



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



COMITÉ de la PRÉVENTION  
et de la PRÉCAUTION

# SANTÉ PUBLIQUE ET ENVIRONNEMENT NUMÉRIQUE

Rapport du

Comité de la prévention  
et de la précaution

-

26 Janvier 2022



## Contributeurs

---

Philippe Boudes

Cécile Chevrier

Bruno Frachon

Patrick Gaudray

Alain Grimfeld

André-Jean Guérin

Philippe Hubert

Frédéric Jorand

Armand Lattes

Francelyne Marano

Bernard Salles

## Coordination éditoriale

---

Alain Grimfeld

Martin Rémondet

Sylvain Rotillon

## Appui rédactionnel

---

Juan Asensio

Ce rapport est disponible en ligne à l'adresse suivante :

<https://cpp.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/cpp/les-rapports/>



## Le Comité de la prévention et de la précaution (CPP)

---

Créé en juillet 1996 et actif depuis, le Comité de la prévention et de la précaution (CPP) est composé d'une vingtaine de personnalités scientifiques reconnues pour leurs compétences dans les domaines les plus divers de l'environnement et de la santé. Cette composition illustre une volonté d'interdisciplinarité et de liaison active entre la recherche et la société civile. Présidé par le professeur Alain Grimfeld, il se trouve actuellement fondé sur le décret du 26 décembre 2014, pris en application de la loi du 13 avril 2013 relative à l'indépendance de l'expertise en matière de santé publique et à la protection des lanceurs d'alerte. Il y figure au titre de comité spécialisé de la Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé publique et d'environnement.

Les travaux du Comité de la prévention et de la précaution ont depuis sa création pour objectif de proposer une expertise indépendante et pluraliste en appui aux politiques publiques. Le comité a dès lors plusieurs missions :

- Contribuer à mieux fonder les politiques du ministère en charge de l'environnement sur les principes de précaution et de prévention ;
- Exercer une fonction de veille, d'alerte et d'expertise pour les problèmes de santé liés aux perturbations de l'environnement ;
- Faire le lien entre, d'une part, les actions de recherche et les connaissances scientifiques et, d'autre part, la décision publique et l'action réglementaire ;
- Formuler des avis, soit à la demande du ministre, soit par auto-saisine.

L'animation du Comité de la prévention et de la précaution et son secrétariat scientifique sont assurés par le service de la recherche et de l'innovation du ministère de la Transition écologique. Depuis sa séance inaugurale du 5 septembre 1996, il se réunit en séance plénière tous les mois ; le comité a publié à ce jour 22 avis et rapports.

Le Comité est à ce jour (arrêté du ministre d'Etat, ministre de la transition écologique et solidaire, en date du 16 février 2018) composé de :

Mme Isabella Annesi-Maesano ;  
M. Frédéric Bois ;  
M. Philippe Boudes ;  
Mme Cécile Chevrier ;  
Mme Christel Cournil ;  
M. Bruno Frachon ;  
M. Patrick Gaudray ;  
M. Alain Grimfeld ;  
M. André-Jean Guérin ;  
M. Philippe Hubert ;  
M. Pierre-Benoît Joly ;  
M. Frédéric Jorand ;  
M. Jean-Jacques Lataillade ;  
M. Armand Lattes ;  
M. Hervé Le Treut ;  
M. Clément Mabi ;  
Mme Francelyne Marano ;  
M. Charles Ollion ;  
M. Bernard Salles ;  
M. Jean-François Silvain ;  
M. François-Guy Trébulle ;  
M. Jacques Varet ;  
M. David Volle.



# SOMMAIRE

<b>Personnes auditionnées</b> .....	<b>9</b>
<b>Préambule</b> .....	<b>11</b>
<b>I. Environnement numérique et écologie</b> .....	<b>13</b>
A. Les objets et usages du numérique : ressources et impacts environnementaux.....	13
1. Les TNIC et l'environnement : principaux enjeux .....	13
2. Revue critique de la littérature .....	18
B. Utilisation des ressources minérales océaniques pour la fabrication des objets du numérique .....	23
C. Impacts environnementaux et sanitaires des éléments dits « terres rares » (ETR) : de l'activité minière aux objets du numérique .....	24
D. Consommation énergétique liée à l'utilisation du numérique .....	34
E. Impacts environnementaux du numérique .....	35
F. Le numérique à l'ère de l'anthropocène et des changements climatiques.....	36
G. Recommandations relatives à la partie I.....	37
<b>II. Environnement numérique et relations sociales</b> .....	<b>39</b>
A. Éléments généraux.....	39
1. Inégalités et reproduction sociale .....	39
2. Impact du numérique sur les configurations relationnelles et sociales.....	41
3. Quelles recommandations en matière de prévention et de protection contre la cyber-violence ?	42
4. L'évolution cérébrale et celle de nos comportements.....	46
5. Communication et savoirs à l'ère numérique .....	47
6. Le numérique et les « activités sociales et culturelles » .....	50
7. Numérique et dématérialisation .....	51
8. Accessibilité du numérique et handicap: l'exemple de l'accessibilité des sites Web .....	54
B. Numérique et âges de la vie.....	56
1. Numérique et enfance.....	56
2. Numérique et milieu de travail chez l'adulte .....	60
3. Numérique et personnes âgées .....	60
C. Numérique en médecine vétérinaire .....	62
D. Recommandations relatives à la partie II .....	69
<b>III. Pathologie liée au numérique en population générale</b> .....	<b>72</b>

A. Impacts des agents physiques liés à l’usage du numérique sur la santé humaine, en termes de morbidité (santé humaine et exposome numérique).....	72
1. La lumière bleue et les écrans .....	72
2. Impact sur la santé des radiofréquences et des applications associées dans le domaine de la téléphonie mobile sur la santé.....	81
B. Impacts sur les attitudes physiques en poste de travail .....	85
C. Impacts sur l’hypersédentarité.....	87
D. Numérique et addiction : le cas des jeux en ligne.....	92
E. Recommandations relatives à la partie III.....	94
<b>IV. Apports du numérique dans les activités de soin.....</b>	<b>98</b>
A. Les techniques numériques en pratique médicale : la vie réduite à la santé ?.....	98
B. Intelligence artificielle et médecine.....	107
D. Place du numérique en période de catastrophe sanitaire : l’exemple de la pandémie de Covid-19	111
E. Recommandations relatives à la partie IV.....	122
<b>Postface.....</b>	<b>125</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>128</b>



# Personnes auditionnées

Françoise BERTHOUD : ingénieure de recherche au CNRS, chercheuse au Laboratoire de Physique et modélisation des Milieux Condensés (Université Grenoble-Alpes/CNRS) et directrice du Groupement de Service *ÉcoInfo* : *Pour une informatique écoresponsable*.

Jean-Michel COSTES : socio-épidémiologiste. Directeur de l'Observatoire des jeux (devenu OFDT, Observatoire français des drogues et des tendances addictives). Direction de la recherche du ministère chargé de la Santé. Depuis huit années, mis à disposition au ministère des Finances pour évoquer une autre addiction, celle aux jeux d'argent.

Jean-François DELFRAISSY : médecin, professeur des universités. Spécialisé en immunologie. Président du Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé (CCNE).

Alexis DESCATHA : professeur de Médecine du travail. Chercheur à l'Institut de recherche en santé environnement et travail (Irset) au sein de l'équipe Épidémiologie en santé au travail et ergonomie. Champ de recherches : pathologies d'hyper-sollicitation appelées troubles musculo-squelettiques (TMS).

Pierre-Henri DUÉE : directeur de recherche honoraire de l'INRA. Ingénieur agronome et docteur d'État ès sciences naturelles. Président de la Section technique du CCNE.

Hugues FERREBŒUF : polytechnicien. Ingénieur du Corps des mines et diplômé de Télécom ParisTech (désormais Télécom Paris). Il fait partie du *think-tank The Shift Project*, acteur de la transition vers une économie décarbonée, où il conduit des travaux relatifs à l'impact énergétique et écologique de la transition numérique.

Jean-Gabriel GANASCIA : professeur de sciences informatiques à l'Université de la Sorbonne. Membre de l'Institut Universitaire de France. Spécialiste de l'intelligence artificielle.

José HALLOY : professeur de physique à l'Université Paris-Diderot, Sorbonne Paris Cité. Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain. Laboratoire interdisciplinaire consacré à l'étude de la transition énergie/climat.

24

Serge TISSERON : psychiatre. Docteur en psychologie. Chercheur associé à l'Université Paris-Diderot (CRPMS)-Paris 7.



# Préambule

Le développement et le déploiement des technologies numériques s'accompagnent, entre autres corollaires, de ce qui est interprété comme une « dématérialisation », une perte de contact direct avec le monde physique, remplacée par l'usage d'objets connectés, tandis que la numérisation elle-même permet de transmettre et traiter des données en masse.

Ces innovations impriment une forte dynamique évolutive à nos sociétés, mais elles questionnent également leurs valeurs intrinsèques, notamment en termes de progrès : s'agit-il d'un accroissement des performances, d'une amélioration qualitative des résultats consécutifs aux actions menées ou des deux ? Les termes « transition numérique » évoquent pour certains cette dynamique évolutive, faisant écho tant à l'appropriation sociale généralisée des technologies numériques qu'au « capitalisme financier numérique »<sup>1</sup> et à la rapidité d'évolution des technologies numériques.

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) définit **la santé** comme « un état de complet bien-être physique, mental et social [qui] ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité »<sup>2</sup>. La santé, *dans le présent document*, est comprise comme un triptyque associant l'absence de maladie, mais également l'accession au bien-être et l'épanouissement de la personne.

L'OMS, en 2002, définissait **la santé publique** comme « l'ensemble des efforts (développés) par les institutions publiques dans une société pour améliorer, promouvoir, protéger et restaurer la santé de la population grâce à une action collective ». Les marqueurs habituels de l'évolution de la santé publique sont, d'une part, la durée de vie globale (ou espérance de vie à la naissance), d'autre part la durée de vie en bonne santé (ou espérance de vie sans incapacité : EVSI).

À partir de ces définitions, un *esprit de veille* doit se manifester pour s'assurer que des régimes pertinents de **prévention** ou de **précaution** encadreront cette numérisation, dont les divers effets sur les systèmes de production, **l'économie et l'organisation sociétale** seront à dénombrer. Ces effets concernent notamment l'usage des ressources et les impacts environnementaux, qui sont peu pris en compte par la population, en dehors des personnes directement impliquées, notamment au plan professionnel.

Les impacts du numérique sur la santé humaine sont divers : ils concernent **des troubles visuels** liés à des effets physiques, ou d'autres comme la myopie, mais aussi des risques accrus, pour certains, de troubles musculo-squelettiques (TMS), un accroissement de la sédentarité ou encore la réduction du temps de sommeil, sans oublier les effets propres aux ondes électromagnétiques, un domaine encore très débattu. Ils sont également à mettre en lien avec **la fréquence de troubles psychologiques, notamment chez les enfants**.

Un point particulièrement inquiétant est relatif au fait que la généralisation du numérique dans l'ensemble des sphères sociales a pour conséquence de nous « charger » en permanence : nous vivons désormais dans une ambiance qui ne connaît aucun temps mort, un phénomène accru par le sentiment d'urgence lié précisément à l'usage du numérique, *comme s'il nous fallait répondre instantanément à tout et à tous*, ce qui peut avoir des incidences très fortes sur la façon dont nous sommes en relation avec le monde. L'usage du numérique génère encore une augmentation du stress et des risques de « *burn-out* », sans compter des phénomènes d'addiction.

Par ailleurs, il est nécessaire de citer **un impact de nature sociale** tenant dans le fait que l'usage de plus en plus répandu des technologies numériques provoque une croissance de comportements individualistes et un manque de possibilités de gestion collective de ces questions relatives au numérique.

---

<sup>1</sup> Boullier D. (2016), *Sociologie du numérique*, Armand Colin. Sauf indication contraire, la ville d'édition des livres mentionnés est Paris.

<sup>2</sup> La citation bibliographique de cette définition est la suivante : « Préambule à la Constitution de l'Organisation mondiale de la Santé, tel qu'adopté par la Conférence internationale sur la Santé, New York, 19 juin-22 juillet 1946, signé le 22 juillet 1946 par les représentants de 61 États (Actes officiels de l'Organisation mondiale de la santé, n° 2, p. 100) et entré en vigueur le 7 avril 1948 ». Cette définition n'a pas été modifiée depuis 1946.

Un autre fait inquiétant est celui de **la propagation des « fake news »** qui peuvent concerner la santé, comme le montre l'exemple des dangers associés prétendument à la vaccination. Le numérique peut ainsi alimenter des comportements de défiance vis-à-vis des positions et des décisions des experts et des autorités.

Nous entendons par **environnement numérique** la résultante et la combinaison de l'ensemble des composantes issues des technologies numériques, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leurs modes d'utilisation.

**Le Comité de la Prévention et de la Précaution (CPP)** s'est fixé pour objectif, dans le présent document, d'identifier ceux des impacts potentiels qui seront à authentifier et à maîtriser de manière prioritaire dans les domaines de la santé publique et de l'environnement, sans préjuger d'autres signaux pris en compte lors de l'analyse. Il s'agira ainsi de repérer, d'une part les effets possibles de ces nouvelles technologies sur la santé humaine, en termes notamment de morbidité, de capacités cognitives et de comportements relationnels, aux plans individuel et collectif, et, d'autre part, les répercussions sur l'environnement, intégrant les composantes environnementales, jusqu'à la durabilité des ressources inhérentes aux espèces animales et végétales.

Cette démarche est appelée à aboutir, le cas échéant, sur des propositions tangibles en termes soit de prévention, soit de précaution lorsque des dangers seront estimés plausibles quoique mal identifiés, mais avec des risques de dommages graves, irréversibles et coûteux pour la société. Elles seront exposées dans la partie **Recommandations** à la fin des chapitres correspondants.

Dans ce document, nous aborderons l'ensemble des enjeux numérique du point de vue de l'environnement, des relations sociales, des pathologies liées au numérique dans la population générale, et des apports du numérique dans les activités de soin.

*Nota* : tout au long de ce texte, seront utilisés indifféremment les termes : **Numérique**, **TNIC** (Technologies Numériques, Information et Communication) ou **TIC** (Technologies de l'Information et de la Communication), pour désigner les technologies numériques de l'information et de la communication.

Toutes les fois que cela a été possible, un lien Internet valide (à date) a été fourni pour les articles mis en ligne en libre accès.

# I. Environnement numérique et écologie

## A. Les objets et usages du numérique : ressources et impacts environnementaux

### Introduction

Marginale il y a encore quelques décennies, la protection de l'environnement, qu'elle soit considérée à l'échelle locale, continentale ou mondiale, est progressivement devenue un sujet central de préoccupation pour nos sociétés. Le concept de *développement*, émergeant après la Seconde Guerre mondiale, et la vague de décolonisation qui s'en est suivie, évolue en celui de *développement durable* approuvé par l'Organisation des Nations unies en 1992. Insuffisamment porteur de rupture, ce dernier se voit substituer par l'appellation de *transition écologique*.

Parallèlement, le déploiement rapide et généralisé ces dernières années des technologies de l'information et de la communication, ainsi que l'extension de leurs applications à des champs chaque jour plus nombreux et vastes, provoquent des interrogations concernant leurs incidences sur l'environnement.

Nous détaillerons ci-dessous les principaux enjeux environnementaux du numérique pour mettre en lumière ce qui peut être considéré comme favorable ou au contraire défavorable pour l'environnement. Nous reviendrons ensuite sur quelques points et questions saillants qui ont été retenus par le CPP à partir d'une revue critique de la littérature existante.

### 1. Les TNIC et l'environnement : principaux enjeux

Si l'on considère de façon globale et synthétique les innovations qui y sont liées, il nous faut constater que les technologies numériques de l'information et de la communication peuvent fournir un apport substantiel en faveur de l'environnement, tant dans le champ de la connaissance que dans celui de la protection ou même de la réduction de certaines consommations. De manière paradoxale, les infrastructures et les usages du numérique contribuent à leur tour à générer de nouvelles préoccupations d'ordre écologique. Approfondir et nourrir les interrogations contemporaines est alors indispensable, en essayant de chiffrer autant que faire se peut les éléments du débat.

#### Les TNIC aident à la prise en compte de l'environnement...

Il ne manque pas de gens pour louer tous les services que le numérique peut rendre à l'environnement et plus largement pour accéder à un développement durable<sup>3</sup>. On peut regrouper les bénéfices du numérique pour l'environnement de la manière suivante :

#### Mettre en œuvre la convention d'Aarhus

La convention internationale d'Aarhus, à l'initiative de laquelle la France et l'Europe ont contribué, prévoit la collecte et surtout la mise à disposition des données concernant l'environnement. Le Service d'observation et de statistique de l'environnement est le troisième service public de données après ceux de l'économie et du social.

---

<sup>3</sup> Le livre blanc *Numérique et Environnement* mentionne ainsi « *how digital solutions will drive progress towards the sustainable development goals* ». [http://systemtransformation-sdg.gesi.org/160608\\_GeSI\\_SystemTransformation.pdf](http://systemtransformation-sdg.gesi.org/160608_GeSI_SystemTransformation.pdf)

Le droit français intègre progressivement l'importance de la donnée et de son partage. La notion de *données d'intérêt général* est mentionnée par la loi pour une République numérique. En matière environnementale, les directives européennes sur l'information environnementale et l'information géographique invitent à une ouverture encore plus grande des informations liées à l'environnement. Les lois françaises récentes sur la transition énergétique et la croissance verte, ou encore la loi sur la biodiversité, comprennent des dispositions qui rendent obligatoire le partage de données. Le déploiement du numérique permet ainsi un partage de plus en plus large de ces informations.

### **Optimiser les objets techniques et leur utilisation**

L'efficacité de la conception assistée par ordinateur a déjà permis, par exemple, de : réduire le poids de matière première pour la réalisation de fonctionnalités améliorées (bouteilles plastique, etc.) ; optimiser le fonctionnement des moteurs ; calculer une isolation thermique dynamique des bâtiments, etc. Le fait de déployer et de généraliser l'écoconception et l'éco-gestion des produits et objets techniques doit permettre d'amoindrir certaines incidences de nos productions sur l'environnement, et le numérique peut contribuer à cette dynamique.

L'amélioration du fonctionnement des réseaux publics, notamment d'énergie et de transport, passe par la possibilité de mieux gérer les pointes et les effacements ou les flux de transports publics et de véhicules.

Les TNIC ouvrent la voie à une gestion fine du territoire, avec un potentiel énorme et déjà exploité en matière de cartographie, une agriculture de précision<sup>4</sup> ou une optimisation de l'utilisation des réserves d'eau, etc.

La crise sanitaire mondiale de la Covid-19 a imposé des confinements et une réduction drastique des déplacements. Bien des analystes considèrent que, celle-ci passée, nous ne reviendrons pas au régime *ante*. Le télétravail gardera une place accrue et les voyages d'affaires, notamment à longue distance, ne retrouveront pas les niveaux connus auparavant. Ce sont donc autant de déplacements en moins, donc d'une réduction de leurs incidences sur l'environnement qu'il faudra prendre en compte, à commencer par les émissions de gaz à effet de serre (GES).

### **Utiliser la numérisation et les réseaux sociaux au service de l'environnement**

Différents projets illustrent la capacité des outils du numérique à mobiliser les savoirs profanes et citoyens en faveur de l'environnement. On peut notamment citer :

- La réalisation d'une cartographie géographique multifactorielle plus ou moins automatisée. Les technologies spatiales et notamment l'observation de la Terre, couplées aux TIC, permettent déjà d'enregistrer et de conserver de très nombreuses observations sur l'évolution de nos écosystèmes à diverses échelles. Ensemble, ces technologies recèlent le potentiel de pouvoir s'assurer de la mise en œuvre d'engagements internationaux tels que ceux de l'Accord de Paris sur le climat issu de la COP21 en 2015.
- Le développement des projets de science participative, notamment en faveur du repérage de la présence des espèces, de la qualité des écosystèmes et de leurs évolutions (voir notamment les actions du Muséum National d'Histoire naturelle en la matière).
- L'existence de plateformes de co-utilisation pour les espaces de travail, d'habitation ou de loisir, pour les moyens de transport et notamment de véhicules motorisés, pour l'outillage, pour la constitution de circuits courts ou pour réduire le gaspillage alimentaire, etc.

---

<sup>4</sup> « Les méthodes de l'agriculture de précision promettent d'augmenter la quantité et la qualité de la production agricole tout en utilisant moins d'intrants (eau, énergie, engrais, pesticides, etc.) », extrait du rapport intitulé *L'agriculture de précision et l'avenir de l'agriculture en Europe*. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS\\_STU\(2016\)581892\\_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_FR.pdf)  
Il s'agit d'une étude de prospective scientifique commandée par le Parlement européen en décembre 2016.

## ... mais ils consomment des ressources et génèrent des pollutions<sup>5</sup>

« Les TNIC véhiculent une image de légèreté et d'absence de friction. Les coûts de transaction et les frais de transport sont ramenés quasiment à zéro. Leur effet sur l'écologie planétaire semble être nul. » Cependant, comme le soulignent Fabrice Flipo et Cédric Gossart dans un article de 2009<sup>6</sup>, non seulement les TIC ont « une existence matérielle de plus en plus encombrante, mais en plus la régulation de cette empreinte écologique ne semble pas aller dans le bon sens... ».

## Consommation d'énergie

La généralisation des outils numériques conduit à leur donner une part croissante dans la consommation énergétique de nos sociétés et, par là dans l'émission de gaz à effet de serre. Le périmètre des TIC est très étendu. Il comprend : les réseaux de télécommunication (d'accès et de transport, fixe, wifi et mobile) ; les *data centers* ; les terminaux : ordinateurs personnels (fixes et portables), tablettes, smartphones, téléphones portables traditionnels, « boxes », équipements audiovisuels connectés (y compris les téléviseurs connectés) ; les capteurs *IoT* (« *Internet of Things* », autrement dit l'Internet des objets, secteur en plein développement).

Selon les études publiées par *The Shift Project*<sup>7</sup>, les consommations d'énergie (essentiellement de l'électricité) imputables aux TIC, c'est-à-dire celles nécessaires pour la fabrication des produits et pour leurs usages, sont estimées à 2 000 TWh/an en 2013 et 3 000 TWh/an en 2018<sup>8</sup>. En rapportant la consommation électrique du numérique à la consommation mondiale d'électricité (elle-même en croissance de 3 % par an), cette proportion passe de 11 % en 2013 à 14 % en 2017, et atteint presque 16 % en 2020 par prolongation de la tendance actuelle<sup>9</sup>.

Mais, plus que la part de consommation finale d'énergie, c'est bien son évolution qui doit retenir notre attention. Divers scénarios<sup>10</sup> ont proposé de modéliser l'évolution du numérique sur la période 2010-2030. Tous prévoient un taux de croissance positif de la consommation finale d'énergie, à l'exception du seul scénario qui intègre un changement volontariste dans les pratiques de consommation (trafic, terminaux). Or, replacée dans cet ensemble de scénarios, l'évolution aujourd'hui constatée se rapproche du scénario qui comporte le taux de croissance le plus élevé.

Le taux de croissance de la consommation énergétique du numérique dans le monde atteint environ 9 % par an (période allant de l'année 2015 à 2020), correspondant à un doublement en 8 ans ; ainsi, la consommation énergétique du numérique s'élevait à 3,3 % de la consommation mondiale d'énergie en 2020<sup>11</sup>.

Concernant les incidences des développements à venir et spécialement celui de la 5G, de grandes incertitudes demeurent, comme le souligne le travail du Haut Conseil pour le Climat dans son rapport du 19 décembre 2020<sup>12</sup>.

---

<sup>5</sup> Les chiffres et commentaires de cette partie sont largement tirés de l'étude de TSP et en particulier du rapport *Lean ICT : Pour une sobriété numérique*. <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-final-v8-WEB.pdf>

Ils s'appuient tout autant sur les rapports et ouvrages analysés dans le rapport. Ils s'inspirent aussi des diverses auditions, notamment de celles de Hugues Ferrebœuf, José Halloy et Françoise Berthoud.

<sup>6</sup> Fabrice Flipo et Cédric Gossart, *Infrastructure numérique et environnement : l'impossible domestication de l'effet rebond*, Terminal, 103-104, 2009, mis en ligne le 1<sup>er</sup> juin 2018. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00957951/document>

<sup>7</sup> <https://theshiftproject.org/>

<sup>8</sup> À titre de comparaison, RTE chiffre à 473 TWh la consommation d'électricité de la France en 2019.

