., & Marigny, J. (2009). *« Freaks » : de la nouvelle au film.* Rouge profond.
- Hölzl, I., & Marie, R. (2015). *Softimage : towards a new theory of the digital image*. Intellect.
- Institut FMES. (2025). Les câbles électriques sous-marins en Europe. *Fondation Méditerranéenne d'Études Stratégiques*. https://fmes-france.org/les-cables-electriques-sous-marins-en-europe
- Internet Actu. (2020). Œuvrer à l'émergence d'un « autre numérique » est-il une impasse ? *Uzbek & Rica*. https://usbeketrica.com/fr/article/oeuvrer-emergence-autre-numerique-est-il-impasse
- Jacobson, B. R. (2025). *The cinema of extractions : film materials and their forms. Columbia University Press.*

151 Bibliographie

- Laugée, F. (2023). Splinternet. *La revue européenne des médias et du numérique*. https://la-rem.eu/2023/01/splinternet

- Lauvin, R. (2024). *Le cinéma des formes furtives : résister en images au regard surveillant*. Éditions Mimésis.

- Melleton, J., Tuduri, J., & Serrand, A.-S. (2025). Ressources minérales : de quoi parle-t-on ? *Science & pseudo-sciences*, (352). https://www.afis.org/Ressources-minerales-de-quoi-parle-t-on

- Mollier , P. (2020). Extraire des métaux avec des plantes : l'agromine. *INRAE*. https://www.inrae.fr/actualites/extraire-metaux-plantes-lagromine

- Monnin, A. (2020). Au-delà du low tech : technologies zombies, soutenabilité et inventions. *Ritimo*. https://www.ritimo.org/Au-dela-du-low-tech-technologies-zombies-soutenabilite-et-inventions

- Monnin, A. (2023). *Politiser le renoncement*. Éditions Divergences.

- Nova, N. (avec Disnovation.org). (2024). *Bestiaire de l'anthropocène*. Art&fiction.

- Nyhan, J. (2023). *Hidden and devalued feminised labour in the digital humanities : on the Index Thomisticus project 1965-67*. Routledge, Taylor & Francis group.

- Paci, V. (2012). *La machine à voir*. Presses universitaires du Septentrion.

- Pasco, X. (2024). *La ruée vers l'espace : Nouveaux enjeux géopolitiques*. Tallandier.

- Régnauld, I., & Saint-Martin, A. (2024). *Une histoire de la conquête spatiale : des fusées nazies aux astrocapitalistes du New Space*. la Fabrique éditions.

- Sauvage, B. (s. d.). Emmanuel Van der Auwera – Dans le désert du réel. *Débordements*. Consulté 18 décembre 2025, à l'adresse https://debordements.fr/emmanuel-van-der-auwera

- Skal, D. J., & Savada, E. (2025). *Dark carnival : The secret world of Tod Browning, Hollywood's master of the macabre* (Revised and expand. ed). University of Minnesota Press.

- Somaini, A. (2025). *Le monde selon l'IA : explorer les espaces latents*. JBE Books × Jeu de Paume.

- Starosielski, N. (2015). *The undersea network*. Duke university press.

- Subramanian, S. (2025). *The web beneath the waves : the fragile cables that connect our world*. Columbia Global Reports 2025.

- TACTIC (Éd.). (2024). La matérialité du numérique. *Curseurs*, (4).

- Tessier, L. (2025). *Scroller : l'art de faire défiler la vie*. MkF éditions.

- Utop'ia. (2025). EPFL Press.

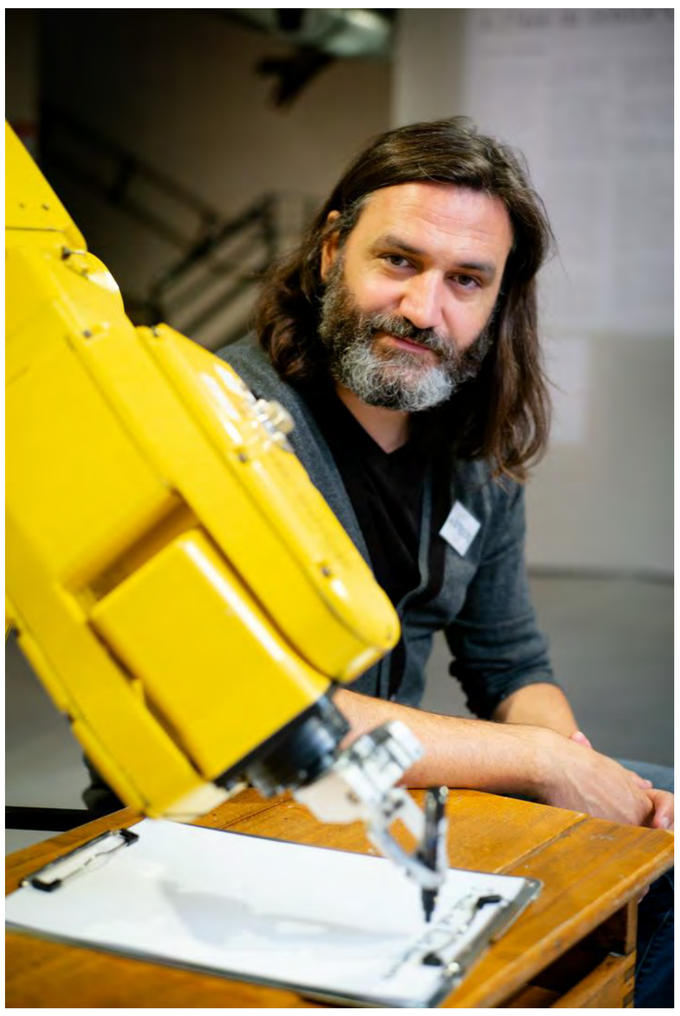
- Vitali-Rosati, M. (2024). *Éloge du bug : être libre à l'époque du numérique*. Zones.