<sup>9</sup> Illustration des dérives dans l'utilisation du numérique : le *Bitcoin* qui, pour les besoins des calculs mis en œuvre pour sa *blockchain* et pour servir de support de spéculation ou d'échanges financiers douteux, aboutirait, selon Jean-Paul Delahaye, au « comble de l'absurde » ; voir l'article intitulé *Le comble de l'absurde : le cryptojacking des bitcoins* (in *Sciences et pseudosciences*, n°325, juillet-septembre 2018). Jean-Paul Delahaye est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique (CRISAL) de Lille.

<sup>10</sup> Cf. note 8.

<sup>11</sup> Les évolutions de la consommation énergétique et des émissions de CO<sub>2</sub> du numérique sont particulièrement détaillées dans le compte rendu de l'audition d'Hugues Ferrebœuf à la suite du rapport établi par *The Shift Project* sous sa direction.

<sup>12</sup> <https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/12/rapport-5g-haut-conseil-pour-le-climat.pdf>

## Contribution au réchauffement climatique

Toujours selon les estimations établies par *The Shift Project* tenant compte du mix électrique mondial, la part d'émissions de GES attribuable au numérique passerait ainsi de 2,5 % en 2013 à 4 % en 2020 (2,1 GtCO<sub>2</sub>eq). Ce chiffre est du même ordre de grandeur que ceux relatifs à des secteurs réputés beaucoup plus émetteurs de gaz à effet de serre : la part d'émissions de GES des véhicules légers (automobiles, motos...) est d'environ 8 % en 2018, alors que celle du transport aérien civil est d'environ 2 % en 2018. Toujours à titre de comparaison, *le numérique devrait émettre en 2020 autant de CO<sub>2</sub> que l'Inde en 2015*, pour la totalité de son milliard trois cent millions d'habitants consommant essentiellement des énergies fossiles.

Ici également, le plus préoccupant est le taux de croissance d'environ 8 % par an des émissions de GES dues au numérique. En effet, cette croissance doit s'analyser dorénavant au regard des objectifs de réduction des émissions de GES tels qu'ils ont été définis lors de la COP21. Or, alors que l'on peut espérer une baisse graduelle des émissions de GES totales à court terme, la part du numérique dans ces émissions va continuer, elle, à *augmenter et pourrait doubler d'ici 2025 pour atteindre 8 % des émissions mondiales*. Ce faisant, les émissions de GES dues au numérique seraient susceptibles d'annihiler de l'ordre de 20 % de l'effort de réduction global nécessaire.

Il faut souligner en outre une répartition contre-intuitive de l'attribution de ces émissions de GES. La phase de production des équipements occupe une part très significative, environ 45 % en 2020, dans l'empreinte énergétique totale du numérique, ainsi que dans les émissions de GES qui en découlent. Un utilisateur de *smartphone* (s'il garde son appareil 2 ans) verra ainsi la consommation énergétique totale induite au cours du cycle de vie de cet équipement se réaliser à plus de 90 % avant même son achat. Ce poids de la phase de production dans l'impact énergétique est de l'ordre de 60 % pour une télévision connectée mais est bien supérieur à 80 % pour un ordinateur portable.

Une bonne part des enjeux environnementaux du numérique n'est donc pas liée à l'usage que l'on en fait, mais en grande partie au volume de matériel produit et à son processus de production. Se pose dès lors de façon aiguë la question du remplacement (ou de l'évolution – une piste encore très largement négligée...) de ces matériels, pour des raisons d'effets de mode, d'augmentation de puissance ou de changement de normes technologiques (passage à la 5G par exemple).

## Utilisation massive de métaux et matériaux rares

Guillaume Pitron, dans son livre au titre accrocheur, *La guerre des métaux rares : la face cachée de la transition énergétique et numérique*, attire l'attention sur l'utilisation croissante de diverses ressources rares. Il n'est pas le premier.

Philippe Bihoux dénonce pour sa part un « mensonge », celui de la croissance verte<sup>13</sup>. Son expertise dans la connaissance de la consommation des métaux l'amène à plaider en faveur des *low tech*<sup>14</sup>. Il s'agit pour lui d'alerter sur l'illusion que pourrait constituer les *high tech* pour résoudre les crises environnementales actuelles.

Avec d'autres, les équipements des TIC, pour leur fabrication, sont fortement consommatrices de métaux, certains rares ou mêmes critiques. Le numérique est le principal utilisateur du gallium, de l'indium, du tantale, du ruthénium et du germanium. Chaque smartphone utilisé en contient des quantités plus ou moins grandes et contribue de fait à leur dispersion et aux pollutions afférentes.

S'inspirant des travaux de Hubbert Peak, le Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (ou LIED) animé par José Halloy a établi des courbes en cloche, basées sur les données historiques connues d'extraction

---

<sup>13</sup> Philippe Bihoux, par ailleurs auteur de *L'Âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* (2014, Seuil, coll. Anthropocène), a réalisé un entretien intitulé *Le mensonge de la croissance verte ?*, disponible en ligne. <https://www.youtube.com/watch?v=Bx9S8gvNKkA>

<sup>14</sup> Mentionnons à cette occasion le mouvement *Open Source Ecology* ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Open\\_Source\\_Ecology](https://fr.wikipedia.org/wiki/Open_Source_Ecology)), un réseau de fermiers, d'ingénieurs et de supporters dont l'objectif est la mise à disposition d'une plateforme technologique ouverte qui permet la production aisée des 50 machines industrielles nécessaires pour construire une petite civilisation avec tout le confort moderne (*Global Village Construction Set – GVCS*).



de différents éléments impliqués dans le numérique comme le gallium, l'indium, le lithium et le germanium. Ces courbes laissent entrevoir des pics de productions pour divers métaux et matériaux autour de 2050 et des tensions qui vont progressivement augmenter au fur et à mesure que nous avançons dans les courbes représentées. D'autres études, concernant les mines de cuivre dans le monde, montrent un pic qui aurait lieu là encore vers les années 2050.

Ces considérations rappellent que, en tout état de cause, *les consommations de matériaux atteignent des limites physiques*. Les diverses études mentionnées laissent à voir que ces limites pourraient s'imposer dans les prochaines années pour plusieurs matériaux plus ou moins rares. De surcroît, face à des consommations croissantes, *a fortiori* exponentielles, le recyclage, au demeurant pas toujours possible ni rentable<sup>15</sup>, même davantage généralisé et complet qu'il ne l'est aujourd'hui, ne ferait que *différer l'échéance*. En outre, le fait qu'un objet soit recyclable ne signifie pas systématiquement que cet objet et/ou les matériaux qui le composent seront effectivement recyclés. Il semble sur ce point ne pas y avoir d'alternative à une modération et une réduction des consommations de nombreux matériaux et métaux. Cette question est par ailleurs développée dans une partie spécifique de ce rapport.

### **Pollutions importantes en amont et en aval de la production des TNIC**

Les pollutions et graves dégradations environnementales liées à l'extraction des ressources minières nécessaires pour fabriquer les objets des TNIC sont trop souvent ignorées. Ces extractions ont été bien souvent reléguées loin de chez nous, dans des zones reculées de pays qui acceptent de jeter un voile sur les conditions sociales et environnementales de certaines des activités impliquées<sup>16</sup>. On sous-estime en particulier le très lourd impact de ces extractions sur l'eau : les quantités utilisées sont considérables et les pollutions engendrées dégradent pour longtemps les réservoirs disponibles.

Les déchets résultant de l'obsolescence rapide de ces objets bénéficient d'une plus grande attention, au moins dans nos pays sensibles à la qualité de l'environnement. La Directive 2002/96/CE vise ainsi à rendre obligatoire la *valorisation* des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE ou D3E). Encore faut-il que, comme mentionné plus haut, ces objets dits recyclables soient effectivement identifiés, collectés et recyclés, et non perdus dans une masse de déchets hétéroclites !

Malgré cela, de nombreux déchets électroniques quittent les pays développés vers les pays encore en sous-développement où toute une filière s'est mise en place comme à Accra au Ghana. Dans les années 2000, une partie des déchets exportés le sont plus facilement en étant présentés comme matériel d'occasion réutilisable, mais en réalité souvent inutilisable. De nombreux enfants démontent, trient et brûlent des déchets électroniques afin de récupérer les métaux comme le cuivre, et cela sans que des protections adéquates soient disponibles. Les autres débris non valorisés sont rejetés dans l'environnement ou brûlés, dégageant alors dans l'air, l'eau et les sols de nombreux produits toxiques pour l'environnement et l'homme. La Chine est également devenue depuis les années 1980 un cimetière pour les déchets électroniques<sup>17</sup>.

Le regard des journalistes permet de donner quelques coups de projecteurs sur un phénomène<sup>18</sup> qui, chaque année prend de l'ampleur.

### **Déchets électroniques : la pollution plus forte que jamais**

---

<sup>15</sup> On ne peut pas toujours recycler les métaux rares, par exemple ceux utilisés dans les téléphones portables : ils y sont présents en trop faibles quantités, le procédé de recyclage étant de fait trop complexe et trop coûteux. Le recyclage n'est donc pas toujours énergétiquement intéressant.

<sup>16</sup> Voir notamment l'article de la revue électronique *ADN* : *La guerre des métaux rares : le vrai coût écologique et géopolitique du tout numérique*.

<http://www.ladn.eu/tech-a-suivre/la-guerre-des-metaux-rares-le-vrai-cout-ecologique-et-geopolitique-du-tout-numerique/>

Voir aussi, dès 2011, l'article de *Novethic* : *Mongolie : les terres rares empoisonnent l'environnement*.

<https://www.novethic.fr/actualite/environnement/pollution/isr-rse/mongolie-les-terres-rares-empoisonnent-l-environnement-132199.html>

<sup>17</sup> Wikipédia, *Déchets d'équipements électriques et électroniques*.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chets\\_d%27%C3%A9quipements\\_%C3%A9lectriques\\_et\\_%C3%A9lectroniques](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chets_d%27%C3%A9quipements_%C3%A9lectriques_et_%C3%A9lectroniques)

<sup>18</sup> Par exemple, dans *Sciences et Avenir*, un article de Loïc Chauveau en date du 18 avril 2018, intitulé *La montagne des déchets électroniques continue de s'élever*.

[https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/pollution/les-volumes-de-dechets-electroniques-augmentent-dans-le-monde\\_123168](https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/pollution/les-volumes-de-dechets-electroniques-augmentent-dans-le-monde_123168)

Imprimantes, ordinateurs, *smartphones*... Les déchets électroniques s'accumulent à un rythme alarmant sans qu'ils soient recyclés. Des records ont été atteints avec 45 millions de tonnes. Un torrent de déchets électroniques se déverse sans discontinuer dans le monde. En 2016, il a atteint le pic de 44,7 millions de tonnes, soit 6,1 kg par habitant. C'est l'équivalent de 4 500 tours Eiffel. Un désastre environnemental qui devrait s'accélérer. Dans un rapport de l'Union internationale des télécommunications, les experts estiment que le volume de ces déchets devrait augmenter de 17% d'ici à 2021.

### **Mention « assez bien » pour l'Europe**

Actuellement, seuls 20 % des déchets électroniques sont recyclés en Europe. Le reste termine dans des incinérateurs ou des décharges (dont certaines sont sauvages néanmoins !). C'est dans les pays d'Océanie que la production de déchets électroniques par habitant est la plus forte : 17,3 kg, dont 6% seulement sont collectés et recyclés. L'Europe fait figure de bonne élève avec un taux de 35 % de déchets traités, contre 17 % en Amérique et 15 % en Asie. Selon les experts, tout reste à faire. Les progrès du recyclage s'avèrent trop lents<sup>19</sup>.

Mais, au total, le manque d'informations chiffrées, précises et fiables empêche de dresser un état des lieux de ces incidences négatives pour nos environnements et pour les milieux naturels.

En complément de ces impacts environnementaux délétères, il convient aussi de souligner les conditions sociales et sanitaires, parfois catastrophiques, dans lesquelles les exploitations minières et de première transformation de ces nombreux matériaux se développent et se pérennisent de par le monde. Et il en va de même en ce qui concerne la réception, le stockage et les éventuelles récupérations liés aux déchets des objets des TNIC.

## **2. Revue critique de la littérature**

Ces premiers constats sont alimentés par de nombreux études, travaux, documents, ouvrages, qui abordent les liens entre numérique et environnement. Ils s'appuient eux-mêmes sur des références académiques. Sans souci d'exhaustivité, il nous est apparu utile d'en mentionner certains ci-dessous et d'en donner des extraits pertinents ou de citer les experts rencontrés pour nourrir le propos de ce document.

### **- Cartographie des données du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer<sup>20</sup>**

En parallèle avec le projet de création d'une fonction de superviseur des données des ministères, la ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer a en 2016 chargé le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) d'une mission visant à réaliser une typologie des bases de données dudit Ministère et des outils de diffusion associés, dans la perspective de leur activation au service des politiques publiques, et en particulier de la transition énergétique et écologique.

Ce document fournit une vue extensive sur les nombreuses bases de données détenues et entretenues par le ministère de la Transition écologique.

### **- Rapports sur l'intelligence artificielle (IA)**

*France IA*, la stratégie française en intelligence artificielle, a été présentée le 21 mars 2017 à la Cité des Sciences et de l'Industrie, avec une introduction de Cédric Villani, mathématicien, Directeur de l'Institut Henri-Poincaré<sup>21</sup>. Le rapport de synthèse *#France IA*<sup>22</sup> mentionne de nombreuses autres sources et travaux : « En France, depuis plusieurs mois, de nombreux acteurs, des groupes de réflexion et des institutions se sont emparés des enjeux de l'IA. De nombreux documents ou autres initiatives en résultent : un colloque de l'Académie des Sciences a été organisé, plusieurs pôles de compétitivité ont publié des rapports ; l'Inria a

<sup>19</sup> France 2-France Télévisions le 18 décembre 2017 : *Déchets électroniques : la pollution plus forte que jamais*.

[https://www.francetvinfo.fr/internet/telephonie/dechets-electroniques-la-pollution-plus-forte-que-jamais\\_2520651.html](https://www.francetvinfo.fr/internet/telephonie/dechets-electroniques-la-pollution-plus-forte-que-jamais_2520651.html)

<sup>20</sup> *Cartographie des données du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer* – Rapport n° 010543-01 établi par Christian Levy et Dominique Marbouty, octobre 2016.

[http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/010543-01\\_rapport.pdf](http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/010543-01_rapport.pdf)

<sup>21</sup> Journée de l'IA le 21 mars 2017. <https://www.economie.gouv.fr/evenement-france-ia>

<sup>22</sup> *France Intelligence Artificielle* (2017), rapport de synthèse [anonyme] ; pour la présentation, <https://www.vie-publique.fr/rapport/36456-france-intelligence-artificielle-rapport-de-synthese>

proposé son livre blanc ; le rapport de l'Institut Mines-Télécom aborde les différentes formes d'intelligence artificielle dans une publication récente ; de très nombreuses soirées thématiques sont organisées dans divers lieux d'innovation ; les groupes d'échange comme Paris AI accueillent de plus en plus de membres ; le fonds ISAI a lancé l'initiative « *France is AI* » et a proposé une cartographie interactive des *start-ups* en IA ; un colloque de la Commission Supérieure du Numérique et des Postes a été organisé le 14 février 2017 à l'Assemblée nationale ; un rapport de l'OPECST sur l'intelligence artificielle est paru le 15 mars 2017 ; le CNRS met en place un nouveau Groupe de Recherche en Intelligence Artificielle présidé par le professeur Sébastien Konieczny ; plusieurs ouvrages de référence sont parus récemment ; le festival Futur en Seine 2017 aura pour thème l'IA, tout comme l'événement Vivatech par exemple. Ces initiatives ont permis de mettre en évidence l'excellence de la recherche française dans le domaine de l'IA et son potentiel de transfert pour des applications industrielles. Cependant, elles pointent aussi le risque pour la France de se faire distancer rapidement sur un terrain où la suprématie est assurée à l'heure actuelle par les grandes entreprises américaines et asiatiques. »

- **Donner un sens à l'intelligence artificielle – Pour une stratégie nationale et européenne**

23

Le sujet est traité dans un rapport coordonné par Cédric Villani, à la suite d'une mission parlementaire du 8 septembre 2017 au 8 mars 2018 confiée par le Premier Ministre Édouard Philippe.

Ce rapport aborde la question environnementale dans sa quatrième partie consacrée à la question de l'intelligence artificielle au service d'une économie plus écologique. Au premier chef, il met l'accent sur les limites que ne manquera pas de rencontrer la croissance exponentielle du numérique : « Plus que jamais, la révolution provoquée par le développement des usages et services numériques tend à occulter leur réalité industrielle et leurs impacts environnementaux. Et pourtant, il est urgent de les prendre en compte. Il y a déjà deux ans, l'association américaine des industriels du semi-conducteur prévoyait qu'en 2040, les besoins en espace de stockage au niveau mondial, fondamentalement corrélés au développement du numérique et de l'IA, excéderaient la production disponible globale de silicium », et il fournit ainsi certaines sources reprises ci-après. Il illustre cette impasse par l'absurde : « D'ici 2040, l'énergie requise pour les besoins en calcul devrait également dépasser la production énergétique mondiale », mentionnant en particulier le fait que : « à l'heure où le réchauffement climatique est une certitude scientifique, il n'est plus possible de poursuivre un horizon technologique et sociétal délié de la nécessité de préserver notre environnement. »

« La réalité écologique de la révolution industrielle numérique » trouve sa source dans une « contribution de *The Shift Project* à la consultation organisée par la mission », source également mentionnée plus bas. Si le rapport considère, avec la contribution de « l'Iddri, de la FING, du WWF et de GreenIT », que « la France et l'Europe peuvent devenir le fer de lance de cette transition écologique intelligente », il plaide en même temps pour une « intelligence artificielle au service d'une économie plus écologique » et alerte notamment sur les risques de l'*effet rebond*. Il reprend à son compte l'affirmation que « l'IA peut, doit nous permettre de penser de nouvelles formes d'usages, de partage et de collaboration, qui permettront de concevoir des modèles techniques et économiques plus sobres. » Dans ce sens, il convient de « favoriser la convergence de la transition écologique et du développement de l'IA. » Il surprend toutefois en évoquant la piste d'illustrations étonnantes comme l'est le *stockage sur ADN*.

Le rapport consacre aussi tout un chapitre à la problématique de la libération de « la donnée écologique », et propose ainsi de prolonger et d'étendre un mouvement déjà bien engagé par les accords internationaux, la législation européenne et nationale.

---

<sup>23</sup> Donner un sens à l'intelligence artificielle – Pour une stratégie nationale et européenne.  
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/184000159.pdf>

- **Livre blanc *Numérique et Environnement* – Faire de la transition numérique un accélérateur de la transition écologique** <sup>24</sup>

Ce document a été réalisé par un groupe de travail réunissant des contributeurs issus de plusieurs organisations que sont : Damien Demailly, Mathieu Saujot (Iddri), Renaud Francou, Daniel Kaplan, Jacques-François Marchandise (La FING), Marine Braud, Aurélie Pontal (WWF France), Frédéric Bordage (GreenIT.fr), François Levin et Jan Krewer (CNNum) ; il a été produit en 2018 par l’Iddri, La FING, WWF France et GreenIT.fr.

Ce document part du postulat que « la transition écologique est un horizon incontournable, un but à atteindre, mais [que] son chemin peine à se dessiner. La transition numérique est l’une des grandes forces transformatrices de notre époque, mais elle ne poursuit pas d’objectif particulier. Nous voulons ici dessiner plusieurs pistes pour mettre la puissance de transformation du numérique au service de la transition écologique. » Il en conclut que : « Numérique et Environnement [sont] deux transitions à faire converger ».

Si ce raisonnement semble à bien des égards par trop univoque, il n’en met pas moins en évidence le fait que « le numérique – et sa myriade d’applications mobiles, de capteurs et d’objets connectés, de compteurs et de réseaux intelligents – peut ouvrir de nombreuses opportunités pour répondre aux défis environnementaux », ajoutant que « l’optimisation, sans être négligeable, ne suffira pas à répondre au défi écologique qui nécessite de diviser notre consommation d’énergie et d’autres ressources rares par 4, 5 ou plus dans les décennies à venir. » Ce texte comporte en outre « 26 propositions pour lancer le débat » réparties en quatre thématiques transversales :

1. Réduire l’empreinte écologique du numérique.
2. Utiliser le numérique pour mieux concevoir les politiques écologiques.
3. Soutenir l’innovation numérique en faveur de l’écologie.
4. Mobiliser le potentiel des données au service de la transition écologique.

- **Lean ICT – Pour une sobriété numérique**

Lean ICT — Les impacts environnementaux du numérique<sup>25</sup> est un projet conduit par The Shift Project (TSP)<sup>26</sup> et dirigé par Hugues Ferrebœuf.

Trois rapports ont été publiés : 1) Lean ICT : Pour une sobriété numérique en octobre 2018 ; 2) Climat : l’insoutenable usage de la vidéo en ligne en juillet 2019 ; 3) Déployer la sobriété numérique en version intermédiaire en janvier 2020.

« *The Shift Project, think-tank* de la transition énergétique, a pour vocation de se saisir d’enjeux tout à la fois décisifs et délicats pour réussir cette transition. Le développement exponentiel du numérique, et la façon dont ce développement peut interagir avec les objectifs de décarbonation de nos sociétés, constituent l’un des plus importants de ces enjeux. [...] Le but du travail : favoriser une maximisation de l’impact positif du numérique sur l’environnement, et une minimisation de ses impacts négatifs. Au vu des nombreuses thèses contradictoires produites sur le sujet jusqu’ici, il nous a paru utile de chercher à aboutir à un examen aussi objectif que possible de l’ensemble de ces impacts, pour en tirer des recommandations pratiques et systémiques, en phase avec les objectifs de décarbonation. »

---

<sup>24</sup> Livre blanc *Numérique et environnement* – Faire de la transition numérique un accélérateur de la transition écologique.

<https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/rapport/livre-blanc-numerique-et-environnement>

<sup>25</sup> Lean ICT – Les impacts environnementaux du numérique.

<https://theshiftproject.org/lean-ict/>

<sup>26</sup> *The Shift Project* (mentionné plus bas TSP). <https://theshiftproject.org>

Comme à l'accoutumée dans ses travaux, *TSP* s'est attaché à bien délimiter le domaine de son étude et à fournir toutes les sources des données et des références utilisées, ainsi que les justifications aux estimations retenues. Les évaluations sont réalisées en ordre de grandeur pour établir un « référentiel environnemental du numérique » (ou REN), de façon à saisir l'ampleur des enjeux à traiter. Ce référentiel concerne d'un côté la production des objets matériels du numérique (terminaux, serveurs, connectiques, etc.) et de l'autre l'utilisation des TIC. Pour ces productions et usages, il porte sur les consommations d'énergie primaire, les émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation de l'eau, ainsi que le poids des métaux rares intégrés.

En première conclusion, il ressort « une augmentation forte de l'empreinte énergétique directe du Numérique » qui constitue un « tendance préoccupante à plusieurs égards. »<sup>27</sup>

- **Infrastructure numérique et environnement : l'impossible domestication de l'effet rebond**

Dès 2009, Fabrice Flipo et Cédric Gossart, alors maîtres de conférences à l'Institut Télécom & Management SudParis, ont alerté sur les illusions qui peuvent accompagner le déploiement des TIC<sup>28</sup>, affirmant : « Les technologies numériques de l'information et de la communication (TNIC) se généralisent dans un grand nombre de domaines de la vie collective et domestique. Les puces envahissent notre quotidien : automobiles, PDA, lecteurs MP3, etc. Les TNIC véhiculent une image de légèreté et d'absence de friction. Les coûts de transaction et les frais de transport sont ramenés quasiment à zéro. Leur effet sur l'écologie planétaire semble être nul. Mieux, elles permettent d'observer la planète et ses évolutions de loin, sans avoir l'air d'y toucher. Elles permettent la démocratie, la croissance, voire l'inclusion sociale.

Les TNIC seraient-elles « par nature » favorables à l'écologie et au développement durable ? Cet article entend au contraire montrer que non seulement tel n'est pas le cas, les TIC ayant une existence matérielle de plus en plus encombrante, mais en plus la régulation de cette empreinte écologique ne semble pas aller dans le bon sens, les efforts dans le domaine de l'éco-efficacité étant appelés, de manière structurelle, à être contrebalancés par « l'effet rebond » – du moins tant que les conditions inhérentes à la compétition économique restent inchangées. L'analyse de l'effet rebond, ou plutôt des effets rebond, révèle en effet des régulations collectives qui, si elles ne sont pas modifiées, annihileront toujours les efforts locaux faits dans le domaine de l'éco-efficacité. »

- **La guerre des métaux rares — La face cachée de la transition énergétique et numérique** <sup>29</sup>

Avec son livre *La guerre des métaux rares*, Guillaume Pitron campe le décor : « En nous émancipant des énergies fossiles, nous sombrons en réalité dans une nouvelle dépendance : celle aux métaux rares. Graphite, cobalt, indium, platinoïdes, tungstène, terres rares... Ces ressources sont devenues indispensables à notre nouvelle société écologique (voitures électriques, éoliennes, panneaux solaires) et numérique (elles se nichent dans nos smartphones, nos ordinateurs, tablettes et autres objets connectés de notre quotidien). Or, les coûts environnementaux, économiques et géopolitiques de cette dépendance pourraient se révéler encore plus dramatiques que ceux qui nous lient au pétrole. »

« Dès lors, poursuit l'auteur, c'est une contre-histoire de la transition énergétique que ce livre raconte, le récit clandestin d'une odyssée technologique qui a tant promis et les coulisses d'une quête généreuse, ambitieuse, qui a jusqu'à maintenant charrié des périls aussi colossaux que ceux qu'elle s'était donnée pour mission de résoudre. »

---

<sup>27</sup> Jean-Marc Jancovici, Président de *TSP* en donne un avant-goût dans l'article de *Stratégies : La tech est peut-être smart, mais sûrement pas verte !*, daté du 26 juin 2018 et publié par Emmanuel Gavard.

<http://www.strategies.fr/actualites/marques/4013005W/jean-marc-jancovici-la-tech-est-peut-etre-smart-mais-surement-pas-verte-.html>

<sup>28</sup> *Infrastructure numérique et environnement : l'impossible domestication de l'effet rebond* dans HAL - archives-ouvertes.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00957951/document>

<sup>29</sup> *La guerre des métaux rares – La face cachée de la transition énergétique et numérique*. <http://www.editionslesliensquiberent.fr/livre-La-guerre-des-métaux-rares-9791020905741-1-1-0-1.html>, in Guillaume Pitron (2018), Les Liens qui Libèrent.

- « *L'Âge des low tech – Vers une civilisation techniquement soutenable* »<sup>30</sup>

Philippe Bihoux est ingénieur. Spécialiste de la finitude des ressources minières et de son étroite interaction avec la question énergétique, il est coauteur de l'ouvrage *Quel futur pour les métaux ?* publié en 2010. Philippe Bihoux focalise son analyse en critiquant notamment le désastre de l'école numérique et la mutation qu'elle prépare<sup>31</sup>.

Voici ce qu'il est dit de *L'Âge des low tech* : « Face aux signaux alarmants de la crise globale – croissance en berne, tensions sur l'énergie et les matières premières, effondrement de la biodiversité, dégradation et destruction des sols, changement climatique et pollution généralisée –, on cherche à nous rassurer. Les technologies « vertes » seraient sur le point de sauver la planète et la croissance grâce à une quatrième révolution industrielle, celle des énergies renouvelables, des réseaux intelligents, de l'économie circulaire, des nano-bio-technologies et des imprimantes 3D.

Plus consommatrices de ressources rares, plus difficiles à recycler, trop complexes, ces nouvelles technologies tant vantées nous conduisent dans l'impasse. Le livre cité démonte un à un les mirages des innovations *high tech*, et propose de prendre le contre-pied de la course en avant technologique en se tournant vers les *low tech*, les « basses technologies ».

Il ne s'agit bien évidemment pas de revenir à la bougie, mais de conserver un niveau de confort et de civilisation agréables tout en évitant les chocs des pénuries à venir. S'il met à bas nos dernières illusions, c'est pour mieux explorer les voies possibles vers un système économique et industriel effectivement soutenable dans une planète finie. »

## Résumé

- Les avantages et les bienfaits apportés par le numérique sont indubitablement appréciés dans de très nombreux domaines et par l'immense majorité de leurs utilisateurs et bénéficiaires, y compris pour la connaissance et la protection de l'environnement.
- Cependant, contrairement à l'image véhiculée par ses laudateurs, le numérique ne correspond nullement à une dématérialisation des activités humaines. Il constitue en revanche une étape supplémentaire dans la délocalisation de la matérialité de nos activités. Il contribue à ce titre à faire perdre de vue la réalité matérielle de nos activités et la responsabilité afférente qui nous incombe.
- Les TNIC se développent à l'échelle mondiale avec des taux de croissance de plus de 8 % par an en consommation d'énergie finale, en émissions de gaz à effet de serre (GES), en consommation de matières premières rares voire stratégiques et en pollutions générées. Un tel taux de croissance est clairement non soutenable.
- Le déploiement du numérique se heurtera comme n'importe quelle autre activité humaine aux limites physiques de notre écosystème : la Terre, et la croissance rapide de cette activité lui fera rencontrer ces limites d'autant plus rapidement. De fait, nombre de contraintes physiques semblent s'élever dès l'horizon des années 2050.
- Avant même d'être arrêté par une limite physique, le déploiement massif et rapide du numérique a déjà des incidences environnementales néfastes et en aura de plus en plus.

En lien avec ce premier état des lieux et de la littérature, assez général, les chapitres suivants proposent des développements plus poussés sur différentes questions-clés.

---

<sup>30</sup> Philippe Bihoux (2014), *L'Âge des low tech – Vers une civilisation techniquement soutenable* (cité en note 14).

<http://www.seuil.com/ouvrage/l-age-des-low-tech-philippe-bihoux/9782021160727>

<sup>31</sup> *Le Désastre de l'école numérique – Plaidoyer pour une école sans écrans*. <http://www.seuil.com/ouvrage/le-desastre-de-l-ecole-numerique-philippe-bihoux/9782021319187>

## B. Utilisation des ressources minérales océaniques pour la fabrication des objets du numérique

Depuis les années 60, les grands fonds océaniques ont été identifiés comme une source potentielle de métaux, et plus récemment de terres rares. Aux nodules polymétalliques des plaines abyssales (Zn, Co, Cu, Mn, Ni) se sont ajoutés d'autres types de formations minérales par grands fonds, comme les sulfures polymétalliques hydrothermaux et les encroûtements cobaltifères. L'intérêt pour ces ressources a été relancé il y a une dizaine d'années, en vue notamment de la production d'objets de l'univers numérique.

L'évaluation des réserves disponibles est difficile. Les conditions géologiques de formation de ces dépôts<sup>32</sup> ne sont pas complètement élucidées, et les techniques d'exploration et d'évaluation des quantités n'ont pas la maturité de celles de l'exploration des hydrocarbures, dont elles diffèrent.

Néanmoins, l'importance potentielle de ces ressources a été déterminante dans les négociations de la convention des Nations unies sur le droit de la mer (*CNUDM, United-Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS*, entrée en vigueur en 1994), qui a, dans ses dispositions relatives aux ressources minérales des fonds marins, distingué deux zones : le plateau continental et la haute mer. La première est sous la juridiction de l'État côtier, qui y exerce des droits souverains en matière d'exploration et d'exploitation économiques ; pour la seconde, les activités relatives aux ressources minérales sont organisées et contrôlées par l'Autorité internationale des fonds marins (*AIFM, International Seabed Authority – ISA*), organisme intergouvernemental qui accorde des permis d'exploration et d'exploitation. Une trentaine de permis d'exploration ont été ainsi délivrés<sup>33</sup>.

Alors que l'exploitation d'hydrocarbures se fait en eaux de plus en plus profondes (30 % de la production de pétrole et 27 % de celle de gaz sont assurés en *offshore*), aucun autre minéral ne fait aujourd'hui l'objet d'une exploitation économique. Les « briques » technologiques, stimulées par l'exploitation des hydrocarbures *offshores*, sont disponibles, mais la rentabilité économique semble encore trop incertaine pour développer complètement les équipements d'exploitation à une échelle industrielle.

En outre, l'exploration des fonds marins a mis en évidence que les grands fonds hébergent des biocénoses encore largement méconnues, au métabolisme parfois très spécifique<sup>34</sup>. L'exploitation de ressources minérales peut impacter très fortement ces écosystèmes (effets mécaniques, mise en suspension de sédiments), dont la résilience est sans doute faible, compte tenu de rythmes biologiques très lents aux conditions de température des grands fonds marins<sup>35</sup>.

L'exploitation est ainsi conditionnée à la prise en compte de l'impact sur les écosystèmes.

### Résumé

L'incertitude qui plane sur les quantités disponibles et les conditions économiques de leur exploitation, ainsi que le manque de connaissances sur l'impact de cette dernière, font des ressources minérales océaniques une « manne » incertaine, dont il faudra évaluer la pertinence non seulement aux regards des conditions d'exploitation et de leurs impacts, mais aussi dans une perspective de durabilité et de numérique « sobre ».

---

<sup>32</sup> Les encroûtements métallifères se forment sur certains types de relief sous-marin (guyots), par précipitation chimique à partir de l'eau de mer ; ils peuvent atteindre 25 cm d'épaisseur, sur des surfaces de plusieurs kilomètres. Les amas de sulfures polymétalliques hydrothermaux se forment le long des dorsales océaniques, suite à la percolation de l'eau de mer dans la croûte océanique qui se crée au niveau des dorsales ; leur surface est inférieure au km<sup>2</sup>, pour une épaisseur allant jusqu'à une centaine de mètres.

<sup>33</sup> Dont 4 pour la Chine, 3 pour la Corée et la Russie, 2 pour le Japon, la France, l'Inde, l'Allemagne et le Royaume-Uni.

<sup>34</sup> Un champ de recherche est le type d'interaction entre les processus biochimiques et les processus géochimiques qui peuvent conditionner la formation des structures métallifères.

<sup>35</sup> Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales profondes, Expertise scientifique collective Ifremer-CNRS, juin 2014.

## C. Impacts environnementaux et sanitaires des éléments dits « terres rares » (ETR) : de l'activité minière aux objets du numérique

Dès la fin du XX<sup>e</sup> siècle, notre société a été confrontée aux impacts sanitaires et environnementaux des éléments métalliques en traces (Pb, Hg, Cd, etc.), largement utilisés à des fins industrielles ou médicales. Les organisations gouvernementales ont dû réagir par des réglementations – par exemple sur les émissions des véhicules motorisés –, conduisant à limiter leur usage et leur dispersion dans l'environnement et par voie de conséquence l'exposition humaine. Même si l'exposition humaine à ces éléments ou encore certains mécanismes liés à leur effets toxiques reste à affiner, la société a pris conscience, dans son ensemble, des dangers liés à leur utilisation.

Au XXI<sup>e</sup> siècle, avec le développement des « hautes technologies », et en particulier celles liées au numérique, un autre groupe d'éléments dont la toxicité est peu connue est largement utilisé et présent dans notre quotidien : ce sont les éléments dits « terres rares » (ETR)<sup>36</sup>. Très peu de connaissances existent à l'heure actuelle sur les effets toxiques intrinsèques de ces éléments, ni sur ceux liés directement ou indirectement à leur exploitation minière. Leur usage, et sans doute leur dispersion, sont pourtant croissants, avec l'intensification de l'industrie du numérique. Nous proposerons dans les pages qui suivent un état des lieux sur ces connaissances, en nous focalisant sur les ETR qui répondent aux besoins du numérique.

### Bref historique sur les terres rares

La première mention des terres rares, telle que relatée par *Chakmouradian et Wall (2012)*<sup>37</sup>, est liée à la découverte, dans les environs de Stockholm (SU) vers la fin du XVII<sup>e</sup> siècle d'un minéral inconnu par un amateur de minéralogie, C. Axel Arrhenius. Cette découverte allait occuper les scientifiques pendant des décennies. C'est un chimiste finlandais, Johan Gadolin, qui démontrera, quelques années plus tard, en 1694, que ce minéral contenait une « nouvelle terre », qui prendra le nom de gadolinite.

Trente-quatre ans plus tard, le premier des quatre éléments constituant cette « nouvelle terre » est isolé : il s'agit de l'yttrium. Puis seront isolés le terbium, l'erbium et l'ytterbium, d'autres encore provenant d'autres terres rares et issus de sites différents.

Quatre-vingts ans plus tard, en 1907, le dernier des éléments de la famille des terres rares sera caractérisé : le lutétium.

### La famille des terres rares et leur abondance relative

Selon l'IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), la famille des ETR concerne 17 des métaux de transitions du Groupe 3 (ou Groupe IIIA) du Tableau Périodique des éléments. L'yttrium (Y) et le scandium (Sc) sont inclus dans le groupe des terres rares parce que leurs caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques du groupe III des métaux de transition apparaissent très similaires à celles des ETR (*Hirano et al., 1996*)<sup>38</sup>.

### Occurrences des terres rares et formes naturelles

---

<sup>36</sup> Traduction approximative de l'anglais « *rare-earth elements* », soit « éléments rares sur Terre » ou « éléments terrestres rares ». On trouve aussi en anglais le sigle *REY* signifiant « *rare-earth elements and yttrium* ».

<sup>37</sup> Chakmouradian A. & Wall F. (2012), Rare earth elements : minerals, mines, magnets (and more), Elements, 8: 333-340. [https://www.researchgate.net/publication/274325456\\_Rare\\_Earth\\_Elements\\_Minerals\\_Mines\\_Magnets\\_and\\_More](https://www.researchgate.net/publication/274325456_Rare_Earth_Elements_Minerals_Mines_Magnets_and_More)

<sup>38</sup> Les ETR impliqués dans l'industrie du numérique sont : l'yttrium (Y) et parmi les lanthanides : le lanthanum (La), le cérium (Ce), le praseodymium (Pr), le neodymium (Nd), l'euporium (Eu), le gadolinium (Gd), le terbium (Tb), le dysprosium (Dy) et l'erbium (Er).

L'appellation « terre rare » pourrait être considérée comme inappropriée car certains éléments comme Ce et Y sont largement plus abondants, en masse, que Sn, Hg et Mo et la plupart des métaux précieux (Ce est 100 fois plus abondants que le Cd par exemple) de la croûte terrestre. Néanmoins, d'autres sont largement plus rares, 100 fois moins abondants que le Cu par exemple pour Tb et Tm et, pour le système solaire, la plupart des lanthanides sont moins abondants que 94 % des autres éléments. À l'échelle de l'univers, ces éléments mériteraient finalement leur appellation. Deux groupes artificiels sont parfois utilisés : les terres rares légères (Z = 57 à 64), et les terres rares lourdes (Z = 65 à 71).



Les ETR sont naturellement présents dans les roches sous forme de silicates, de carbonates ou d'oxydes au sein de minerais. Plus de 270 minéraux sont connus pour contenir l'yttrium ou des lanthanides en tant que constituant essentiel de leur structure cristalline mais seulement une vingtaine est concernée par l'extraction minière des ETR (*Chakmouradian & Wall, 2012*). Les extractions minières dont l'exploitation est la plus rentable sont celles de la monazite, de la xénotine et de la bastnaésite. Une des difficultés techniques de leur extraction vient des contraintes liées à leur manipulation car ils sont souvent associés avec des éléments radioactifs. Les ETR sont alors extraits selon des méthodes pointues et spécifiques, parfois à partir des sous-produits de l'extraction de l'uranium.

Les gisements les plus exploités se trouvent en Chine – qui détiendrait la moitié des réserves mondiales connues (47 % en 2015) : en Mongolie intérieure avec le plus grand gisement situé à Bayan Obo (60 % des réserves connues de terres rares légères selon le BRGM)<sup>39</sup>, puis secondairement au centre (monts Qinling) et au sud du pays. La nature de ces gisements (richesse des minerais et facilité d'extraction) et leur abondance placent la Chine comme leader mondial des ETR. *En 2014, 88 % des ETR ont été produits par la Chine*. Le reste de cette production se détaille ainsi : l'Australie (5%), les États-Unis (3,5 %), la Russie (1,9 %) et enfin d'autres pays comme l'Inde, le Brésil et la Malaisie.

### Usage des terres rares

Les principaux secteurs dans lesquels sont utilisés les ETR sont l'électronique (dont le numérique), le secteur médical, et l'agriculture.

*En électronique*, les ETR se retrouvent principalement dans les secteurs de l'audiovisuel (dont les écrans numériques), l'automobile, la communication ou encore l'énergie, dont les éoliennes, les batteries et les aimants.

*Dans le secteur médical*, le gadolinium (Gd) est utilisé en tant qu'agent de contraste ; d'autres ETR (Y et La) amélioreraient les propriétés anti-tumorales du 5-fluoro-uracile (*Liu et al., 2012*)<sup>40</sup>.

*En agriculture*, les ETR sont utilisées comme fertilisants (lanthane et cérium en particulier en Chine, augmentant les rendements de 5 à 15 % pour des cultures comme le blé, le haricot ou le maïs (*Hun et al., 2004*), et dans l'élevage comme compléments alimentaires pour améliorer la prise de poids des animaux (Chine et Suisse) (*Abdelnour et al., 2014*)<sup>41</sup>.

*D'autres usages* des ETR se retrouvent dans la pétrochimie, l'éclairage (ampoules fluo-compactes), ou dans les matériaux, comme additifs pour le verre et dans les revêtements dans l'industrie nucléaire et militaire, notamment en aéronautique, comme isolant thermique des moteurs à réaction (*Hatch, 2012*)<sup>42</sup>.

Les usages des ETR sont donc très vastes et leur production en constante augmentation, de l'ordre de 7 % par an. La question se pose dès lors de leur dispersion dans l'environnement et de leur toxicité.

### Expositions aux ETR et contaminations environnementales, diffusion et dispersion

*Trois facteurs majeurs* peuvent contribuer à la contamination de l'environnement par des ETR : 1) leur exploitation minière comprenant les méthodes d'extraction et de raffinage ; 2) leur utilisation comme amendements agricoles et compléments alimentaires ; 3) l'augmentation du nombre d'objets contenant des ETR associée à la quasi-absence de recyclage efficace.

---

<sup>39</sup> De Pas A. (2017), Les terres rares, un groupe de métaux stratégiques. Dossier Enjeux des géosciences, janvier 2017, Les Terres rares, BRGM.

<sup>40</sup> Liu X., Gan Q., Feng C. (2012), Synthesis, characterization and antitumor activity of rare earth (Y, La) substituted phosphotungstates containing 5-fluorouracil, in *Journal of Rare Earths*, 30 : 604–608.

<sup>41</sup> Abdelnour, S.A., El-Hack, M.E.A., Khafaga, A.F., Noreldin, A.E., Arif, M., Chaudhry, M.T. *et al.* (2019), *Impacts of rare earth elements on animal health and production: Highlights of cerium and lanthanum*, in *Sci. Total Environ.*, 672: 1021–1032.

<sup>42</sup> Hatch, G. P. (2012), Dynamics in the global market for rare earths, in *Elements*, 8 :341-346.

Exploitation minière. À proximité de la mine de Baotou en Chine, les teneurs en ETR dans les sols et l'eau de rivière sont jusqu'à 160 fois à 10 000 fois plus élevées que la valeur moyenne en Chine (soit respectivement 28 mg g<sup>-1</sup> de sol et 4 mg L<sup>-1</sup> d'eau contre 177 µg g<sup>-1</sup> de sol et 0,4 µg L<sup>-1</sup> pour les teneurs dans les rivières et sols non exposés)<sup>43</sup>. Des teneurs excessivement élevées se retrouvent ainsi dans les végétaux (environ 30 fois plus élevées que la valeur sanitaire pour la Chine) et dans l'air à proximité des sites d'exploitation.

Agriculture. L'accumulation des ETR dans les sols amendés peut aussi conduire à accentuer l'exposition humaine aux ETR, notamment au travers des végétaux consommés, des eaux contaminées par ruissellement ou infiltration, ou par la respiration des poussières.

Recyclage. Du fait de la multiplicité des usages des ETR et de l'augmentation constante d'objets du numérique contenant ces derniers, il ne peut être exclu que dans un avenir proche, leur dispersion n'augmente de façon significative. La gestion des déchets du numérique étant loin d'être optimale (1 % de recyclage en 2017), il est désormais nécessaire de s'interroger sur la libération possible des ETR contenus dans les différents matériaux et objets, tout particulièrement ceux associés au numérique.

### **Expositions aux ETR et effets toxiques chez l'homme**

*Gonzalez et al.*, en 2014<sup>44</sup>, déclaraient que les effets toxiques des ETR étaient encore mal cernés. Qu'en est-il aujourd'hui ? À quelles doses est-on susceptible d'être exposé ?

L'article de *Hirano & Suzuki*<sup>45</sup> est, en 1996, sans doute parmi les premiers à dresser un bilan des effets toxiques des ETR chez l'homme (et organismes modèles). De nombreux autres travaux se sont intéressés depuis aux effets des ETR sur la physiologie d'autres organismes, dans un contexte environnemental, comme les végétaux, les microorganismes bactériens comme *Pseudomonas putida*, ou des mycètes comme *Saccharomyces cerevisiae*.

### **Propriétés chimiques des ETR en lien avec leur caractère toxique**

Le rayon de l'ion Ca<sup>2+</sup> est très proche de celui des lanthanides ; pour cette raison, les lanthanides sont souvent utilisés comme sonde à Ca<sup>2+</sup> dans des études biologiques et biochimiques (cf. *Hirano et al.*). Les nitrates, sulfates et chlorures des ETR sont solubles, alors que leurs sels de carbonates, phosphates et hydroxydes sont insolubles.

Ces différences de solubilité seraient en lien avec l'activité métabolique des ETR au niveau des systèmes biologiques. En général, la toxicité des lanthanides diminue avec l'augmentation de leur nombre atomique, probablement du fait de la plus forte solubilité et de la stabilité ionique des lanthanides lourds (*Haley*, 1991, cité par *Hirano & Suzuki, op. cit.*).

Les ETR forment des complexes avec différents ligands (citrate, NTA, EDTA, DTPA) ; ces complexes ont été utilisés dans les études de toxicologie.

Les expositions aux ETR que l'on pourrait considérer comme significatives sont notamment celles qui concernent les aérosols issus d'une explosion nucléaire où, en dehors des effets par irradiation, les lanthanides causeraient probablement (cf. *Hirano et al.*, 1996) des lésions granulomateuses dans les poumons ou une pneumoconiose. Cela a notamment été observé chez des ouvriers fondeurs.

D'autres voies d'exposition seraient éventuellement à prendre en compte telles que celles liées à certains traitements anti-cancéreux chez l'homme ou encore à l'analyse par RMN.

---

<sup>43</sup> Liang T., Li K., Wang L. (2014), State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China, in *Environ. Monit. Assess.*, 186 : 1499-1513.

<sup>44</sup> Gonzalez, V., Vignati, D.A.L., Leyval, C., Giamberini, L. (2014), Environmental fate and ecotoxicity of lanthanides: are they a uniform group beyond chemistry ?, *Environ. Int.* 71 : 148-157.

<sup>45</sup> Hirano et Suzuki (1996), *Environmental Health Perspectives* (Supplement 1, Vol. 104 : 85-95).

La possible exposition individuelle par les objets du numérique n'est pas encore documentée. Néanmoins, il doit être considéré que la très faible concentration des ETR au sein de ces objets (du type *smartphone*) et que leur faible accessibilité (ils sont quasiment « scellés » au matériau et donc difficilement bio-disponibles) *laissent présager peu d'effets par contact avec la peau*. Cependant, nous n'avons pas connaissance d'une littérature précise sur ce sujet, ni sur le vieillissement des objets du numériques et la restitution à l'environnement des ETR.