- Wood, B. (2018). *Tod Browning, une vie avec les freaks*. la Librairie du jouet.

Postface

© Filipe Vilas-Boas. Congo Soap | *Le savon des princes du Congo, 2025. Smartphone-shaped soap*. Avec l'aimable autorisation de F. Vilas-Boas. Droits réservés.

> **Le savon des princes du Congo fait dialoguer deux époques et rappelle que, malgré les siècles, le Congo reste une terre dont les ressources nourrissent des prospérités extérieures, pendant que ses populations et ses paysages en portent le poids invisible.**
>
> – *Filipe Vilas-Boas*



© E. Richard/Maif Social Club. Avec l'aimable autorisation de Filipe Vilas-Boas. Droits réservés.

Filipe Vilas-Boas est un artiste né au Portugal en 1981. Il vit et travaille à Ivry. Artiste conceptuel jouant de la porosité entre les mondes IRL et URL, ses créations combinent récupération, détournement et nouveaux médias. Il explore en particulier les accès et les excès du numérique et tente d'en matérialiser les implications éthiques et esthétiques. Une sélection protéiforme d'œuvres opérée parmi ses nombreuses réalisations peut être consultée sur le site https://filipevilasboas.com. On y retrouve par exemple des photographies de perfomances, des vidéos comme *Le poinçonneur de l'IA* ou le *Scrollathon* – ironisant sur les mécanismes comportementaux que nous avons incorporé dans notre vie numérique et en particulier l'addiction à la consultation des *smartphones* – ou encore *Human Beeing*, sculpture et jeu d'anticipation botanique.

L'artiste a publié sur son site, *Congo Soap*, œuvre qui détourne un produit du passé colonial pour interroger notre présent. Au XIX^{e} siècle, **Victor Vaissier** construisait un empire industriel autour du « Savon des Princes du Congo », objet de consommation auréolé d'exotisme. Par la publicité et l'imagerie coloniale, le Congo devenait un nom, une marque, une promesse d'hygiène et de luxe destinée à la bourgeoisie européenne, sans que la réalité sociale de ce territoire n'entre jamais en compte. Aujourd'hui, l'œuvre transpose ce savon dans une nouvelle matérialité : des blocs de savon taillés en forme de *smartphones*. Ce choix est tout sauf anodin. Derrière l'apparente propreté de nos téléphones, se cachent les coulisses obscures de l'extraction minière en RDC. Coltan, cobalt et autres minerais stratégiques, essentiels aux batteries et circuits, sont arrachés à la terre dans des conditions marquées par des violations sociales et environnementales graves.

Sur le *plan social*, l'extraction repose trop souvent sur des travailleurs précarisés, parfois des enfants, confrontés à des risques sanitaires extrêmes et à l'absence de protection. Les revenus tirés de cette richesse ne bénéficient guère aux communautés locales, perpétuant une logique d'exploitation héritée de l'époque coloniale. Sur le *plan environnemental*, l'exploitation minière ravage les sols et les forêts, pollue les rivières et détruit des écosystèmes dont dépendent des milliers de personnes. Le cycle de production des smartphones, au-delà de son image high-tech et immaculée, repose donc sur une empreinte écologique lourde et inégalement répartie.

Le *savon-smartphone* devient alors un symbole ironique : il illustre comment les grandes entreprises de la téléphonie se lavent les mains des conséquences de leur chaîne d'approvisionnement. Tout comme le savon de Vaissier servait à masquer, hier, une relation inégalitaire au Congo derrière un vernis d'exotisme, le *smartphone-savon* met aujourd'hui en scène l'illusion d'une propreté technologique, qui efface les salissures sociales et environnementales d'un commerce mondialisé. Le savon des princes du Congo fait dialoguer deux époques et rappelle que, malgré les siècles, la République démocratique du Congo reste une terre dont les ressources nourrissent des prospérités extérieures, pendant que ses populations et ses paysages en portent le poids invisible.

Filipe Vilas-Boas

Bureau de l’accompagnement des usages et de l’expérience utilisateur DNE - TN3

dne.lettre-edunum@education.gouv.fr

Vous recevez cette lettre car vous êtes abonné aux Cahiers ÉduNum thématique.
Souhaitez-vous continuer à recevoir les Cahiers ÉduNum thématique ?

Abonnement/Désabonnement

À tout moment, vous disposez d’un droit d’accès, de rectification et de suppression des données qui vous concernent (articles 15 et suivants du RGPD).
Pour consulter nos mentions légales, cliquez ici.

ISSN 2739-8846 (en ligne)

@Edu_Num