Les études de mortalité montrent que les ETR ne sont pas particulièrement toxiques sur la base des valeurs de DL<sub>50</sub> obtenues. Les valeurs de la littérature publiées par *Hirano & Suzuki* indiquent ainsi pour différentes spéciations d'ETR (nitrates ou chlorures de La, Ce, Eu, Dy, Ho, Er, Sc, Nd, Pr ou Sm ou mélange de ces formes) des DL<sub>50</sub> de quelques dizaines de mg kg<sup>-1</sup> de masse corporelle en administration intraveineuse (rat souris) ; quelques centaines de mg kg<sup>-1</sup> de masse corporelle en administration intra-péritonéale (chez la souris) ; quelques milliers de mg kg<sup>-1</sup> de masse corporelle en administration *per os* chez la souris ou le rat (de 1178 mg kg<sup>-1</sup> de masse corporelle pour Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> et jusqu'à 7650 mg kg<sup>-1</sup> pour DyCl<sub>3</sub> chez la souris).

### Effets par toxicité chronique et effets cancérigènes

Peu de données existent concernant la toxicité chronique des ETR. Bien que les terres rares ne soient pas considérées comme toxiques et que leur manipulation n'impose pas de précaution particulière, beaucoup de toxicologues considèrent que les études d'exposition à long terme sont insuffisantes<sup>46</sup>. Néanmoins, aucun effet cancérigène n'a été rapporté chez l'animal. Les tests de mutagénicité d'Ames se sont révélés négatifs pour des concentrations allant de 0,5 à 50 mg L<sup>-1</sup> de nitrate d'ETR (mélange de Ce, La, Nd, Pr et Sm).

De nombreuses données mettent en évidence que les lanthanides fonctionnent comme des antagonistes du calcium, *in vitro*, mais il y a peu d'études (en 1996) qui rapportent des effets toxiques *in vivo* liés à cet antagonisme au niveau de cellules ou de molécules biologiques.

La cytotoxicité des ETR sur les macrophages est comparable à celle du cadmium ou du silicium *in vitro* mais est bien moins toxique *in vivo* (voir études sur souris ou rat). Il conviendrait toutefois de s'assurer que les conditions expérimentales ne sont pas à l'origine de ces écarts entre études *in vivo* vs études *in vitro* (cf. *Hirano & Suzuki*).

Le squelette est une des cibles des ETR, mais les cellules qui emmagasinent le plus d'ETR ne sont pas clairement identifiées (des macrophages, des cellules érythroïdes, ou des cellules réticulaires légères). L'exposition humaine aux ETR (*Pagano et al.*, 2019)<sup>47</sup> concerne des populations chinoises vivant à proximité des sites d'extraction minière. Les données proviennent d'études publiées entre 2003 et 2018.

Ainsi, la survenue d'une surmortalité par cancer du poumon a été rapportée chez des mineurs d'une mine de terres rares (thorium et descendants de thoron) en Chine<sup>48</sup>. Les niveaux d'exposition ont été appréciés par mesure des ETR dans les cheveux, dans les poussières de l'air extérieur (milieu urbain) et intérieur (femmes au foyer), ainsi que dans les sols et végétaux cultivés (légumes).

Des concentrations excessives en ETR par rapport aux valeurs normales, ou qui diminuent inversement avec la distance entre l'habitat et la zone d'exploitation, ont ainsi été enregistrées dans les cheveux, les végétaux et les poussières de l'air ambiant urbain ou intérieur. Chez des habitants de la province de Shanxi, en Chine, les niveaux excessifs en ETR ont été associés à des risques d'hypertension. *Les données montrent que les voies d'exposition sont alimentaires ou respiratoires*.

---

<sup>46</sup> Lambert C. E. (2005), Lanthanide series of Metals Encyclopedia of Toxicology, 2<sup>e</sup> ed. : 691-4

<sup>47</sup> Pagano G., Thomas Ph.J., Di Nunzio A., Trifuoggi M. (2019), Human exposures to rare earth elements: Present knowledge and research prospects, in Environmental Research, 171 : 493-500.

<sup>48</sup> King-An C., Yong-E C. (2008), Lung cancer mortality among miners in a rare-earth iron mine. Radioprotection, 43(3) : 439-48.  
<https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/pdf/2008/03/rad200740.pdf>

Une étude comparant les niveaux d'exposition de populations au Maroc par rapport à des populations vivant aux Îles Canaries (donc géographiquement proches mais plus éloignées l'une de l'autre pour ce qui est de leur niveau de vie respectif) montre des taux plus élevés chez les populations marocaines que chez celles des Canaries, l'intense activité minière, notamment concernant les ETR et d'autres éléments en relation avec les technologies de l'électronique, pouvant en constituer la cause (Henríquez-Hernández *et al.*, 2018)<sup>49</sup>.

### Effets chez les végétaux

Si certains ETR pourraient notamment améliorer la résistance des plantes en agissant sur les propriétés antioxydantes, l'absorption de nutriments ou en améliorant la fixation du CO<sub>2</sub><sup>50</sup>, des concentrations « élevées » en Ce (5 à 10 mg g<sup>-1</sup> de sol) entraînent une diminution de 10 à 25 % de la masse végétale chez deux plantes sauvages herbacées<sup>51</sup>. Mais les informations sur l'écotoxicité des ETR restent difficiles à évaluer du fait du peu de données disponibles.

---

<sup>49</sup> Henríquez-Hernández L. A., González-Antuña A., Boada L. D., Carranza C., Pérez-Arellano J. L., Almeida-González M., Camacho M., Zumbado M., Fernández-Fuertes F., Tapia-Martín M., Luzardo, O. P. (2018), *Pattern of blood concentrations of 47 elements in two populations from the same geographical area but with different geological origin and lifestyles: Canary Islands (Spain) vs. Morocco*, in *Sci. Total Environ.* 636 : 709–716.

<sup>50</sup> Ramos S. J., Dinali G. S., Oliveira C., Martins G. C., Moreira C. G., Siqueira J. O. *et al.* (2016), *Rare earth elements in the soil environment*, in *Curr. Pollut. Reports*, 2 : 28–50.

<sup>51</sup> Thomas P. J., Carpenter D., Boutin C., Allison J. E. (2014), *Rare earth elements (REEs): effects on germination and growth of selected crop and native plant species*, in *Chemosphere*, 96 : 57–66.

**Tableau 1.** Informations générales sur la toxicité associée aux ETR par des modèles *in vivo* (mammifères, autres vertébrés) et *in vitro* (adapté de Rim *et al.*, 2013<sup>52</sup> et Pagano *et al.*, 2019). La toxicité des éléments Pr, Tb, Ho, Er, Lu est peu ou pas documentée ou est associée à une toxicité faible à modérée et n'est pas considérée dans ce tableau (1). i.p. = intra-péritonéale ; ad. = adulte.

Espèces/modèle	Principaux effets et données toxicologique	Références
Rats	<p>DL<sub>50</sub> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- - ScCl<sub>3</sub> : 4 mg kg<sup>-1</sup> (i.p.) ; 755 mg kg<sup>-1</sup> (orale)</li> <li>- - La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : &gt; 8500 mg kg<sup>-1</sup> (orale)</li> <li>- - CeO<sub>2</sub> : 5000 mg kg<sup>-1</sup> (orale) ; 1 – 2 g kg<sup>-1</sup> (dermal) ; 5,05 mg L<sup>-1</sup> (inhalation de poussières)</li> <li>- - Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : &gt; 5000 mg kg<sup>-1</sup> (orale)</li> </ul> <p>- Y : Dommages rénaux, œdème pulmonaire et dyspnée (citrate d'yttrium, inhalation), œdème du foie et hyperémie pulmonaire (YCl<sub>3</sub>)</p> <p>- Effets neurotoxiques (LaCl<sub>3</sub>, voie orale)</p> <p>- Dommages respiratoires multiples et toxicité du foie (particules fines de CeO<sub>2</sub> / instillation intratrachéale)</p> <p>- La perfusion intraveineuse de CeO<sub>2</sub> entraîne un stress oxydatif multiple</p>	(a)  (a, b)  (b)  (b)
Souris	<p>DL<sub>50</sub> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 530 mg kg<sup>-1</sup> (i.p.)</li> <li>- Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 86 mg kg<sup>-1</sup> (i.p.)</li> </ul> <p>L'administration orale de CeCl<sub>3</sub> induit une toxicité pulmonaire et hépatique</p>	(a)  (b)
- Macrophages alvéolaires des poumons de rats	- Cytotoxicité induite par LaCl <sub>3</sub> , CeCl <sub>3</sub> et Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(b)
- Cellules de moelle osseuse de souris	- Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub> et Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> induisent des aberrations chromosomiques (i.p.)	(b)
- Cellules BEA – 2B	- Stress oxydatif induit par nCeO <sub>2</sub>	(b)
- Lignées cellulaires HepG2 et HT-29	- CeCl <sub>3</sub> et LaCl <sub>3</sub> affectent la régulation des gènes détectés par les matrices basées sur la RT-PCR	(b)
Homme	<p>Y : maladie du foie (?)</p> <p>n-CeO<sub>2</sub> : effets sur les spermatozoïdes (?)</p> <p>DyCl<sub>3</sub> : la dose létale a été estimée à 500 g pour un adulte, basée sur des données expérimentales sur souris (voie orale)</p> <p>Yb (tout composé) : considéré comme hautement toxique (irritation de la peau et des yeux, pourrait être tératogène)</p> <p>Lu : formes solubles considérées comme faiblement toxiques</p> <p>Pm : organe cible inconnu (tissus osseux possible). Aucun effet toxique constaté en dehors du caractère radioactif</p> <p>Sm : formes solubles très légèrement toxiques, absorption (voie orale) seulement de 0,05 % par le flux sanguin. Dans le corps humain (ad.), la quantité totale de Sm est d'environ 50 µg, localisée au niveau des reins, du foie et du sang</p> <p>Gd : très toxique sous forme d'ion libre du fait de son rayon ionique similaire à celui de l'ion Ca<sup>2+</sup>, mais sous sa forme d'usage (agent contrastant en IRM) sa toxicité est négligeable car séquestré par un agent chélatant puissant</p>	(a) (b) (a)  (a)  (a)  (a)  (a)  (a)

<sup>52</sup> Rim K. T. *et al.* (2013), *Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: A literature review*, in *Safety and Health at Work*, 4 : 12-26.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3601293/>

<i>Carassius auratus</i>	Modifications des activités enzymatiques induites par le CeO <sub>2</sub> (AChE, SOD et CAT)	(b)
Embryons de poissons zèbres	La et Yb affectent le développement des embryons	(b)
Effets biologiques chez l'anguille ( <i>Anguilla anguilla</i> )	Exposition de civelles à des concentrations environnementales « réalistes » (120 ng L <sup>-1</sup> ) en La <sup>3+</sup> : inhibition sensible de la catalase, perturbation de l'acétylcholinestérase.	(c)
Truite arc-en-ciel ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Sensibilité à l'yttrium (Y) : LOEC 1000 × forte que la concentration dans les eaux douces	Cf. Cardon <i>et al.</i> 2019

(a) Rim K. T. *et al.* (2013), *Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: A literature review*, in *Safety and Health at Work*, 4 : 12-26. Article cité.

(b) Pagano G. *et al.* (2019), *Human exposures to rare earth elements: Present knowledge and research prospects*, in *Environmental Research*, 171 : 493-500. Article cité.

(c) Figueiredo C. *et al.* (2018), *Accumulation, elimination and neuro-oxidative damage under lanthanum exposure in glass eels (Anguilla anguilla)*, in *Chemosphere*, 206 : 414-423.

**Tableau 2.** Informations générales sur la toxicité associée aux ETR : modèles invertébrés (adapté et complété de Pagano G. *et al.*, 2019).

Espèces/modèle	Principaux effets	Références
Embryons et sperme d'oursins	Comparaison des toxicités de plusieurs ETR pour le développement précoce, le succès de la fertilisation, les dommages à la descendance, les dommages cytogénétiques et le stress oxydatif	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Daphnia pulex</i>	Absorption de CeO <sub>2</sub> dans le contenu intestinal, indépendamment des conditions d'alimentation	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Caenorhabditis elegans</i> <i>Gammarus roeselii</i> et <i>Dreissena polymorpha</i>	Inhibition de la reproduction et de la croissance CeO <sub>2</sub> a réduit la taille du système lysosomal, l'activité de la catalase et la lipoperoxydation chez <i>D. polymorpha</i>	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Nitzschia palea</i> , <i>Chironomus riparius</i> , <i>Xenopus laevis</i> et <i>Pleurodeles waltl</i>	Toxicité comparative associée au nCeO <sub>2</sub>	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Caenorhabditis elegans</i>	PrCl <sub>3</sub> , NdCl <sub>3</sub> et ScCl <sub>3</sub> induisent des déficits comportementaux et des dommages neuronaux	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Carassius auratus</i>	Modifications des activités enzymatiques induites par le CeO <sub>2</sub> (AChE, SOD et CAT)	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
Invertébrés et microbiotes divers	Toxicité comparative des ETR chez quatre invertébrés et chez deux espèces de bactéries	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Daphnia magna</i> et <i>Heterocypris incongruens</i> (crustacés), <i>Brachionus calyciflorus</i> (rotifère), <i>Hydra attenuata</i> (hydre)	Aucun effet toxique significatif observé selon les tests toxicologiques standardisés (PNEC* >> aux concentrations environnementales) pour trois lanthanides (Ce, Gd, Lu)	Gonzalez <i>et al.</i> , 2015
<i>Daphnia magna</i> , <i>Chironomus riparius</i> (+ truite, cf Tab. 1)	Exposition à l'yttrium (Y) : LOECs** >> [Y] <sub>naturelle</sub> (4 à 1000 ×) <i>C. riparius</i> : seul qui présente des effets toxiques aux concentrations de l'environnement	Cardon <i>et al.</i> , 2019, ACS Omega

*Nota : Predicted no effect concentration* : concentration prévue sans effet, en d'autres termes équivalent en quelque sorte à la dose maximale sans effet nocif observée (DSNEO) mais pour le milieu naturel et ses occupants.

\*\* Lowest observable effect concentration.

**Tableau 3.** Informations générales sur la toxicité associée aux ETR : plantes et modèles microbiens (adapté et complété de Pagano *et al.*, 2019).

<b>Espèces/modèle</b>	<b>Principaux effets</b>	<b>Références</b>
Sept espèces végétales	Comparaison des toxicités de <i>n</i> -CeO <sub>2</sub> , <i>n</i> -La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , <i>n</i> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et nano-Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> par rapport à l'élongation des racines	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Cucumis sativus</i>	Comparaison des toxicités des nanoparticules/vrac Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et YbCl <sub>3</sub>	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Coriandrum sativum</i>	Inhibition de la croissance induite par <i>n</i> -CeO <sub>2</sub>	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
Six espèces végétales	Phytotoxicité comparative de Y, La et Ce	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Elodea nuttallii</i>	Effets oxydatifs, nutriments et changements métaboliques associés	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Lactuca plants</i>	Toxicité du <i>n</i> -CeO <sub>2</sub> spécifique à l'espèce	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Skeletonema costatum</i>	Même inhibition de croissance induite par 13 lanthanides	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Vicia faba</i>	Transition des effets hormétiques aux effets inhibiteurs associés au La	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
Test d'Ames (5 souches) et Bhas 42 cellules	Forte mutagenèse associée au Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanométrique à la fois dans le test d'Ames et dans la transformation cellulaire de Bhas 42	Pagano <i>et al.</i> 2019 ( <i>review</i> )
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> BY4741 (4733 mutants)	Par phénotypage génomique de collections de mutants <i>knock-out</i> (KO), identification des fonctions générales et des gènes clés impliqués dans l'homéostasie des métaux Le profil des réponses est similaire au stress dû au nickel	Grosjean <i>et al.</i> , 2018
<i>Aliivibrio fischeri</i> (bactérie bioluminescente), <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> (micro-algue)	Sensibilité aux lanthanides (Ce, Gd, Lu) augmente avec le numéro atomique. PNEC associé ne suggère pas de risque toxique significatif.	Gonzalez <i>et al.</i> , 2015

## Interactions entre les ETR et les microorganismes

À l'image de leurs effets sur les végétaux, les ETR auraient une action qui peut être considérée comme stimulante sur certains microorganismes (cf. tableau 3) :

- Par exemple en induisant la production de polysaccharides extracellulaires chez *Bradyrhizobium sp.*<sup>53</sup>
- Ou la surproduction d'antibiotiques chez *Streptomyces spp.*<sup>54</sup>

Les ETR peuvent aussi être nécessaires à l'action de certaines classes d'enzymes microbiennes :

- Comme des méthanoles déshydrogénases nécessaires aux méthylotrophes.<sup>55</sup>
- Des alcools déshydrogénases (*Pseudomonas putida*).<sup>56</sup>

Ainsi, si les ETR ne semblent pas avoir d'effets toxiques prépondérants sur les bactéries, leur abondance relative est susceptible d'impacter la diversité des espèces microbiennes en favorisant certains groupes métaboliques (cf. figure 1).

Récemment, une étude réalisée par une équipe nancéenne sur les effets toxiques de l'yttrium chez la levure *Saccharomyces cerevisiae*<sup>57</sup>, a utilisé la démarche par phénotypage génomique de collections de mutants (méthode dite du *knock-out*), afin d'identifier les gènes et fonctions cellulaires impactées par l'yttrium. Les effets toxiques se rapprocheraient de ceux du nickel, la membrane cytoplasmique comme *hot spot* de la toxicité de l'yttrium étant mise en avant. Cette étude serait une première base pour l'évaluation de la toxicité de l'yttrium chez les eucaryotes. Différentes études sont attendues sur des cellules provenant d'autres organismes que les levures, notamment sur des cellules humaines.



Figure 1. Vivre sur les éléments des terres rares. Les versos de feuilles obtenues à partir de plantes trouvées sur le campus d'une université américaine (San José State University, CA) ont été pressés sur un milieu de

<sup>53</sup> Fitriyanto N. A., Nakamura M., Muto S., Kato K., Yabe T., Iwama T., Kawai K., and Pertiwinigrum A. (2011), *Ce<sup>3+</sup>-induced exopolysaccharide production by Bradyrhizobium sp.*, in MAFF211645, *J Biosci Bioeng.*, 111 : 146–152.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20947420/>

<sup>54</sup> Kawai K., Wang G., Okamoto S., Ochi K. (2007), The rare earth, scandium, causes antibiotic overproduction in *Streptomyces spp.* FEMS Microbiology Letters, 274 : 311–315.

<sup>55</sup> Skovran E. and Martinez-Gomez N. C (2015), Just add lanthanides. Some methanol-using bacteria may depend on lanthanide elements for carbon capture and energy generation, in *Science*, 348 : 862–863.

<sup>56</sup> Wehrmann M., Berthelot C., Billard P., Klebensberger J. (2011), Rare Earth Element (REE)-Dependent Growth of *Pseudomonas putida* KT2440 Relies on the ABC-Transporter PedA1A2BC and Is Influenced by Iron Availability, in *Frontiers in Microbiology*, Frontiers Media, 2019.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.02494/full>

<sup>57</sup> Grosjean N., Gross E. M., Le Jean M. and Blaudez D. (2018), *Global deletome profile of Saccharomyces cerevisiae exposed to the technology-critical element yttrium*, in *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, Frontiers Media.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.02005/full>



culture gélosé (milieu ATCC 784, Ammonium Mineral Salt) qui était soit sans (côté gauche de la boîte), soit avec (à droite) 20  $\mu\text{M}$  de  $\text{LaCl}_3$ . Ils ont ensuite été incubés à température ambiante pendant 1 semaine. La supplémentation en  $\text{La}^{3+}$  a permis à un plus grand nombre de bactéries métabolisant le méthanol (colorées en rose) de se développer. Des travaux récents ont suggéré qu'une enzyme particulière dans ces bactéries qui utilisent le méthanol nécessitait des lanthanides (Skovran & Martinez-Gomez, 2015, Science, 348 (6237) : 862-863).

## **Résumé**

Les effets toxiques des terres rares (ETR), aux concentrations que l'on peut rencontrer dans l'environnement, en dehors des mines d'extraction pour certains éléments, ne semblent pas aussi marqués que ceux des éléments métalliques dont la toxicité n'est plus à démontrer comme par exemple le cadmium, le mercure, le plomb ou le chrome. Cependant, les toxicologues estiment en général que l'on manque d'études sur les effets d'exposition à long terme.

## D. Consommation énergétique liée à l'utilisation du numérique

Concernant cette partie, comme pour d'autres, une dimension devient préoccupante : la consommation énergétique globale qui va croissant. Dans l'ensemble :

- La tendance suivie par le numérique conduit à une situation insoutenable, notamment pour ce qui est de la consommation d'énergie.
- Pourquoi les usages numériques croissent-ils ? Ce n'est pas parce que les gens les inventent, mais parce qu'ils sont constamment sollicités pour en avoir de nouveaux. De plus, toutes les entreprises sont aujourd'hui en train de réaliser leur transition numérique. Partant, elles remplacent un certain nombre d'interfaces physiques par des interfaces numériques. On se trouve dès lors confronté à un système qui n'est plus du tout vertueux, les études d'impact de cette transition numérique étant pratiquement inexistantes. C'est pour cela qu'il est très important de sensibiliser les entreprises, qui disposent d'un levier non négligeable sur les usages du grand public.
- La tendance actuelle de surconsommation numérique dans le monde n'est pas soutenable au regard de l'approvisionnement en énergie et en matériaux qu'elle requiert. Les coûts pourraient dès lors augmenter, et la fracture numérique s'aggraver.
- Les bénéfices économiques de la surconsommation actuelle du numérique ne sont pas évidents. Cela dit, on peut tout à fait continuer à utiliser de plus en plus de techniques numériques, mais à condition de privilégier une approche dite « sobre » des usages.
- La conclusion pose cette question : est-ce que notre confort numérique justifie que l'on compromette gravement la capacité de subsistance d'une partie de l'humanité d'ici une quinzaine d'années ?

## E. Impacts environnementaux du numérique

Les impacts environnementaux du numérique retiennent de plus en plus l'attention, comme pour toute technologie moderne qui pose la question de son utilité relative, de sa priorisation, parmi les autres technologies. Ainsi :

- Il n'est aujourd'hui pas possible de dire exactement combien il nous reste d'années à fonctionner sous le régime actuel de *consommation des ressources en matière de numérique*, car notre capacité à extraire les métaux nécessaires dans le futur est incertaine ; en outre, des incertitudes existent aussi sur le recyclage.
- Les gaz à effet de serre (GES) sont essentiellement générés par la consommation d'énergie à trois stades de l'usage du numérique : 1) lors de l'extraction des ressources, 2) pour la phase de fabrication des divers équipements, puis 3) par l'utilisation d'électricité pendant la phase d'usage. La moitié environ de la consommation d'énergie de l'ensemble de ces technologies, dans le monde, est liée à la phase d'extraction des ressources et à la fabrication des équipements, l'autre moitié se répartissant par tiers entre l'utilisation des équipements terminaux, les réseaux et les *data centers*. Au rythme actuel, les émissions des GES liées au numérique seront équivalentes à celles du secteur automobile.
- En matière de pollution, le numérique qui n'est pourtant qu'une petite partie de l'industrie, a finalement des impacts sur le changement des caractéristiques des sols, au travers de l'extraction minière, mais aussi sur les cycles bio-géo-chimiques, notamment pour ce qui est du carbone et de l'eau. Il en découle des impacts sur la santé humaine, à l'échelle mondiale.
- Les impacts indirects du numérique sont bien supérieurs aux impacts directs, sachant qu'il faut arrêter de raisonner de façon sectorielle, mais privilégier une vision systémique.
- Quand on veut se servir de quelque chose, nous devons nous demander pour quelle utilité. Le numérique apparaît alors comme un objet ou un ensemble d'objets qui sont des outils dont nous avons perdu le sens.
- Pourrait-on imaginer des recommandations concernant par exemple la limitation de la vitesse de calcul des algorithmes utilisés dans les échanges financiers, aux flux internationaux ? Cette question fait partie de nos objectifs de recherche : par quel angle pourrions-nous nous contraindre à ralentir ? Serait-ce par exemple en limitant la quantité de données individuelles que chaque utilisateur pourrait envoyer ?
- Au plan énergétique, le numérique apporte une fantastique possibilité de couplage de différents systèmes, notamment de systèmes complexes. Une étude italienne vieille d'une dizaine d'années évaluait les potentialités, mais aussi les risques d'une numérisation du système électrique italien. Les conclusions en étaient pour le moins nuancées, car, s'il était certainement possible de réduire les coûts, le fait de complexifier un système lui-même complexe risquait d'augmenter considérablement et de façon non traçable le risque d'effondrement de l'ensemble.
- Concernant l'intelligence artificielle, les chercheurs utilisant les technologies qui en sont issues et le public ont découvert récemment qu'elles consommaient énormément !

## F. Le numérique à l'ère de l'anthropocène et des changements climatiques

Margaret Atwood (*La Servante écarlate*, 1987 et suites) résume très bien la situation lorsqu'elle affirme que ce n'est pas seulement le changement climatique qui est en cause, que ce n'est donc pas seulement le climat qui change, mais bel et bien le fait que *tout* change. Le « forçage » actuel du climat est bien d'origine anthropique, dû aux gaz à effet de serre que sont le dioxyde de carbone, mais aussi le méthane et les oxydes d'azote.

Dès lors que des activités sont basées sur l'électricité, ce qui est le cas pour le numérique, elles ne doivent pas être exclues des émissions de gaz à effet de serre, comme cela a été exposé dans le chapitre précédent. Derrière une éolienne, derrière un panneau solaire photovoltaïque, se cache l'industrie minière qui, elle, est carbonée. La notion même d'« énergies renouvelables » est très discutable.

La question qui se pose est donc la suivante : *combien de temps nous reste-t-il ?* L'une des modélisations simples qu'il est possible de mener est *le pic de Hubbert* (*Hubbert Peak*, encore appelé *courbe de Hubbert*), du nom d'un géologue américain travaillant pour l'industrie pétrolière. Une étude établie sur la criticité des métaux et métalloïdes montre que des ressources comme le silicium, le germanium, l'antimoine ou l'arsenic, mais aussi l'argent, l'or et le cuivre, autant d'éléments qui entrent dans la composition de l'électronique, atteindront un pic vers 2050.

On pourrait donc proposer de recycler ces matières premières. Certes, une pression commence à se faire pour que le recyclage soit mis en place, mais la volonté politique et économique ne suffit pas ; encore faut-il trouver les procédés physico-chimiques pour réaliser ce recyclage, qui est pour le moins très compliqué et implique une consommation d'énergie énorme.

La question qui se pose, dès lors, est celle-ci : *vaut-il mieux chercher à trouver plus de ressources, ou consommer moins ?* La réponse est connue : dans l'état actuel des choses, cela ne sert à rien ou presque de chercher plus !

Dans le cadre d'une problématique d'ensemble, on pourrait dire que le concurrent majeur de l'Occident est la Chine. Ce pays dispose en effet dorénavant, après avoir copié et acheté, de capacités technologiques suffisantes ; il a en outre des capacités financières énormes pour produire, et bénéficie, comme il a déjà été dit, d'énormes gisements de nombreuses matières premières. La Chine, de plus, occupe, pour ce qui est de la prospection et de l'achat de gisements, une grande partie de la planète, en particulier en Afrique, alors que l'Europe s'est complètement désengagée de l'exploitation des ressources minérales. Cela signifie que ces matériaux nécessaires sont de nature critique, non seulement parce que leur concentration diminue dans les mines, *mais aussi parce que des tensions internationales pourraient survenir pour en disposer.*

Cela signifie encore que vers 2050, si l'on fait comme Samsung ou Apple, « *business as usual* », nous ne serons pas à l'abri de tensions importantes à la fois dans le secteur énergétique, mais aussi dans celui des minerais. Rappelons une fois de plus que si l'on coupe l'électricité, plus rien ne fonctionne, y compris et surtout ce qui est informatisé.

Le recyclage, quand bien même il est possible et serait améliorable, doit se faire dans le cadre d'une société n'accroissant pas sa consommation de façon exponentielle. Dans ce cas-là, il n'a qu'un effet de décalage de quelques années. Dans un contexte où, d'ores et déjà, la numérisation a innervé tous les domaines sensibles des sociétés, il est clair que *la question consistant à gagner du temps se pose de façon cruciale.*

## G. Recommandations relatives à la partie I

Au regard des éléments développés dans les chapitres ci-dessus, en termes de prévention en général, le CPP propose aux autorités publiques et aux acteurs du numérique de considérer les questions suivantes :

- **Peut-on envisager de limiter le déploiement du numérique aux seuls applications et domaines bénéfiques pour l'environnement, comme pourrait le laisser entendre certains ?**
- **Faudra-t-il réguler davantage les priorités d'utilisation des applications numériques ? Et selon quels critères et modalités ? Par exemple, le Haut Conseil pour le Climat formule des recommandations dans ce domaine de façon à s'assurer que le déploiement de la 5G reste compatible avec les objectifs « bas carbone » de notre pays.**
- **Pourrait-on aller jusqu'à envisager un dispositif de bonus-malus environnemental pour encadrer les nouveaux déploiements du numérique ? L'impact environnemental de l'utilisation grand public des NTIC étant largement porté par les terminaux, un dispositif de bonus-malus qui encouragerait une utilisation prolongée de ces appareils serait approprié. La loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (dite loi AGEC) est un bon outil dans ce sens, qui favorise également la réparabilité et le financement des réparations effectives des appareils. La capacité à faire évoluer les appareils sans les changer totalement apparaît en effet comme une piste pertinente.**

**Concernant les ressources océaniques** et reprenant l'avis du Conseil scientifique du patrimoine naturel et de la biodiversité<sup>58</sup> rendu en 2014, le CPP recommande les mesures suivantes, en termes de précaution :

- « Application systématique du principe de précaution et mise en place d'études pluridisciplinaires qui combinent les approches écologiques et économiques, incluant notamment les impacts sur les écosystèmes, et l'intégration de la rentabilité et la durabilité de l'exploitation des ressources. »
- « Mise en place, dans le cadre d'une coopération internationale, d'une entité capable de disposer d'une gouvernance pour la gestion rationnelle et durable des ressources des écosystèmes profonds. »
- « Décision pour qu'un pourcentage des sommes pour la prospection et l'exploration des ressources profondes soit dévolu à la recherche. »
- « Création d'un fonds de garantie ou de caution permettant de faire face aux situations écologiques d'urgence, type marée noire, destruction importante d'habitats, etc. »

**Concernant les terres dites « rares »**, le CPP recommande, en termes de précaution :

- Des études plus approfondies nécessaires pour bien cerner les effets toxiques des ETR, d'une part pour prendre en compte leurs mélanges ayant de potentiels effets synergiques, d'autre part pour anticiper l'effet des concentrations futures dans l'environnement qui, du fait de leur extraction quasi exponentielle, sont très certainement amenées à augmenter significativement.
- Des études d'impact sur la dynamique des populations des écosystèmes, en commençant par les microorganismes, premier maillon de la chaîne trophique.
- L'évaluation de la pertinence de leur usage non seulement au regard des conditions d'exploitation et de leurs impacts (et de la responsabilité des entreprises dans ces domaines), mais aussi, plus largement, dans une perspective de durabilité et de numérique « sobre ».

---

<sup>58</sup> Le CSPNB est chargé auprès du MTES d'une fonction de veille, de conseil, d'alerte et de réflexion prospective sur l'ensemble des questions scientifiques concernant le patrimoine naturel terrestre et aquatique (eaux douces ou marines), qu'il s'agisse de paysages, d'écosystèmes, d'espèces ou de génomes.

**Concernant la problématique de la consommation d'énergie des TNIC, le CPP recommande en termes de précaution de :**

- **Informier et faire prendre conscience, en matière d'éducation à l'environnement**, des dangers encourus et des risques pris. Rendre accessible au public, avec l'ADEME, gratuitement, la base de données de l'outil appelé REN (ou référentiel environnemental du numérique). Il s'agit d'un prototype de mini-base de données permettant à tout un chacun de savoir quel est l'impact environnemental d'un *smartphone*, d'un téléviseur ou d'un ordinateur, etc.
- **Mesurer l'empreinte carbone du numérique à des échelles pertinentes et parlantes (pays, entreprise...)**. Sur la question de l'impact environnemental du numérique, l'Agence française de développement (AFD) procède à un bilan carbone, d'autres bailleurs internationaux commençant eux aussi à le réaliser, mais ce type de bilan n'est pas du tout de mise dans les entreprises des pays développés. Les entreprises peuvent prendre par exemple un certain nombre de mesures qui ne sont pas techniques, comme le fait d'allonger la durée de vie des ordinateurs portables professionnels de 3 à 5 ans, ce qui réduit de quasiment 40 % l'empreinte carbone.
- **Adopter la sobriété numérique** comme principe d'action et ne pas négliger les alternatives au numérique. Pour cela, il sera nécessaire de mobiliser le levier de la commande publique, par l'adoption d'un certain nombre de règles allant dans ce sens. (Dans tous les cas, la taxe carbone n'est pas suffisante en matière de numérique, et il faudra certainement s'interroger avec des spécialistes des politiques publiques sur la mise en place d'un système réglementaire plutôt que fiscal).
- Donner les outils aux entreprises et aux organisations pour piloter d'un point de vue environnemental leur **transition numérique**. Ces outils, disponibles, leur permettront de calculer de façon simple ce que sera l'impact environnemental prévisionnel d'une transition numérique.
- Prioriser les usages numériques avec pour objectif principal, pour les 3 années à venir, de trouver **le moyen de privilégier une réduction de l'émission des gaz à effet de serre**. (Ce genre de processus commence d'ailleurs à être mis en pratique dans les pays en voie de développement, une bonne partie de ces projets étant financée par des bailleurs internationaux).
- **Améliorer la prise en compte des aspects systémiques du numérique**. Cela vise notamment les secteurs des transports, de l'énergie ou de l'habitat.
- Œuvrer à l'échelle européenne et auprès d'organismes internationaux.

Enfin, on ne peut, dans tous les cas, que constater que l'immédiateté prime, et que seuls les intérêts économiques ou plutôt financiers sont réellement pris en compte. On doit donc espérer pouvoir disposer, devant un produit technologique innovant majeur, notamment de nature numérique, d'une menée réflexive en amont de la prise de décision publique en situation d'incertitude scientifique, donc au nom de l'application du principe de précaution.

Le Comité entreprend de participer à la réflexion sur la manière de repenser les usages. À ce propos, il lui semble pertinent de travailler plus avant sur le concept de « sobriété numérique » et les modalités de sa mise en œuvre effective.

## II. Environnement numérique et relations sociales

Dans cette deuxième partie, le Comité de la prévention et de la précaution a recensé quelques-uns des principaux impacts des technologies numériques sur les relations sociales (relation aux autres, travail, activités sociales...).

L'exhaustivité n'est pas de mise car l'inclusion du numérique dans nos existences est un phénomène d'une ampleur et d'une complexité exceptionnelles ; qui plus est, la situation évolue en permanence à un rythme soutenu, parfois frénétique. Nous évoquerons pour commencer des éléments généraux concernant l'évolution de l'accès à l'Internet, l'impact potentiel sur les relations sociales de l'avènement du numérique et ses enjeux en terme de développement. Puis seront détaillés les différents enjeux selon les âges de la vie, principalement l'enfance, la vie professionnelle, les personnes âgées. Enfin seront abordées deux autres entrées, plus spécifiques, l'une en termes d'accessibilité du numérique et l'autre en termes de médecine vétérinaire liée aux enjeux de l'élevage.

### A. Éléments généraux

L'évolution de la société en lien avec l'installation du numérique est largement documentée. Le chapitre qui suit a pour objectif de mettre en exergue les principales questions posées par l'intervention du numérique sur les modalités évolutives des rapports sociaux.

#### 1. Inégalités et reproduction sociale

Parce que le numérique s'inscrit dans une société qui se pose d'ores et déjà des questions en terme d'inégalité, de conflit, de relation sociale, il est d'abord pensé par rapport à ces différents thèmes.

#### Fracture numérique

Alors que l'on évoque des inégalités sociales en général, dans le cas du numérique on parlera de « fracture numérique », le terme de fracture indiquant une forte prévalence de disparités sociales. La fracture numérique renvoie aux inégalités en termes d'équipement et d'usage des outils numériques (autant les ordinateurs que les téléphones portables). Par exemple, selon l'Insee (2019), l'âge est déterminant dans la possession d'outils permettant d'accéder à Internet : 53 % des plus de 75 ans n'ont pas d'équipement contre 2 % des 15-29 ans. Par ailleurs, les revenus des ménages et le niveau de diplôme sont également clivants : plus ils sont faibles, moins le ménage a de chance d'être équipé. Le non-usage d'Internet serait lié au manque d'équipement car l'on retrouve les mêmes facteurs pour ces deux catégories d'âge.

On peut ajouter que l'usage d'Internet doit être apprécié diversement : bien qu'il n'ait pas été identifié d'études sur cet enjeu, certains usages d'Internet semblent privilégiés par des catégories sociales ou classes d'âge particulières – notamment la lecture de vidéo ou le *gaming* par les plus jeunes, ou des usages spécifiques, informationnels par exemple, pour les personnes plus âgées.

Une question cruciale est celle de l'*illectronisme*. De nos jours, l'acquisition d'une compétence numérique est devenue indispensable pour prendre part à la société en tant que citoyen : déclarer ses revenus, rechercher un emploi, créer son entreprise, etc. Autant de démarches administratives qui se font désormais majoritairement en ligne. *Mais qu'en est-il des personnes ne sachant pas se servir de ces outils numériques ?*

L'illettrisme numérique, encore appelé illectronisme, est un tabou qui touche les plus vulnérables. Il résulte de l'inaptitude d'un individu à utiliser les outils numériques du quotidien. Ce phénomène touche 17 % de la population, soit près de 13 millions de personnes en France, selon l'Insee. Il est engendré essentiellement par des facteurs sociaux, territoriaux et générationnels. **En effet, 50 % des non-internautes résident dans des**

## **communes de moins de 20 000 habitants et 34 % des personnes peu ou pas diplômées sont concernées par ce phénomène.**

À l'ère du tout numérique, la fracture numérique et l'illectronisme creusent encore davantage les inégalités déjà existantes et renforcent l'exclusion des personnes déjà fragiles, puisque 16 % des ménages les plus modestes sont confrontés à l'illectronisme, contre 4 % des ménages les plus aisés. Pire encore, selon un sondage publié en novembre 2018, le numérique est perçu par les personnes interrogées comme davantage un facteur excluant (39 %) qu'un facteur d'inclusion (18 %). Alors que la crise sanitaire et sociale continue de progresser en France, les conséquences de la fracture numérique et de l'illectronisme sont dévastatrices. À l'heure où l'enseignement se fait de plus en plus à distance, **1 famille modeste sur 4 n'a pas l'équipement nécessaire à la scolarité de ses enfants.**

Ces compétences relatives à l'usage, sinon plein et entier, à tout le moins efficient des ressources numériques sont un réel enjeu puisque le numérique conditionne aujourd'hui l'accès à des ressources toujours plus nombreuses et qui ont tendance à se substituer à des usages autrefois courants, tels que l'achat en ligne, l'inscription à des formations ou la communication généralisée par courriels.

Il faut enfin noter que, parmi les ménages non équipés, majoritairement des personnes seules ou des couples sans enfants, la justification de ce choix est liée « [au] manque d'intérêt (cité par 19 % des non-équipés), [à] la volonté de protéger sa vie privée (15 %) ou [au] fait de disposer d'un accès hors du domicile (6 %) », le manque d'intérêt restant surtout évoqué par les moins diplômés.

### **Accès au numérique et violence**

Un autre phénomène général important est la violence associée à l'usage du numérique, violence souvent elle-même associée au harcèlement – on parle alors de *cyber-violence* et de *cyber-harcèlement* (ORVF, 2018 ; Blaya, 2011). Ainsi, selon les pays, entre 5 à 20 % des jeunes déclaraient dès 2011 avoir déjà été harcelés par téléphone portable ou Internet (Blaya, 2011). Une étude de 2013 rappelle que cette année-là, « 18 % des collégiens déclarent avoir été insultés, humiliés ou victimes d'actions dévalorisantes (surnoms, photos ou films « méchants ») par Internet ou par téléphone portable ; 5 % des élèves déclarent même des violences faites *via* les nouvelles technologies, pouvant s'apparenter à du « cyber-harcèlement »<sup>59</sup>.

Ce phénomène touche beaucoup plus souvent les élèves déjà en situation de harcèlement, quel que soit le type de violence (55 %). Les filles en sont plus souvent les victimes, et il concerne davantage les élèves de troisième.

Les études indiquent ainsi que la cyber-violence est souvent concomitante de violences dans la vie réelle : selon une autre étude (Blaya, 2010) « 40 % des jeunes victimes de cyber-violence disent avoir été frappés dans leur établissement, 42 % déclarent avoir été menacés avec une arme (blanche) et 25 % avoir été victimes de racket. Lorsque l'on s'intéresse aux caractéristiques des protagonistes (victimes et agresseurs), on trouve que les agresseurs en ligne sont aussi plus souvent agresseurs dans la vie réelle mais sont aussi fréquemment impliqués dans ce type de violence comme victimes et témoins. »

Cette cyber-violence, qui peut se manifester sous forme de cyber-harcèlement chez les jeunes – avec des cas emblématiques comme, par exemple, « l'affaire Mila » qui a mis en lumière la banalisation des insultes et de graves menaces sur les réseaux sociaux –, renforce également *les violences sexistes ou sexuelles qui reproduisent les rapports de domination, voire de contrôle et d'humiliation entre hommes et femmes*. Le chiffre de 73 % de victimes chez les femmes, pendant toute leur vie et dans tous leurs espaces de vie, avait été avancé par l'ONU en 2015 avant d'être retiré à cause de la difficulté méthodologique relative à la qualification de la cyber-violence (ONU, 2015).

Une autre étude sur les violences conjugales montre que celles-ci s'accompagnent là encore très fréquemment de cyber-violences : contrôle des usages, harcèlement par messagerie, surveillance, changement des mots de passe, captation ou diffusion d'images intimes (ORVF, 2018). Ces phénomènes pourraient être plus réguliers

---

<sup>59</sup> Hubert T. (novembre 2014), Note d'information de la direction évaluation, prospective et performance (DEPP), n°39.



étant donné que les durées des unions cohabitantes sont plus courtes et par là davantage renouvelées (*Insee*, 2015).

## 2. Impact du numérique sur les configurations relationnelles et sociales

Les bénéfices du numérique sont ici contestés, et ceci jusque dans certaines pratiques *a priori* moins problématiques que celles relevant directement du harcèlement ou d'actes malveillants : ainsi, il a été montré (*Kross et al.*, 2013) que l'utilisation de Facebook permettait certes de répondre au besoin des individus en termes de lien social, mais que cet usage n'améliorait pas le bien-être psychologique des individus et au contraire l'amoindrissait – notamment à cause des comparaisons entre les individus ou leurs activités et de l'incapacité de participer à tous les événements que mettent en avant les réseaux sociaux. Il faut donc que les acteurs concernés n'hésitent pas à faire des liens entre harcèlement et cyber-harcèlement pour protéger les victimes sous ces deux angles d'approche.

Il est en tous cas nécessaire de garder en tête que le numérique n'est pas neutre : il contribue à générer des inégalités, des violences et du mal-être qui peuvent conduire à diverses difficultés ou exacerber certains phénomènes. Des répercussions concernent notamment l'accès aux droits ou l'exclusion de certaines populations qui n'ont pas ou peu accès au numérique (*Défenseur des droits*, 2019) – cette exclusion touche en particulier les personnes âgées et celles aux revenus mensuels inférieurs à 1000 euros (*FPFP*, 2018), et elle est certainement croissante à mesure des évolutions technologiques qui nécessitent de nouveaux apprentissages. D'autres évoquent les suicides (*Blaya*, 2011) et l'étude de l'ORVF mentionne diverses conséquences : isolement, effets néfastes sur la santé mentale ou physique (perte de confiance en soi, perte de sommeil).

Pour autant, il paraît raisonnable de penser que le numérique reproduit les configurations existantes plus qu'il ne les transforme. Il tend certes à invisibiliser certaines inégalités, puisque ceux qui n'y ont pas accès sont de fait mis à l'écart et ne peuvent dès lors pas être inclus dans une analyse sur les enjeux des pratiques du numérique. Mais ceci étant dit, on notera par exemple et avec nuance qu'en France le taux de suicide n'a pas augmenté depuis l'an 2000 ; il a même baissé pour toutes les classes d'âge entre 2000 et 2014<sup>60</sup>. Il faut toutefois envisager le fait que des suicides ou des conséquences en termes de santé mentale, liés au numérique, ont pu se substituer à d'autres causes.

Concernant la violence conjugale ou chez les jeunes, les études montrent que la cyber-violence accompagne et renforce la violence, et dans un autre contexte, les travaux sur les apports des réseaux sociaux numériques tendent à prouver (*Bidart & Kornig*, 2017), que « ce qui se trame sur Facebook est [...] bien plus fortement ancré dans les contextes sociaux et les normes relationnelles antérieures qu'il n'y paraît », ou avec les mots de Marquet et Janssen (2012) dans leur étude sur le lien social à l'épreuve d'Internet, que « ce qui se déploie sur la toile ne semble pas fondamentalement différent de ce qui se passe et se passait en dehors de celle-ci ».

Dans ce contexte, les réseaux sont aussi le lien d'une intense pression, notamment pour les populations jeunes, relative à l'image que chacun développe de soi. On constate ainsi l'existence des liens entre fréquentation des réseaux sociaux et détresse psychologique, perception dégradée de l'image de soi, voire recours à des soins psychologiques ou psychiatriques chez les jeunes<sup>61</sup> ou même recours à la chirurgie esthétique<sup>62</sup>. Et cela ne concerne pas que les jeunes : l'explosion des réunions professionnelles par visioconférence à l'occasion de la pandémie de Covid-19 a produit un effet comparable !<sup>63</sup>

---

<sup>60</sup> Données disponibles sur [infosucide.org](https://www.infosucide.org) dont la base de données est gérée par le CépiDc-Inserm.

<https://www.infosucide.org/reperes/epidemiologie/epidemiologie-france-suicides/>

<sup>61</sup> Notamment les études recensées ici sur ce thème,

<https://theconversation.com/facebook-has-known-for-a-year-and-a-half-that-instagram-is-bad-for-teens-despite-claiming-otherwise-here-are-the-harms-researchers-have-been-documenting-for-years-168043>

<sup>62</sup> [https://www.lexpress.fr/actualite/societe/jeunes-les-reseaux-sociaux-rabattent-pour-la-chirurgie-esthetique\\_2094332.html](https://www.lexpress.fr/actualite/societe/jeunes-les-reseaux-sociaux-rabattent-pour-la-chirurgie-esthetique_2094332.html)

<sup>63</sup> Shauna M. Rice, Emmy Graber and Arianne Shadi Kourosh, *A Pandemic of Dysmorphia: "Zooming" into the Perception of Our Appearance in Facial Plastic Surgery & Aesthetic Medicine*, Vol. 22, N°6 (publié en ligne le 6 novembre 2020).

<https://doi.org/10.1089/fpsam.2020.0454>

À une échelle macro, enfin, le numérique n'entre pas en rupture avec l'idéologie du progrès industriel, scientifique et technique ni avec celle du marché : en ce sens il reproduit également les logiques macrosociales précédentes.

### 3. Quelles recommandations en matière de prévention et de protection contre la cyber-violence ?

#### Contexte au plan législatif

Bien que le cyber-harcèlement ne fût pas une infraction réprimée en tant que telle par la loi française, l'auteur d'actes accomplis à cette fin était susceptible de voir sa responsabilité engagée sur le fondement du Droit civil, du Droit de la presse ou du Code pénal. Ainsi :

- Une injure ou une diffamation publique peut être punie d'une amende de 12 000 euros (art. 32 de la Loi du 29 juillet 1881).
- Pour le droit à l'image, la peine maximum encourue est d'un an de prison et de 45 000 euros d'amende (art. 226-1, 226-2 du Code pénal).
- L'usurpation d'identité peut être punie d'un an d'emprisonnement et de 15 000 euros d'amende (art. 226-4-1 du Code pénal).
- La diffusion de contenu à caractère pornographique d'un mineur est passible de 5 ans d'emprisonnement et de 75 000 euros d'amende.

Depuis 2018, la loi dite « Loi Schiappa » (loi n°2018-703 du 3 août 2018), contre le cyber-harcèlement et les raids numériques, renforce la lutte contre les violences sexuelles et sexistes.

*Le cyber-harcèlement, véritable fléau 2.0, sévit depuis les débuts d'Internet, mais s'est fortement aggravé avec l'avènement des réseaux sociaux. En 2019, on a observé que plus de 40 % des moins de 50 ans avaient déjà subi des attaques répétées sur les plateformes sociales en ligne, dont 22 % des jeunes âgés de 18 à 24 ans. En 2020, un internaute français sur quatre dit avoir été victime ou témoin d'un cyber-harcèlement (Civisme en ligne-France inter. 2021).*

#### Sensibilisation et information chez les plus jeunes

Parmi ses combats, la Fédération des parents d'élèves Paris rappelle que la lutte contre le harcèlement ne peut pas être efficace sans des actions fortes de sensibilisation et de prévention dès le primaire. À plusieurs reprises ces dernières années, la FCPE Paris est venue soutenir des conseils locaux d'écoles élémentaires saisis de situations de harcèlement, pour les accompagner dans leur propre action de soutien des élèves et familles concernés.

La FCPE Paris invite ses élus au sein des conseils d'école à questionner les équipes éducatives (enseignants et animateurs) pour savoir quels types d'actions de prévention sont mises en place, sous quels formats, avec quelle collaboration. Il est aussi important que le temps du conseil d'école puisse être consacré à un diagnostic collectif de situations précises qui impactent beaucoup le climat scolaire. La FCPE Paris a fortement communiqué à la rentrée 2016, notamment lors de son premier Forum des parents, sur les supports de communication et d'information utiles pour les plus jeunes élèves.

Sur les questions de la cyber-violence et du cyber-harcèlement, la série *Vinz et Lou stoppent la violence* est à recommander pour expliquer que par écran interposé, on peut quand même blesser. Dans l'un des épisodes, Paola est victime de moqueries. Un montage a été fait à partir d'une photographie d'elle et d'une image d'autruche. Personne ne sait qui est l'auteur de ce montage. Vinz propose donc de mener l'enquête pour mettre fin à ces moqueries.

Concernant le cyber-sexisme, afin de sensibiliser et informer le jeune public sur cette nouvelle forme de violence, un kit « Stop Cyber-sexisme » est mis à disposition des établissements scolaires et autres structures en lien avec ce public. Un spot a aussi été réalisé. Il s'appuie sur des faits réels issus de témoignages de l'étude.

## La nécessité d'une alliance éducative

Le harcèlement et le cyber-harcèlement sont souvent liés et affectent les mêmes victimes. Il est indispensable qu'une alliance éducative existe entre les familles, les partenaires et l'École pour qu'ils puissent diminuer.

L'association e-Enfance, agréée et subventionnée par le Ministère, propose des outils mais aussi des actions de sensibilisation pour les parents, les élèves et les équipes éducatives. Sont proposées des pages « Infos parents » utiles pour savoir comment activer le contrôle parental, comment mieux comprendre l'univers des jeux vidéo, quels sont les termes utilisés sur Internet, ainsi qu'une série de conseils pour protéger ses enfants sur Internet.

## Quand l'enfant est victime de cyber-harcèlement

### **Pour en savoir plus**

*Le Guide de prévention des cyberviolences en milieu scolaire.*

Voir->

[https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Valeurs\\_republicaines/96/1/Guide\\_de\\_prevention\\_cyberviolence\\_663961.pdf](https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Valeurs_republicaines/96/1/Guide_de_prevention_cyberviolence_663961.pdf)

*Le portail d'info #NONAUHARCELEMENT.* Voir->

<https://www.education.gouv.fr/non-au-harcelement>

La Journée nationale « Non au harcèlement » du jeudi 3 novembre 2016. Voir-> [https://www.bas-rhin.gouv.fr/content/download/20418/147049/file/2016\\_harcelement\\_DP\\_653124.pdf](https://www.bas-rhin.gouv.fr/content/download/20418/147049/file/2016_harcelement_DP_653124.pdf)

Les conséquences du harcèlement et du cyber-harcèlement peuvent être graves (isolement, perte de l'estime de soi, baisse des résultats scolaires voire décrochage, profond mal-être). Aucun enfant, aucun adolescent ne doit subir cela, personne ne doit rester silencieux.

Comme toujours, il y a des signes qui doivent alerter. Si l'enfant ne parle pas de violences subies mais qu'il se replie sur lui-même, s'il a des réactions inhabituelles lorsqu'il consulte son téléphone portable par exemple, s'il semble isolé, s'il est nerveux, anxieux, fatigué, s'il rencontre des problèmes de sommeil ou des troubles du comportement alimentaire, il peut être victime de harcèlement ou de cyber-harcèlement.

En cas de cyber-harcèlement, la victime ou son représentant peut demander le retrait des publications à leur auteur ou au responsable du support électronique. Elle peut également faire un signalement en ligne à la police ou à la gendarmerie ou porter plainte. Comme précisé ci-dessus, au plan législatif, ce délit est sanctionné par des peines d'amendes et/ou de prison, et les sanctions sont plus graves si la victime a moins de 15 ans.

## Chez les adultes

En cas de cyber-harcèlement, outre la possibilité de faire un signalement en ligne à la police ou à la gendarmerie et/ou porter plainte, la victime peut également demander le retrait des publications à leur auteur ou au responsable du support électronique. Elle peut agir directement auprès des intermédiaires, par exemple les responsables d'un forum ou d'un réseau social. Cette démarche n'est pas une plainte officielle. L'intervention auprès des réseaux sociaux ou des hébergeurs de vidéos permet parallèlement de demander le retrait de tel ou tel contenu au nom du respect des personnes. Cependant, les conditions de retrait dépendent des propres critères de ces organismes et non des lois françaises. Sur les forums, les messages jugés obscènes ou menaçants peuvent être signalés aux responsables. L'usage des réseaux sociaux permet aussi théoriquement de bloquer une personne malfaisante, c'est-à-dire d'empêcher toute mise en contact de celle-ci avec les receveurs potentiels.

En cas d'urgence, mais uniquement dans cette situation, il est possible d'alerter la police ou la gendarmerie par appel téléphonique, ou par SMS, si la victime est dans l'incapacité de parler.

Signaler les contenus à la police ou à la gendarmerie est une intervention de traitement et de prévention. Le site PHAROS, géré par des policiers et gendarmes spécialisés, permet de signaler les contenus illicites se trouvant sur Internet.

### Références bibliographiques

- Insee première, n°1780. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4241397>
- ORVF (2018), Rapport sur les cyber-violences conjugales, Centre H. Auclert. <https://www.centre-hubertine-auclert.fr/outil/rapport-cyberviolences-conjugales-2018>
- Blaya C. (2010), Cyberbullying and happy slapping in France, in Mora Merchan J. & Jager T., eds. Cyberbullying : a cross-national comparison, VEP, Landau.
- Blaya C. (2011), Cyberviolence et cyberharcèlement : approches sociologiques, in Nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation, 1(53) : 47-65.
- ONU (2015), Cyber Violence against women, Report of the Broadband commission.
- Kross E. et al. (2015), Facebook Use Predicts Declines in Subjective Well-Being in Young Adults, in PLOS One, 8(8) : e69841.
- Rapport du Défenseur des droits (2019), Dématérialisation et inégalités d'accès aux services publics.  
<https://www.defenseurdesdroits.fr/fr/rapports/2019/01/dematerialisation-et-inegalites-dacces-aux-services-publics>
- Fondation des petits frères des pauvres (FPFP) (2018), L'exclusion numérique des personnes âgées.  
<https://www.petitsfreresdespauvres.fr/informer/prises-de-positions/contre-l-exclusion-numerique-de-4-millions-de-personnes-agees>
- Marquet J., Janssen C. (2012), Lien social et Internet dans l'espace privé, L'Harmattan.

## Résumé

- La **fracture numérique** renvoie aux inégalités en termes d'équipement et d'usage des outils numériques. L'âge est déterminant dans la possession, l'usage et la maîtrise d'outils permettant d'utiliser les ressources du numérique, ainsi que les revenus ou le niveau de diplôme. Qui plus est, les pratiques évoluent vite et demandent d'être en mesure de se former ou de « mettre à jour » ses compétences régulièrement.
- Un autre phénomène général important est la violence ressentie ou imaginée *via* l'usage du numérique, violence souvent associée au harcèlement – on parle alors de **cyber-violence et de cyber-harcèlement**. Il est donc nécessaire de garder en tête que le numérique n'est pas neutre : il contribue à générer des inégalités, des violences et du mal-être, qui peuvent conduire à différentes difficultés ou exacerber certains phénomènes. Pour autant, il paraît raisonnable de penser que le numérique reproduit les configurations existantes plus qu'il ne les transforme. Une nouveauté réside toutefois dans le brouillage entre les domaines de l'intime et du privé que redent possible les réseaux sociaux, ainsi que la persistance des données mises en ligne.
- Les usages du numérique, et notamment des réseaux sociaux, peuvent avoir des conséquences importantes sur les configurations relationnelles et sociales ; ils conduisent parfois, notamment chez les populations les plus jeunes, à des formes de pression sociale, voire de harcèlement, ayant pour conséquence une détérioration de l'image de soi, des troubles psychologiques ou même des conduites dangereuses.
- Ces phénomènes, en plein développement, doivent faire l'objet de recherches tant au plan des conséquences sur les individus concernés, qu'au regard des mécanismes de régulation des échanges sur les réseaux et de sanction des conduites néfastes.

#### 4. L'évolution cérébrale et celle de nos comportements

- Nous ne pouvons pas vraiment pour l'heure synthétiser de façon exhaustive et actualisée ce qui change dans les comportements humains avec l'usage des technologies numériques, dont l'évolution est extrêmement rapide. Cependant, nous pouvons en avoir une idée en analysant les changements (rapports sociaux, rapport à l'information, à l'apprentissage) des quarante dernières années, depuis l'avènement de l'informatique personnelle.
- Les domaines qui paraissent aujourd'hui être les plus concernés sont les savoirs, mobilisant « l'intelligence collective », les apprentissages sélectionnant les « informations essentielles », mais aussi la relation à soi-même avec le questionnement sur « l'inadaptation sociale », et la construction de sociabilités au sein de « centres d'intérêt partagés ».
- Quelques personnes très privilégiées bénéficient de toutes les technologies « d'augmentation », alors que la plus grande majorité de la population en est écartée ; parallèlement, certaines technologies (*smartphone* relié à Internet) sont très largement développées, et ce sur l'ensemble des continents.
- L'imprévisible n'est plus perçu comme un danger, mais comme une opportunité mettant à l'épreuve la résilience de chacun et sa capacité de changement et d'adaptation, dans une perspective largement inspirée du *management* libéral des organisations.
- La « gamification » ou ludification est une tendance, au sein de certaines entreprises, à organiser les relations entre les salariés comme celles existant entre les joueurs d'un jeu vidéo (ce qui a bien souvent pour conséquence un accroissement du recouvrement entre vie professionnelle et vie privée). Elle affecte aussi les relations entre administrations et usagers à travers le recours notamment aux politiques dites de « *nudges* » ou « coups de pouce à la décision ».
- Il faut garder à l'esprit que nous resterons encore très longtemps beaucoup plus novateurs, polyvalents et imprévisibles que ne le sont les machines !

## 5. Communication et savoirs à l'ère numérique

### a) Aspects relatifs à la communication :

#### La question des « fake news » ou « infox »

Un rapport sur la difficile posture des scientifiques à l'ère de la postmodernité a été coordonné par Jean-Gabriel Ganascia<sup>64</sup>. En somme, que se passe-t-il lorsque, dans l'espace public, circulent un certain nombre d'informations qui sont manifestement contraires aux conclusions des recherches scientifiques ? Cette question est d'autant plus difficile que nous vivons dans une société où les postures d'autorité sont systématiquement mises en cause.

Jean-Gabriel Ganascia a emprunté à Steve Mann le concept de « sousveillance », un banal téléphone portable pouvant diffuser de l'information partout sur les réseaux. Or, le problème de cette « sousveillance » est que, nos capacités cognitives étant limitées, nous sommes assaillis d'informations difficiles à vérifier. Dans ce même travail, Jean-Gabriel Ganascia avait imaginé une architecture inspirée de celle, dédiée à la surveillance, conçue à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle par Jeremy Bentham, le « Panopticon ». Le monde moderne, lui, prétend abolir la dissymétrie de l'information propre à ce « Panopticon », raison pour laquelle est proposé le terme de « Catopticon » : grâce à la présence de miroirs, tout le monde, et non plus seulement les surveillants, peut ainsi voir tout le monde depuis une position surplombante. Du coup, on aura désormais tendance à faire confiance à des *organismes informationnels* ou « orins », un terme qui, dans le monde de la marine, désigne le cordage reliant une bouée à l'ancre de fond. C'est par ces « orins » que nous entrons désormais en relation avec les autres, les possesseurs de ces « orins » ayant dès lors un pouvoir considérable, bien plus considérable du reste que celui des États.

Dès lors, les scientifiques ne constituent plus une autorité, mais un groupe parmi d'autres pouvant, comme les autres bien sûr, être mis en cause. Jean-Gabriel Ganascia déclare ne pas posséder de solution miracle concernant cette question, mais pense qu'un travail de fond doit être mené, notamment dans le domaine de l'environnement, sur ce sujet central. Ces craintes se sont d'ailleurs considérablement amplifiées ces derniers mois.

Une autre question se pose, apparemment moins importante, qui concerne la problématique des conflits d'intérêts, dont les scientifiques sont souvent accusés, ce qui aboutit à décrédibiliser leur parole. Il serait illusoire de proposer une transparence totale, laquelle pourrait exposer les différents acteurs. Jean-Gabriel Ganascia a soulevé l'idée selon laquelle une confidentialité devrait être de mise, par le biais d'un « tiers de confiance » connaissant les noms des personnes concernées et faisant office de recours. Pour que ce tiers de confiance ne soit pas à son tour soupçonné, il faut que les règles mises en place soient extrêmement claires pour tout un chacun.

Il apparaît ainsi absolument nécessaire, pour les scientifiques, d'être en mesure de prendre leurs responsabilités et de faire savoir au grand public quels sont les enjeux majeurs qui le guettent aujourd'hui, alors que chacun peut constater l'existence d'informations fallacieuses (« fake news ») qui circulent. Les scientifiques sont inquiets par nature (selon le concept d'*in-quiétude* analysé par Emmanuel Levinas), et c'est bien parce qu'ils n'accordent pas leur confiance *a priori* qu'ils essaient d'identifier des preuves. Les controverses intellectuelles sont nécessaires, et c'est d'ailleurs comme cela que la science progresse ; cependant, leurs doutes propres sont pris en otage par des gens qui, eux, ne doutent pas ! Jean-Gabriel Ganascia estime qu'un lieu dédié (institutionnel) devrait être créé, ou attribué à une institution déjà existante, pour traiter ces controverses.

#### Des transformations d'ordre épistémologique

---

<sup>64</sup> Intitulé Difficile vérité à l'heure de la post-vérité, des réseaux sociaux et des « deep fakes » : Quelle posture pour les scientifiques ? Une vidéo de l'intervention de Jean-Gabriel Ganascia est disponible en ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=KNr6CXd8DWk>

Des transformations majeures d'ordre épistémologique se font jour. Rappelons que la science, durant l'Antiquité, se fondait sur les observations. C'est à partir de Galilée que nous avons éprouvé les théories dans la nature : le chercheur s'est alors mis à construire un dispositif pour confronter les observations acquises avec ce qu'anticipait la théorie.

Il semble que nous disposons désormais une nouvelle épistémologie, née des capteurs capables de stocker des données de façon systématique, et cela sans avoir forcément de théorie préalable en tête. Ce n'est qu'ensuite que vont être élaborées des hypothèses, que l'on va pouvoir tester en retour sur des bases de données ; c'est ce que l'on appelle les expériences *in silico*. Ces traitements de très grandes masses de données sont réalisés avec des intelligences artificielles qui détectent des relations de corrélation, lesquelles ne doivent toutefois pas être confondues avec des relations de causalité. Cette question est extrêmement problématique, sachant que les conclusions tirées de corrélations peuvent s'avérer trompeuses. Il est donc temps de mener une réflexion sur les transformations épistémologiques liées au numérique.

De façon plus générale, nous sommes, à la différence de l'ancien monde, dans un monde nouveau où les concepts classiques se réécrivent en numérique. C'est vrai du point de vue épistémologique, mais c'est vrai aussi du point de vue sociologique, comme le montrent les questions que posent l'amitié, la réputation ou la confiance, sur Internet.

Des réflexions disparates existent sur ces sujets, car l'on doit faire face à des transformations très rapides. On trouve cependant des ouvrages idéologiques, notamment sur les masses de données, affirmant que nous pourrions fort bien nous passer désormais de la causalité au profit des corrélations. La question de la « vérité » demeure dès lors posée dans ce contexte-là, car en fait *la valeur de la preuve* n'a, à ce jour, aucunement perdu de sa consistance.

### **Big data et science de court terme**

C'est l'ensemble de ces nouvelles techniques qui sert en première intention à la recherche scientifique, que beaucoup, y compris nos gouvernants, font passer au second plan. Jean-Gabriel Ganascia se pose en constant défenseur des sciences fondamentales, l'acquisition des connaissances étant un bien premier, à vrai dire effectivement « fondamental ». Si les scientifiques acceptaient, sur un plan général, de défendre ces domaines, ils pourraient montrer que les *big data* sont un bon moyen d'aborder de véritables questions scientifiques, permettant en outre de tenter d'apporter des réponses ou d'imaginer de nouvelles hypothèses ou théories. Or, les outils dont nous avons parlé échappent en partie à la recherche fondamentale, parce que l'on désire les appliquer, dès à présent, *dans une perspective de rentabilité à court terme*. On perçoit là un danger central, et que dire de celui qui concerne le monde de la santé, puisque, en effet, certains professionnels du domaine ne sont même plus capables de porter un diagnostic !

Quoi qu'il en soit, cette question de responsabilité et de rapports entre les applications à vocation basement mercantile et d'autres plus nobles concernant la recherche fondamentale, est essentielle. Il faudrait que certains acteurs français, voire européens, tentent de développer une réelle intelligence humaine qui nous éviterait de penser que le drame de l'intelligence artificielle « est d'être mise au profit de la connerie naturelle ».

Les scientifiques, encore une fois, doivent absolument être en mesure de prendre leurs responsabilités et faire savoir au grand public quels sont les enjeux majeurs qui le guettent aujourd'hui, face à la circulation d'informations fallacieuses, laquelle ne cesse de croître.

Jean-Gabriel Ganascia pense qu'il faut mettre en place un système de caractéristiques épistémologiques sur la fonction des données, ce qui permettrait de les catégoriser et de voir les problèmes que leur partage soulèverait. Se pose également une question politique : en effet, il est nécessaire de parvenir, au plan européen, à constituer de grandes bases de données destinées à être exploitées dans l'intérêt général, sachant que des acteurs internationaux, très puissants, mènent des lobbyings systématiques dans tous les débats, pour des intérêts particuliers.

### *b) Aspects actuels de la communication politique*



- Selon Philippe J. Maarek<sup>65</sup>, la télévision reste le média central de la communication politique car elle pénètre dans presque tous les foyers, ne demande aucun apprentissage et aucune autre démarche, mis à part l'achat du poste de télévision lui-même.
- Les possibilités d'Internet sont cependant, à côté, illimitées, et puisqu'il réalise un moyen de communication à « multiples natures », il favoriserait d'une certaine manière « la commercialisation des services payants, inventant ainsi des méthodes qui sont utiles à la communication politique mercatisée ».
- Philippe J. Maarek classe les principales utilisations d'Internet pour la communication politique en trois groupes : 1/ les utilisations politiques « institutionnelles ». A l'ère du Web 2.0, ces sites Internet sont souvent accompagnés de blogues ou de forums servant à l'expression des opinions des internautes. 2/ Les utilisations lors des campagnes électorales. Il s'agit d'organiser la viralité de l'information en cascade, et de constituer les relais les plus efficaces pour gagner des consciences, de l'engagement et, lors des élections, des voix. 3/ Les utilisations par les groupes de pression et les partis « marginaux ». C'est au milieu des années 2000 que les blogues vont commencer à émerger, particulièrement lors du référendum sur la Constitution européenne, en 2005 où Internet commencera à être réellement influent, surtout grâce au « Web citoyen ».

L'information est un élément central de la démocratie. En termes de décision, la « démocratie électronique » semble avoir un plus grand impact au niveau local. L'enjeu final devient supérieur aux postures et aux oppositions de principe. Trop souvent les listes de contacts sur les réseaux sociaux se limitent aux seuls cercles militants déjà convaincus d'avance. Cependant, tout le monde ne peut pas encore en profiter comme il le souhaiterait. Pippa Norris parle de l'aspect antidémocratique du fossé numérique relatif à « l'écart qui sépare les internautes dans leur utilisation des ressources politiques ».

Finalement, à côté de la télévision qui a pour but de « s'imposer » dans les foyers de la part des émetteurs, par une sorte d'entrisme permis par une situation de passivité des téléspectateurs, se positionnent les techniques de communication type réseaux sociaux et blogues, qui se veulent actives et persuasives mais qui nécessitent de la part des récepteurs un minimum de connaissances dans l'utilisation d'Internet, et de curiosité pour les idées des autres.

---

<sup>65</sup> Lire notamment l'analyse d'Alexandre Eyriès, *Une généalogie de la communication politique numérique*, in *Revue française des sciences de l'information et de la communication* (12, 2018, mis en ligne le 1<sup>er</sup> janvier 2018, consulté le 15 mai 2020). <https://journals.openedition.org/rfsic/3424>

Alexandre Eyriès, dont le travail a guidé l'écriture du présent texte, est enseignant-chercheur en sciences de l'information et de la communication à l'Université de Bourgogne Franche-Comté (laboratoire CIMEOS). Il est l'auteur de nombreux ouvrages et articles dans des revues scientifiques nationales et internationales (*Communication et organisation*, *Quaderni*, *Lexia*, *Pouvoirs*, etc.) et développe des travaux sur la communication politique, les usages sociaux du numérique, la laïcité et le journalisme narratif.

## 6. Le numérique et les « activités sociales et culturelles »

Le texte qui suit fait notamment référence au Rapport intitulé « Numérique, démocratie et lien social »<sup>66</sup>.

- Le développement du numérique peut être considéré comme « un fait social total » (en référence à Marcel Mauss) qui a modifié l'ensemble des pratiques sur la planète, des interactions les plus simples aux organisations les plus complexes. Ce phénomène s'observe notamment au sein des entreprises, quelle qu'en soit la nature.
- Les chercheurs observent ces bouleversements contemporains en leur donnant différents noms : « société du risque », « société liquide », « société en accélération ». Parfois inquiétants, ils mettent en avant la situation d'incertitude et de fragilité des sociétés, laissant le débat ouvert sur le rôle du numérique dans ces bouleversements.
- Il n'existe pas de définition légale des Activités Sociales et Culturelles (ASC). Une activité sociale et culturelle doit avoir pour finalité, quel que soit l'opérateur, d'améliorer les conditions de vie, de travail et d'emploi des salariés. En tenant compte de cette assertion, les activités sociales et culturelles seraient très en retard dans le cadre général du développement du numérique, en France notamment.
- Le schéma prospectif qui se dégage de l'examen des mutations organisationnelles prévues pour les entreprises et les institutions sous l'influence du numérique permet de constater qu'un modèle vertueux se distingue clairement : celui de « l'organisation apprenante ».
- Or, aujourd'hui, l'attachement aux valeurs humaines semble représenter l'une des meilleures garanties face aux organismes digitalisés, en préservant notamment « l'intelligence collective » face à « l'intelligence artificielle ». Le retard pris sur les NTIC (ou Nouvelles technologies d'information et de communication) en France, et les dysfonctionnements structurels, rendent urgente la mise en place de réformes, de dispositifs et d'expérimentations dans le domaine numérique.
- Pour réussir leur « virage numérique », les divers acteurs des ASC, quels que soient leurs objectifs, peuvent compter sur de nombreuses ressources, mais dans le même temps ils doivent s'assurer de l'élaboration d'une véritable stratégie politique numérique et de sa mise en place effective. La plupart des recommandations resteront donc lettre morte sans un portage politique fort.
- Si la gouvernance d'un pays s'oriente vers une technique numérique, au plan social et culturel, au bénéfice du plus grand nombre, cela nécessite l'allocation de moyens adaptés et des efforts de formation initiale et continue. Le virage numérique doit être inclusif et collaboratif, selon un modèle « bottom up », c'est-à-dire concerté d'abord entre tous les acteurs des ASC, puis institué à l'échelle locale et nationale.

---

<sup>66</sup> IFOREP, ASTS, 2018, Aurélien Cohen et Chloé Rabanes. [http://www.iforep.fr/wp-content/uploads/2018/11/rapport\\_numerique\\_vdef.pdf](http://www.iforep.fr/wp-content/uploads/2018/11/rapport_numerique_vdef.pdf)

## 7. Numérique et dématérialisation

### Contexte

Parmi les conséquences du développement des techniques numériques figure la « dématérialisation », autrement dit la *suppression du*, certains préféreraient probablement les termes de *soustraction au*, support matériel, notamment sur papier mais aussi sur films et microfilms, des données à transmettre ou à partager.

Dans les chapitres précédents, nous avons pu noter que cette dématérialisation s'accompagnait dans les faits d'une importante consommation de ressources et d'énergie ; il faut maintenant s'attarder sur ses effets au plan individuel, notamment en termes de créativité.

Seront exclues de cet exposé les difficultés liées à ce que l'on nomme couramment *la fracture numérique*, notamment chez les personnes âgées non ou peu formées à ces nouvelles techniques, une thématique qui sera abordée plus loin.

Notons de prime abord que l'exposé des avantages paraît beaucoup plus limpide, en tout cas plus succinct, que l'exposé des inconvénients. Cela ne doit pas surprendre, ou faire conclure de manière quelque peu hâtive que, contrairement à ce qui caractérise les avantages, nous aurions peine à décrire les inconvénients. En fait cela provient du fait qu'abordant les avantages, on privilégie par construction la « dématérialisation native », celle qui techniquement découle de la réception de données brutes, dès leur génération, et les convertit immédiatement en langage numérique, alors qu'abordant les inconvénients, nous envisageons conjointement la « dématérialisation duplicative », celle qui, à partir de données déjà matérialisées, les convertit dans un second temps en données numériques. Or rien ne permet de démontrer actuellement, si tant est que cela soit possible, que l'on puisse sans conséquence se passer de la phase de matérialisation, en considérant *a priori* que *toute donnée est par essence immatérielle*, et peut donc être consignée d'emblée sous forme numérique.

### Avantages

Les avantages de la dématérialisation comportent :

- La rapidité de transmission des données par voie électronique, quelle que soit la distance.
- Une traçabilité informatique des documents et un archivage numérique à valeur légale.
- La consultation rapide, qui serait de plus susceptible de comporter une vertu exhaustive, de documents nécessaires à l'étude d'un sujet donné.
- D'importantes économies de support matériel, par nature, fort appréciables au plan écologique notamment, ce support englobant une part de la consommation énergétique globale.
- Une facilitation, dans une certaine mesure, des échanges, à visée opérationnelle.
- La possibilité de transport, notamment individuel, mais également de transfert, d'un nombre considérable de données, constituant l'évolutif « *big data* ».

### Inconvénients

Si l'on reprend la liste des avantages, envisageons, pour chacun d'entre eux, les inconvénients de la dématérialisation.

- Outre l'impossibilité bien entendu de transmission vers les « zones blanches », se dessinent les difficultés d'exploitation des données transmises. En effet, très rapidement, dès l'installation des techniques de transmission numérique, s'est développée une nouvelle attribution de compétence aux destinataires des messages, assimilée à la rapidité de leur(s) réponse(s) ; cette qualité de réactivité qui peut parfois être fonctionnellement attendue, peut aussi ne pas être toujours adaptée : qu'attend-on *in fine* ? : « J'ai bien reçu, et voici immédiatement ma réponse », ou « J'ai bien reçu, et j'examine,

je réfléchis ». Dans le premier cas, la réponse risque d'être trop précipitée, par exigence de performance en termes d'immédiateté ; dans le second cas, quel délai sera accordé par les protagonistes, entre eux, pour espérer raisonnablement une réponse pertinente, et « collant » au contexte en termes de temporalité ?

- Corrélativement, en matière de créativité, a-t-on bien mesuré la puissance de l'écriture ? On observe que beaucoup d'écrivains, de chercheurs, jettent dans un premier temps sur le papier, ou le tableau, les fruits de leur inspiration, les idées qui jaillissent, avant de les consigner par ordinateur. La « dimension papier », pour ainsi dire, de la démarche et de la mémoire réflexives, « matérialisée » par l'écriture, est devenue progressivement évanescence. Il serait bon de refaire par la pensée le chemin depuis les premières expressions écrites par l'Homme, jusqu'aux lettres inscrites temporairement sur l'écran par l'intermédiaire du clavier de l'ordinateur, ensemble qui a même perdu la matérialité des anciennes machines à écrire. « L'impression » qui peut être obtenue dans un second temps grâce à l'imprimante n'a qu'une valeur d'édition ; elle ne peut être comparée au circuit organique d'inscription immédiate par la main, sur le papier, de l'instantané de la pensée, sans passer par l'écran. Il n'est pas question pour autant de « revenir en arrière », mais bien de réfléchir aux effets de cette transition, en matière de qualité de ce qui est « écrit » et des répercussions sur le niveau de créativité. Passer par la phase d'écriture papier n'est certainement pas une condition *sine qua non* d'une créativité accomplie, l'astrophysicien Stephen Hawking en ayant été une magnifique illustration, mais il aurait été intéressant précisément de lui demander la valeur qu'il attribuait à l'écriture et dont le privait son handicap majeur.
- Malgré toutes les prouesses logicielles de sécurisation, une énergie et des moyens financiers considérables sont mis en œuvre en permanence pour éviter : 1/ les piratages et les atteintes à la confidentialité consécutives à la pratique des techniques numériques, ainsi « dématérialisées », 2/ les pertes de données numériques possiblement, sinon potentiellement, plus vulnérables en termes de sauvegarde que les données matérialisées<sup>67</sup> : ne peut-on estimer qu'en fait les livres ou les films, voire les vinyles, sont de plus solides garants de la protection du savoir que les banques de données informatiques, grâce en particulier à leurs capacités de transmission analogique ?
- L'ignorance de données d'intérêt émergent de manière incidente, corrélative, lors d'une recherche documentaire sur un sujet précis, à l'instar de la sérendipité lors de la menée d'une recherche clinique ou de laboratoire, ne peut être exclue. La consommation énergétique liée à l'utilisation elle-même des techniques numériques, et en amont les ressources nécessaires pour continuer de développer ces techniques, avec leurs conséquences environnementales et humaines, est trop souvent omise dans les exposés vantant leurs qualités.
- Une difficulté, croissante, de « personnalisation » des échanges, et partant d'accompagnement personnalisé dans la réflexion, se fait jour. Cet inconvénient est particulièrement ressenti actuellement dans l'application du système numérique aux prestations de service public, notamment à l'échelle des collectivités locales ; il comporte une part notable de responsabilité dans la disparition progressive, dans notre pays, d'établissements postaux, fiscaux, de soins hospitaliers, voire d'enseignement, dans les petites localités. Il s'agit là d'un effet indirect de la dématérialisation, au profit d'une communication virtuelle à haute performance quantitative, mais aux dépens d'une communication tangible à haute performance qualitative, et humaine. En janvier 2019, le Défenseur des droits a pourtant alerté les pouvoirs publics sur le risque lié à une dématérialisation trop rapide et sans précaution des services publics. Où ira notre préférence, si l'on envisage par anticipation les résultats finaux, sachant que le Plan France numérique 2020 prévoit que « le papier devra être définitivement abandonné et l'intégralité des démarches administratives devront être dématérialisées » ?
- Cette menée réflexive est aussi particulièrement prégnante actuellement, avec l'avènement et l'irruption de « l'intelligence artificielle » dans la pratique médicale : il est généralement recommandé, au plan éthique et maintenant législatif, qu'il y ait toujours « un humain derrière la

---

<sup>67</sup> Et exposées à l'obsolescence non seulement des matériaux, mais aussi des normes et des technologies – cf. les disquettes et autres stockages ZIP.

machine », mais pour quoi faire ? : surveiller son bon fonctionnement mécanique ou bien évaluer sa pertinence technique en matière de diagnostic et de traitement, face à un patient donné ? Cette proposition avancée en tant que recommandation est incongrue, car elle ne pose pas correctement le problème, et ne résout donc en rien la problématique soulevée. Dans tous les cas, il faudra veiller scrupuleusement à ce que l'intelligence artificielle « au service de la médecine », ne désincarne pas en fait, à terme, l'exercice médical. Il était jusqu'à présent vivement recommandé, notamment aux étudiants qui entraient dans la carrière, de se déplacer du dossier papier vers le malade : qu'en sera-t-il lorsque celui-ci ou celle-ci ne seront plus représentés que par un résultat d'algorithme, au nom, encore une fois, d'une nouvelle forme de performance ?

- Sur le dernier point, eu égard notamment aux « progrès » constants en matière de miniaturisation, il convient de garder à l'esprit les moyens importants mis en œuvre pour tenter d'éviter les piratages et les atteintes à la confidentialité consécutifs à la pratique des techniques numériques, ainsi « dématérialisées ». Mais sur un autre plan, la disparition extrêmement rapide des liens matériels entre individus érode la nature-même des relations qui les unissaient de manière originelle. L'espèce humaine va-t-elle vraiment s'adapter, comme l'affirment les promoteurs de ces techniques, positionnés de manière permanente en conflit d'intérêt majeur, et quelles seront alors les modalités d'adaptation, et non, souhaitons-le, de disparition progressive des liens vitaux unissant en un ensemble complexe les diverses composantes constitutives de notre espèce ?

## Résumé

- Rien ne permet de démontrer actuellement, si tant est que cela soit possible, que l'on puisse sans conséquence se passer de la phase de matérialisation des données, en considérant *a priori* que toute donnée est par essence immatérielle, et peut donc être consignée d'emblée sous forme numérique.
- Les avantages du numérique sont dominés par la rapidité de transmission des données par voie électronique, quelle que soit la distance, et par la possibilité de transport, notamment individuel, mais également de transfert, d'un nombre considérable de données, constituant l'évolutif « *big data* ».
- Concernant les inconvénients,
  - La réponse risque d'être trop précipitée, par exigence de performance en termes d'immédiateté.
  - Corrélativement, en matière de créativité, a-t-on bien mesuré la puissance de l'écriture ?
  - Malgré toutes les prouesses logicielles de sécurisation, une énergie et des moyens financiers considérables sont mis en œuvre en permanence pour éviter les cyber-attaques.
  - La consommation énergétique liée à l'utilisation des techniques numériques, et en amont les ressources nécessaires pour continuer de développer ces techniques, avec leurs conséquences environnementales et humaines, est d'ailleurs très souvent omise.

## 8. Accessibilité du numérique et handicap: l'exemple de l'accessibilité des sites Web

L'objectif de ce chapitre n'est pas d'aborder de façon exhaustive la question complexe et en constante évolution des articulations (nombreuses) entre numérique et handicap. Il se concentre sur la question de l'accessibilité d'Internet.

Pour cela, il s'appuie d'abord sur un rapport de Véronique Lespinet-Najib, Nathalie Pinède, Christian Belio, François Demontoux et Vincent Liquète, intitulé *L'accessibilité Web, en 2013, en France : Enquête nationale sur les pratiques et les usages des professionnels du Web*<sup>68</sup>.

- En France, la loi du 11 février 2005 sur « l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées » a profondément changé le domaine de la santé et des soins. Cette loi a du reste provoqué un changement sémantique majeur : l'adoption de la notion de « personnes en situation de handicap » [Boriolo & Laub, 2007 ; Van Lancker, 2008]. Cette nouvelle dénomination permet de dépasser la vision purement biologique et médicale du handicap.
- En fait, l'accessibilité vise également et surtout à optimiser la distribution de l'information, à permettre l'efficacité et l'autonomie en matière de navigation, et ceci quel que soit le navigateur, le support considéré ou les capacités de l'utilisateur.
- Malgré l'existence de standards (WCAG, RGAA), très peu de sites Internet s'avèrent accessibles, ne permettant pas alors à une personne en situation de handicap d'accéder pleinement au contenu en ligne, et plus largement à la multiplicité du potentiel informationnel et « communicationnel » des sites.
- Les résultats d'études permettent de mieux cerner l'existence de véritables freins quant à l'appropriation par les professionnels des normes d'accessibilité du Web : idées fausses, méconnaissances du domaine, manque de formation notamment.
- Les personnes interrogées signalent que l'accessibilité du Web est perçue selon elles essentiellement comme une contrainte législative se limitant au domaine du handicap.
- En pratique, le travail cité de Valérie Lespinet-Najib *et al.* a été de créer et de tester un didacticiel destiné aux développeurs en priorité. Cet outil nommé *ATAcc Web* (ou Approche transversale de l'accessibilité Web) utilise des scénarios de navigation à l'intérieur d'un site. L'utilisateur est ainsi confronté aux difficultés habituelles de l'accessibilité (sensibilisation). En parallèle, le didacticiel propose des solutions techniques améliorant l'accessibilité numérique (faisabilité).

Le second rapport pris en référence est celui, plus récent, de février 2020, publié par le Conseil national du numérique (CNNum), intitulé *L'accessibilité numérique, entre nécessité et opportunité*, qui formule des recommandations reprises par le CPP<sup>69</sup>.

- Saisi par Sophie Cluzel, secrétaire d'État chargée des personnes handicapées, et Cédric O, secrétaire d'État chargé du Numérique, le Conseil national du numérique a conduit une étude sur des scénarios d'amélioration de l'accessibilité numérique entre février 2019 et janvier 2020. Dans la perspective de la Conférence nationale du handicap (CNH) du 11 février 2020, le Conseil a publié un rapport sur l'accessibilité numérique, qui a été remis aux ministres concernés le 5 février 2020.
- Selon Sophie Cluzel : « l'accessibilité des services numériques est devenu un enjeu incontournable de la vie des personnes en situation de handicap. Il est donc primordial de comprendre les freins à

---

<sup>68</sup> In *Terminal*, 116, 2015, mis en ligne le 25 décembre 2014, consulté le 31 août 2021.  
<http://journals.openedition.org/terminal/649>

<sup>69</sup> [https://cnnumerique.fr/publication\\_rapport\\_accessibilite\\_numerique](https://cnnumerique.fr/publication_rapport_accessibilite_numerique)

son déploiement et de trouver des solutions concrètes en collaboration avec les parties prenantes. Le rapport du Conseil national du numérique apporte des recommandations concrètes en ce sens. »

- Selon Cédric O : « le numérique doit être une chance pour tous en offrant notamment de nouvelles opportunités aux personnes en situation de handicap. Par l'innovation, notamment en matière d'intelligence artificielle, par le soutien à nos *start-ups*, nous avons la possibilité d'œuvrer pour permettre à nos concitoyens d'avoir accès à tous les services. C'est un enjeu d'égalité auquel je suis profondément attaché et un défi dans lequel le Gouvernement est pleinement investi. »
- Ce rapport traite de l'accessibilité numérique dans trois secteurs-clés, particulièrement concernés par la transformation numérique : **l'accès à la citoyenneté, à la culture et au savoir**. À ce sujet, d'après Salwa Toko, présidente du Conseil national numérique, « les questions d'inclusion numérique sont au cœur des réflexions du Conseil ; le numérique ne doit être une ligne de fracture supplémentaire pour personne. Pour les personnes en situation de handicap, le numérique est une formidable opportunité d'accès aux services publics, aux savoirs, et à la culture. Toutefois, cette opportunité restera vaine tant que nous ne ferons pas un effort collectif pour rendre le numérique accessible. »
- Pour Jérémie Boroy, président du groupe de travail concerné et membre du Conseil national du numérique, ainsi que président du Conseil national consultatif des personnes handicapées (CNCPH), il est à noter que, « avec ce rapport, nous souhaitons mobiliser les acteurs économiques, la puissance publique et les utilisateurs vers des objectifs communs et concrets. Mais nous espérons surtout que ce sujet ne fasse plus l'objet de telles discussions à l'avenir, qu'un numérique accessible devienne la norme et non plus l'exception. »
- Les 50 recommandations issues de ce rapport avaient pour vocation de nourrir la réflexion de l'État français sur le sujet de l'accessibilité numérique, en vue de la Conférence Nationale du Handicap (CNH) tenue le 11 février 2020.

## B. Numérique et âges de la vie

### 1. Numérique et enfance

La question des impacts des objets et des pratiques liés au numérique se pose de façon particulièrement cruciale pour les enfants, notamment en bas-âge ; ce chapitre en évoque les principaux enjeux.

#### **Usage croissant et précoces des technologies numériques par les enfants**

Les résultats de l'étude ELFE (Étude longitudinale française depuis l'enfance, pilotée par l'Ined et l'Inserm en partenariat avec l'EFS), conduite depuis 2011, ont montré qu'à l'âge de 2 ans, 7 enfants sur 10 regardent la télévision quotidiennement et, qu'en moyenne, ils y consacrent près de 6 heures 50 minutes par semaine. De manière générale, les enfants passent plus de temps devant les écrans le week-end que les jours de la semaine. Notons qu'en 2006, le Conseil supérieur de l'audiovisuel avait pourtant lancé le slogan « Pas de télé avant 3 ans », suggérant une diffusion de ce message, finalement mal compris et peu efficace.

À partir d'environ 900 foyers français représentatifs en 2015, l'enquête *Ipsos-Kids & Screen* observe qu'une famille française possède 9,8 écrans en moyenne, et que 73 % des enfants ont aujourd'hui au moins un écran personnel (60 % des enfants de 11 à 14 ans étant même « équipés » d'un *smartphone*).

Selon la dernière enquête annuelle de l'association Génération numérique, ce sont 63 % des adolescents de moins de 13 ans qui ont un compte sur au moins un réseau social, et plus de 9 adolescents sur dix de 15-18 ans qui sont inscrits sur un ou plusieurs réseaux sociaux.

#### **Les risques connus et démontrés de grandir dans un monde numérique**

Par le passé, la recherche sur les médias traditionnels, tels que la télévision, a identifié les problèmes de santé et les résultats négatifs qui sont en corrélation avec la durée et le contenu de l'affichage. Aujourd'hui, les enfants et les adolescents sont immergés dans des formes traditionnelles, mais également nouvelles et évolutives des technologies numériques.

Un nombre croissant de recherches, récemment compilées dans des rapports de l'American Academy of Pediatrics (2013 et 2016) ont permis de documenter des risques réels sur la santé de l'enfant et de l'adolescent. On constate notamment une incidence plus élevée de l'obésité, une diminution de la quantité et de la qualité de sommeil, des retards de langage, certaines capacités cognitives diminuées et des troubles comportementaux plus fréquents (notamment violence et anxiété), en particulier en lien avec des contenus de communication inexacts, inappropriés ou dangereux, et des dérives autour de la vie privée et de la confidentialité.

Les technologies numériques actuelles sont mobiles, individuelles et interactives. Les stratégies marketing de la plupart des entreprises qui fournissent ces technologies sont très envahissantes et spécifiquement ciblées sur les enfants et les adolescents, avec des modèles fondés sur la création d'une dépendance chez l'utilisateur. Si beaucoup de gens travaillent à faire progresser et à fabriquer ces technologies, peu de gens réfléchissent à la façon dont elles nous transforment. C'est pourtant là un champ d'investigations très étendu dans le cadre de l'application du principe de précaution.

#### **La vie réelle avant tout pour les périodes rapides de développement de l'enfant**

Le cerveau se transforme sans cesse sous l'effet de nos activités physiques et intellectuelles. Ces transformations sont extrêmement nombreuses dès la période prénatale et chez les jeunes enfants. Ces changements sont physiologiques et se traduisent par des bouleversements anatomiques. Après la troisième ou la quatrième année de vie, les transformations se poursuivent mais elles sont plus lentes et nécessitent des apprentissages plus prolongés. Un tout petit (de 0 à 3 ans) apprend, en particulier, par l'observation, par l'imitation de son entourage et à partir d'expériences multi-sensorielles. Il s'agit pour ce jeune enfant de développer en priorité ses capacités motrices, de communication et socialisation, de mémoire puis d'autocontrôle. Le développement de ses capacités de communication a lieu en présence physique et



multimodale, faisant appel à *tous* ses sens, notamment à la perception visuelle de l'autre dans ses efforts pour communiquer.

### **Comprendre et anticiper les modifications neuropsychologiques liées au numérique**

Ce que l'on constate aujourd'hui est que les écrans et les technologies numériques consomment un temps précieux et nécessaire à l'enfant pour développer bien d'autres capacités et apprentissages, car elles ne sont que trop peu utilisées dans une démarche éducative.

La compréhension de ce que changent les usages des technologies numériques dans le développement cérébral, anatomique et neuropsychologique des enfants est essentielle, mais toutefois difficile à appréhender. Cette difficulté est liée à l'évolution extrêmement rapide de ces technologies et à la question de savoir comment la relation au monde en général et aux autres en particulier est modifiée sous leur influence.

Nous sommes, actuellement, dans une logique d'interface visuelle avec les technologies numériques. Elles nous ont fait basculer d'une logique relationnelle fondée sur le geste moteur à une logique relationnelle fondée sur le repère d'images. La motricité de l'enfant était pendant très longtemps constamment engagée pour effectuer un certain nombre de jeux ou d'actes, comme bouger divers leviers, visser, colorier, construire des maquettes, etc., qui peuvent être désormais accomplis par le seul geste consistant à cliquer ou passer son doigt sur une icône.

Outre les domaines sensori-moteurs de l'enfant, ceux qui paraissent aujourd'hui pouvoir être les plus impactés, et dès lors modifier la relation au monde et aux autres, sont les divers apprentissages mais aussi la relation à soi-même dans la construction de la sociabilité.

*Le bouleversement dans le domaine des apprentissages* est à signaler au premier rang. Parce que l'accès aux informations et au savoir est facile et immédiat, les capacités de mémoire par exemple sont de moins en moins sollicitées dans la vie quotidienne. Les capacités attentionnelles et de concentration sont elles aussi bouleversées, comme en attestent certains enseignants. L'attention approfondie nécessaire pour développer une réflexion, un questionnement et un raisonnement est aujourd'hui moins mobilisée dans/par ces usages de technologies numériques que la capacité attentionnelle liée à l'alerte, utile pour faire face à des imprévus (appelée aussi « rapidité attentionnelle »). Les technologies numériques ont favorisé des modes de communication et d'information brefs et rapides, de l'ordre de quelques minutes ou secondes pour des vidéos ou messages vocaux ou de quelques mots. Ces usages sollicitent cette rapidité attentionnelle ainsi qu'un système cérébral plus automatique et intuitif, souvent lié à l'émotion. Les aptitudes cérébrales peuvent ainsi être améliorées en termes de vitesse et d'automatismes. Le risque est que cela se réalise *au détriment du raisonnement et du développement des capacités d'« inhibition cognitive »* qui sont nécessaires pour résister à des réponses impulsives et à des automatismes de pensée, selon Olivier Houdé, professeur de psychologie du développement à l'Université Paris-Descartes.

*Dans la relation à soi-même*, nous trouvons des exemples parfaitement illustratifs sur les réseaux sociaux montrant que certaines personnes adoptent des comportements imprévisibles. Cette « identité hétérogène » peut se construire aussi avec les jeux vidéo. Les enfants découvrent dans ces objets numériques la possibilité d'incarner différents personnages. Ils sont amenés à choisir l'identité dont ils ont besoin pour répondre à une difficulté propre, à un moment donné. Ces modes de jeux et/ou de communication privilégient davantage l'« alternance identitaire » et l'idée de forger son identité *par rapport et pour les autres*. Cet état peut provoquer des situations de souffrance psychique, en lien avec l'estime de soi et la confiance en soi.

Cette capacité d'alternance identitaire, encouragée par les jeux vidéo ou les réseaux sociaux, est intériorisée éventuellement comme un mode d'emploi pour la vie quotidienne. Elle favorise une relation au monde différente, dans laquelle l'imprévisible n'est plus perçu comme un danger, mais comme une opportunité et l'éphémère comme une norme. En psychiatrie, existe un modèle de la personnalité dite « unifiée » qui est fragilisé. En effet, les gens qui sont considérés comme disposant de possibilités d'évolution dans la société actuelle pourraient être ceux qui possèdent une personnalité plutôt « flottante », voire labile, mais qui sont en revanche capables de sauter sur une opportunité.

La sociabilité s'organise de nos jours plus au sein de « centres d'intérêt partagés », et moins par la proximité physique. La sociabilité s'organisait par le passé dans la famille, au travail ou par le partage d'un lieu (physique) commun. Désormais, cette organisation de la sociabilité par centres d'intérêt partagés a lieu, bien souvent, en ligne. Une bonne illustration de ce phénomène est constatée lorsque les membres d'un groupe d'amis, alors qu'ils sont réunis physiquement, au restaurant ou à la sortie d'un collège ou d'un lycée, ont leur attention accaparée par leurs *smartphones*, avec/par lequel ils partagent un autre centre d'intérêt, avec d'autres amis voire entre eux-mêmes.

### **Lutter contre l'idée reçue que « les digital natives n'ont besoin de personne ! »**

Le rôle des parents dans le comportement des enfants et des adolescents est crucial pour leurs pratiques numériques. Ce rôle de médiation des parents est déterminant dès l'enfance dans la construction et la régulation des pratiques et de la culture médiatique. Cette influence perdurerait au-delà de la pré-adolescence selon des enquêtes récentes françaises chez les adolescents, probablement parce qu'elle permet d'intégrer une capacité d'autorégulation.

Anne Cordier, maîtresse de conférences en Sciences de l'information et de la communication, à l'Université de Rouen Normandie, écrit à l'attention des parents dans le *Guide pratique – La famille Tout-Écran* : « Vous pensez que les jeunes ultra-connectés d'aujourd'hui n'ont pas besoin de vous pour surfer sur le web, s'informer et communiquer ? Vous pensez que ces jeunes, d'ailleurs, considèrent que vous êtes bien trop vieux ou bien trop dépassés par le sujet pour les aider ? Eh bien détrompez-vous ! Bien sûr, ils sont massivement – mais pas de façon égale – équipés. Bien sûr, ils font preuve – mais pas tous – d'une dextérité déconcertante, dès le plus jeune âge, avec les ordinateurs, tablettes et autres *smartphones*. Bien sûr, ils connaissent une multitude d'applications, de sites web ou encore parlent de *YouTubeurs* célèbres comme s'ils les fréquentaient « IRL » ! Et pourtant, lorsqu'on les observe et qu'on échange avec eux, quel que soit leur âge, ils sont plus nombreux qu'on ne le pense à avouer des lacunes en matière d'expertise, que ce soit pour chercher une information ou pour comprendre un discours médiatique. Ils sont également nombreux à montrer des difficultés pour nommer correctement les activités et les outils numériques, comme Alexandre qui, à 11 ans, croit que « en ligne » signifie « gratuit ». Enfin, ils sont nombreux à s'inquiéter d'une forme de démission pédagogique de la part des adultes en général à leur égard. Comme le dit Armelle, 17 ans : « C'est pas parce que j'ai un iPhone, que je suis « calée ». » Alors, non, ils ne sont pas des « mutants », ni des *digital natives* ! Ils sont des individus en construction, qui ont des pratiques à la fois extrêmement riches en matière d'information et de communication, mais ont aussi des connaissances partielles. »

Un point de vigilance important tient au fait que ce rôle des parents est toutefois marqué par des différences sociales. Cet accompagnement est présent à des degrés hétérogènes et se réalise différemment selon les goûts et les perceptions des parents vis-à-vis de ces technologies numériques, selon la familiarité des parents avec ces espaces numériques et la connaissance des risques et bénéfices des usages de ces technologies numériques par les parents, renvoyant plus ou moins les enfants et adolescents à leur seule responsabilité.

### **Il y a une urgence à éduquer parents et enfants**

Toute la difficulté consiste à faire comprendre qu'il faut pour les jeunes enfants intégrer les écrans et autres technologies numériques *dans une démarche éducative globale*.

C'est ce qui est tenté au sein de l'Association 3-6-9-12, mise en place par le psychiatre Serge Tisseron, en prônant trois grands principes dans l'usage des écrans que sont : 1) l'accompagnement des enfants dans la découverte des écrans, 2) l'apprentissage de l'autorégulation, qui passe par la ritualisation des temps d'écran, et, enfin 3) l'alternance entre les activités. Moins connues, un certain nombre d'autres bonnes recommandations, plus ou moins pratiques pour le quotidien à destination des parents, ont été formulées (cf. l'article de Jimmy Braun, 2011, sur le site Internet du CLEMI, etc.).

Au-delà de ces recommandations nécessaires, d'autres messages doivent être diffusés, pour une éducation plus efficace et globale quant à l'usage des technologies numériques. Ainsi, sensibiliser les adultes et les enfants sur la question de l'attention est essentiel. Tout d'abord, il s'agit de comprendre le fonctionnement économique des médias et des technologies numériques, dont le modèle est fondé sur la captation de l'attention et du temps de l'utilisateur, et ainsi, chez celui-ci, la création d'une dépendance. Il s'agit également

de comprendre les mécanismes physiologiques en général, et neuropsychologiques en particulier, de notre attention, et de faire prendre conscience d'une possible « résistance cognitive » aux sollicitations numériques si nous la travaillons, comme l'explique Olivier Houdé, déjà cité.

La journaliste Louise Tourret (*Écrans, l'urgence d'éduquer*) indique que ces messages doivent être présents dans les familles mais aussi à l'école, puisqu'il s'agit d'instruire et d'apprendre à travailler son esprit critique face aux usages des technologies qui font dorénavant partie intégrante de notre mode de vie. C'est ce que propose et rend opérationnel le dispositif ATOLE (ATtentif à l'écOLE), dirigé par Jean-Philippe Lachaud, chercheur à l'Inserm. Elle ajoute que, dans ce contexte, « le savoir ne rend pas automatiquement raisonnable mais ne pas en parler et se contenter d'interdire serait renoncer à éduquer », et que « c'est une question sociale : il s'agit d'éduquer les enfants des parents les plus éloignés de la culture scolaire car la fracture numérique est avant tout une fracture des usages. »

### Références bibliographiques

- Berthomier N. Octobre S., *Enfant et écrans de 0 à 2 ans à travers le suivi de cohorte Elfe*, Culture études, 2019/1 (n° 1), p. 1-32.  
<https://www.cairn.info/revue-culture-etudes-2019-1-page-1.htm>
- Ipsos, *Kids & screen*, 2015. <https://www.ipsos.com/fr-fr/que-regardent-nos-enfants>
- Enquête sur les pratiques numériques des 11-18 ans, in *Génération numérique*.  
<https://asso-generationnumerique.fr/enquetes/>
- Houdé O., *Apprendre à résister*, Le Pommier, 2014.
- CLEMI (Centre pour l'éducation aux médias et à l'information), *Guide Pratique, La famille Tout-Écran*.  
<https://www.cleml.fr/fr/famille/guide-pratique-la-famille-tout-ecran-1.html>
- Association 3-6-9-12, *Pour une diététique des écrans en famille : enfants, ados, adultes*.  
<https://www.3-6-9-12.org/>
- ATOLE : programme de découverte et d'apprentissage de l'attention en milieu scolaire, pour apprendre l'ATtention à l'écOLE (« ATtentif à l'écOLE » © J.P. Lachaux, Inserm).  
<https://project.crnl.fr/atole/>
- Tourret L., *Écrans, l'urgence d'éduquer*.  
<https://www.cleml.fr/fr/guide-famille-v2/maitriser-le-temps-dedie-aux-ecrans-en-famille/ecrans-lurgence-deduquer.html>

## 2. Numérique et milieu de travail chez l'adulte

### Quels effets du numérique en termes de risques professionnels ?

Les questions relatives aux troubles musculo-squelettiques et à l'hypersédentarité parfois induits par la pratique des objets du numérique sont abordées dans la partie III de ce rapport ; on traitera ici plus spécifiquement des impacts au plan relationnel dans le cadre du travail<sup>70</sup>.

Il est indéniable que les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) ont profondément transformé les conditions de travail dans tous les secteurs d'activité.

S'ils ne créent pas nécessairement, ni systématiquement, de nouveaux risques pour la santé au travail, l'usage des TIC, quand il n'est pas régulé, peut malheureusement amplifier ou reconfigurer les risques professionnels auxquels sont exposés les salariés et agents à travers trois axes principaux identifiés par l'auteur :

- L'intensification du travail et la réduction de l'autonomie.
- L'extension de la disponibilité et de l'espace-temps professionnel.
- Le développement des incivilités numériques.

Pour pouvoir aller dans une autre direction et prendre des décisions politiques adaptées, nous devons parvenir à ouvrir les imaginaires, et favoriser le fait que les gens parviennent à penser autrement. Pour cela, il nous faut de la place, des temps disponibles et, proposer des alternatives sociotechniques à ce qui existe aujourd'hui.

## 3. Numérique et personnes âgées

Sur la base du rapport (anonyme) de la Mission Société Numérique intitulé *Initiatives autour de l'inclusion numérique des personnes âgées* (2019)<sup>71</sup>, nous pouvons dégager plusieurs points :

- L'âge reste, avec le niveau de diplôme, le principal facteur qui entre en jeu pour déterminer si une personne utilise ou non Internet et les outils numériques.
- Une personne de 75 ans ou plus sur deux n'a pas accès à Internet à son domicile selon l'Insee.
- La dématérialisation des démarches administratives et fiscales inquiète près de la moitié des personnes âgées de plus de 60 ans.
- Or, près de la moitié des personnes malades ou handicapées en situation d'isolement restent en contact avec leurs proches *via* le numérique. En revanche, l'utilisation abusive de ces techniques comporte le risque d'enfermer ces personnes dans leur domicile.
- L'Assurance Retraite s'est engagée à rendre accessible son offre numérique et à accompagner ses assurés dans l'utilisation de ses services en ligne.
- La Convention d'objectif et de gestion 2018-2022 de la Caisse Nationale d'assurance Vieillesse (CNAV) prévoit notamment que « cet accompagnement sera assuré dans les agences pour favoriser l'autonomie des personnes (espaces libre-service), par le développement des partenariats locaux et par la mise à disposition d'outils de compréhension des parcours et services en ligne ».

---

<sup>70</sup> Cf. le rapport de Stéphan Pezé, Les risques psychosociaux : 30 outils pour les détecter et les prévenir, Vuibert, coll. Lire Agir.  
<http://www.vuibert.fr/ouvrage-9782311620955-les-risques-psychosociaux.html>

<sup>71</sup>  
<https://labo.societenumerique.gouv.fr/2019/11/07/autonomie-numerique-des-personnes-agees/>

- Il s'est créé par ailleurs des dispositifs itinérants pour aller au-devant des personnes âgées dans les zones rurales.
- Des associations œuvrent également pour l'autonomie numérique des personnes âgées.
- L'informatique a créé, de fait, une coupure entre les générations, distinguant ceux qui savent et ceux qui ne savent pas, avec pour conséquence que la personne qui vieillit (au sens d'une perte de ses fonctions cognitives), devient souvent un sujet discrédité qui n'est pas en mesure de bénéficier des innovations numériques, et donc perd son autonomie sociétale.

## C. Numérique en médecine vétérinaire

Des usages variés du numérique sont associés aux secteurs de l'agriculture et de l'élevage, ouvrant sur de nombreuses possibilités de développement d'outils. Des applications sont désormais utilisées dans le secteur de l'élevage afin de permettre le suivi du troupeau mais aussi un suivi médical personnalisé associé à la participation du vétérinaire. Ces technologies issues du numérique appliquées à la santé animale ont d'abord été développées dans le monde rural avec l'élaboration de l'élevage de précision. L'élevage de précision (« *Precision Livestock Farming* » ou « *Smart Farming* »), déclinaison de l'agriculture dite de précision, est une expression qui désigne le pilotage de l'élevage, de façon précise donc, grâce à l'utilisation de capteurs et de techniques d'information et de communication. Les technologies du numérique ont ensuite été adaptées à la médecine des animaux de compagnie, par le biais de capteurs générant des données utilisées en santé.

Il est classiquement décrit deux applications du numérique en santé, la télémédecine et la télésanté. La télémédecine est définie comme une forme de pratique médicale à distance qui implique un vétérinaire, avec pour objectif la santé publique, la santé et le bien-être des animaux, ainsi que la prise en compte de l'environnement. En revanche, la télésanté recouvre l'utilisation de différents outils avec des sites Internet d'information du public, mais aussi le développement de pratiques commerciales, autrement dit l'accès à des services. La télésanté correspond aux interactions entre les propriétaires, les professionnels de santé ainsi que les réseaux d'informations médicales et les services médicaux à distance. Ainsi, la télémédecine représente l'une des composantes de la télésanté.

### La réglementation

Pour la télémédecine, si la réglementation en médecine humaine date de 2009 (décret d'octobre 2010), en médecine vétérinaire le décret est, lui, très récent, puisqu'il date du 5 mai 2020 (décret n°2020-526), valide pour une expérimentation d'une durée de 18 mois. La télémédecine vétérinaire est en revanche codifiée et pratiquée depuis plusieurs années aux États-Unis et au Canada avec un recours à cette pratique médicale qui s'est intensifiée ces derniers mois, en rapport avec l'émergence de la pandémie de Covid-19. Le décret du 5 mai 2020 définit, comme en médecine humaine, cinq actes que sont : la téléconsultation, la télésurveillance, la télé-expertise, la téléassistance médicale et la régulation médicale vétérinaires.

- La téléconsultation vétérinaire permet le déroulement d'une consultation à distance en temps réel.
- La télésurveillance vétérinaire permet d'interpréter à distance des données nécessaires au suivi médical d'un animal ou au suivi sanitaire d'une population animale.
- La télé-expertise vétérinaire permet de solliciter à distance l'avis d'un ou de plusieurs vétérinaires.
- La téléassistance vétérinaire permet à un vétérinaire d'assister à distance, au cours de la réalisation d'un acte, un autre vétérinaire mais aussi des personnes autorisées comme les maréchaux ou les techniciens en filières porcs et volailles.
- La régulation médicale vétérinaire a pour objet de fournir au demandeur, en situation présumée d'urgence, la conduite à tenir.

Devant le développement de la télésanté, la profession s'est organisée en intégrant la télémédecine à l'enseignement dans les écoles vétérinaires, mais aussi en confiant aux organisations professionnelles la rédaction des recommandations techniques et en permettant aux vétérinaires d'avoir accès aux données numériques, particulièrement celles associées au suivi des élevages.

### Médecine connectée des animaux d'élevage

L'élevage de précision et l'ouverture à la télémédecine reposent sur l'utilisation de capteurs présents dans le sol, les bâtiments, embarqués dans des machines ou placés sur des animaux, ainsi que de caméras. Ces divers outils permettent de collecter un grand nombre de paramètres utilisés pour poser un diagnostic et si nécessaire

initier un traitement personnalisé, avec pour conséquence des gains de productivité et d'économie des ressources, et donc de préservation de l'environnement.

Des capteurs fixes dans les champs et les bâtiments et mobiles sur les animaux ont été initialement développés pour les élevages intensifs de porcs et de volailles, puis ensuite pour les élevages de vaches laitières et les élevages pâturant. De plus, des capteurs sont utilisés en médecine équine pour un suivi des performances et de la santé des chevaux.

En 1998, on comptait 5 robots de traite en France, 3 800 en 2014 et environ 6 000 en 2019. Les techniques d'élevage de précision ont permis d'optimiser les performances de l'exploitation et le traitement des données des animaux, de surveiller leur comportement, leur état de santé et leur performance productive. Les éleveurs peuvent ainsi détecter très tôt des problèmes de santé ou d'alimentation et prévenir leurs conséquences avec, associé à cet élevage de précision, une médecine vétérinaire individualisée associant elle-même surveillance et détection précise de pathologies.

Les supports qui permettent d'enregistrer les données recueillies sont l'ordinateur, la tablette mais, très majoritairement, le téléphone cellulaire. Ces données sont une source pour alimenter des systèmes d'intelligence artificielle (IA), avec le développement d'algorithmes ouverts ou non, couplés ou non à la télé médecine.

Dans le cas de la médecine vétérinaire, les données traitées par l'IA ont pour objet d'aider au diagnostic, pronostic ou traitement d'un animal ou d'un groupe d'animaux (cf. figure 1).

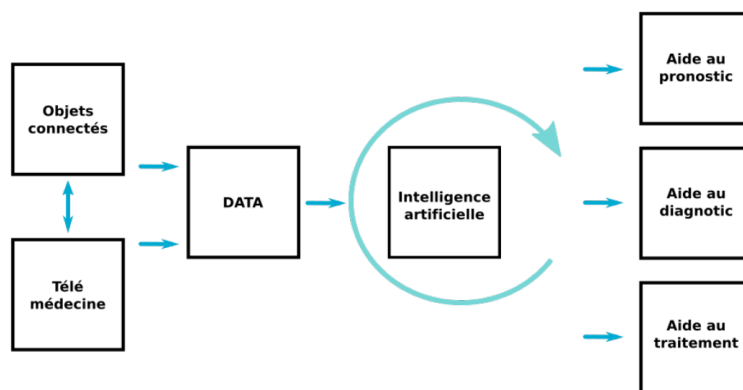


Figure 1. Schéma simplifié de l'e-santé (livre blanc n°2, [www.vet-in-tech.com](http://www.vet-in-tech.com)).

### Objets connectés en santé et bien-être animal

Ces outils ont pour objet un suivi personnalisé des animaux pour une meilleure santé mais aussi bien-être. Le bien-être d'un animal est l'état mental et physique positif lié à la satisfaction de ses besoins physiologiques et comportementaux. Cet état varie en fonction de la perception de la situation par l'animal (Anses, 2018). L'organisation mondiale de la santé animale (OIE) articule le bien-être animal autour de 5 libertés fondamentales :

- Ne pas souffrir de faim et de soif – grâce au libre accès à de l'eau fraîche et à un régime alimentaire apte à entretenir pleine santé et vigueur.
- Ne pas souffrir de contrainte physique – grâce à un environnement approprié, comportant des abris et des zones de repos confortables.
- Être indemne de douleurs, de blessures et de maladies – grâce à la prévention ou au diagnostic et au traitement rapide.
- Avoir la liberté d'exprimer des comportements normaux – grâce à un espace et à des équipements adéquats, et au contact avec des animaux de la même espèce.

- Être protégé de la peur et de la détresse – grâce à des conditions d'élevage et à un traitement évitant la souffrance mentale.

Ainsi, la notion de bien-être animal est associée à des paramètres de santé physique et psychique, lesquels peuvent être pour partie évalués par des outils connectés. De nombreux objets connectés sont désormais disponibles, mais il est toutefois à noter que seuls quelques exemples et applications sont présentés en raison d'une évolution très rapide de ces technologies et d'une adaptation pour différentes typologies d'élevage (volailles, porc, bovin, ovin...) de grande taille.

## Alimentation

Les étables connectées permettent de personnaliser l'alimentation des animaux en donnant à chacun d'entre eux ce dont il a besoin d'après les données relevées par les capteurs installés sur ces derniers. Ces données ont un impact sur la productivité, car les animaux sont nourris de façon optimisée. Les capteurs permettent de collecter des données, outre celles utilisées pour l'alimentation personnalisée, qui sont utiles pour évaluer la santé et la reproduction ainsi que le pilotage de l'élevage (cf. figure 2).

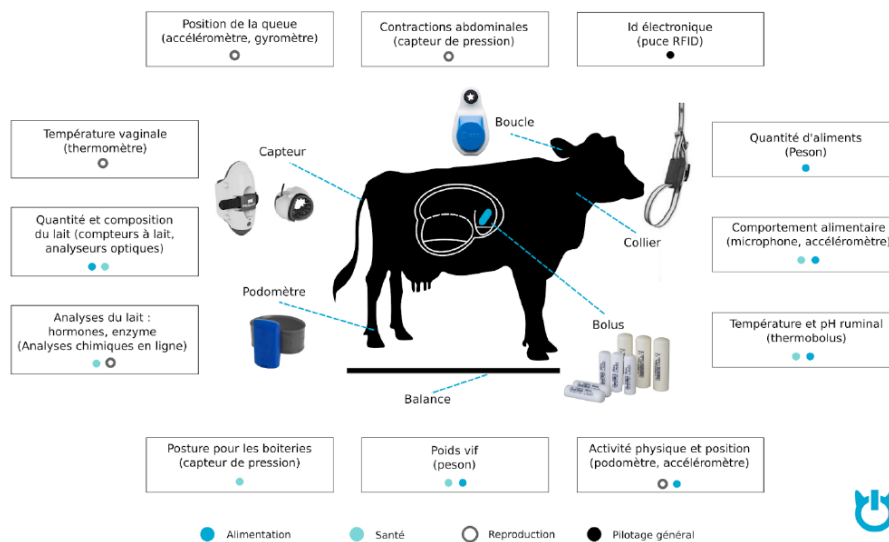


Figure 2. Capteurs utilisés en élevage des bovins (d'après Vet IN Tech, 2020).

## Santé

Il est possible de collecter en continu, chez les bovins, des mesures telles que l'activité, la localisation, la température, le pH du rumen et la durée de la phase ruminale qui est très sensible aux troubles de santé. La détection des mouvements du cou ou des oreilles est aussi utilisée pour suivre la durée de la rumination. Cette valeur temporelle de la phase de rumination renseigne sur la santé car elle est diminuée chez les bovins avec un état de santé altéré. Des appareils plus classiques (comme un ECG, microscope, stéthoscope, imagerie, échographe, analyseurs) peuvent être connectés, avec communication des données traitées ou non par l'IA sur tablette ou *smartphone*.

Les capteurs mobiles, outre ceux utilisés pour déterminer la température, mesurent les mouvements pour détecter les chaleurs et prévenir les vélages par la variation des mouvements de la queue des vaches.

Des capteurs peuvent également éviter l'administration d'antibiotiques, grâce à la surveillance de l'alimentation, de la température ou de l'activité de l'animal, ce qui représente un gain économique et environnemental. Détecter les maladies en amont permet aussi d'éviter les contaminations, et donc d'éviter de perdre une partie de sa production.



Une des spécificités de l'élevage bovin laitier est l'utilisation de robots dont les usages principaux sont la traite, l'alimentation et le nettoyage des bâtiments. Des usages secondaires ont été développés avec l'analyse du lait, le suivi individuel et le suivi dynamique. Des robots de traite peuvent déterminer le type de lait (colostrum, lait aqueux ou incolore, présence de sang), la température du lait, la conductivité, la production, le débit et le temps mort de traite mais aussi la composition du lait (lactose, taux protéique, taux butyreux, quantité de cellules). Ces données sont utilisées par l'éleveur mais aussi par le vétérinaire pour un suivi médical soit sur site, soit en télé-médecine.

## Comportement

Les animaux expriment une large gamme de comportements : exploration de l'environnement, toilettage, manipulation d'objets, contacts positifs entre congénères (flairage, jeu de tête...) qui diminuent le stress. En revanche, les situations d'agression peuvent être détectées, par exemple, chez les porcs avec les contacts tête-à-tête, les coups et les poursuites.

La détection d'un animal hyperactif peut correspondre à la phase d'œstrus alors qu'un animal hypo-actif peut être suspecté d'un problème de santé. Grâce à des accéléromètres et des podomètres, il est désormais possible de suivre les états de marche, course, repos et de stature debout ou couché. Une boucle auriculaire pour bovins permet à la fois l'identification des animaux, une détection fiable des chaleurs, la surveillance de la rumination et de la santé, ainsi que la localisation en temps réel des vaches. Les modifications de comportement peuvent être objectivées par la diminution du temps passé à manger ou à ruminer, voire un état d'hyper- réactivité face à des stimuli extérieurs.

Le suivi du comportement est plutôt réalisé à l'aide de caméras et par l'utilisation de logiciels d'analyse d'image.

### *Caméra et analyse d'image*

Les outils d'imagerie donnent accès à une évaluation des comportements des animaux et génèrent des données utiles pour détecter ou même prévenir des pathologies, mais aussi ouvrir la possibilité d'un phénotypage à haut débit, étape d'une mise en place d'une sélection génétique. Les caméras sont utilisées pour compter le nombre d'animaux présents à la mangeoire, vérifier la densité et la répartition des animaux dans le bâtiment, ou encore s'assurer du confort des animaux. En effet, le confort est suivi en détectant les dysfonctionnements du bâtiment et de ses équipements, en analysant le taux d'occupation des logettes, les endroits inoccupés du bâtiment, la circulation des animaux, l'attente au robot de traite, etc.

À l'aide de caméras de reconnaissance faciale, l'unité Cloud d'Alibaba Group Holding<sup>72</sup> a déclaré avoir mis au point un algorithme permettant de diagnostiquer avec précision une gestation, en observant les changements de comportement, d'apparence physique et d'habitudes alimentaires après l'accouplement. L'absence de gestation serait diagnostiquée dès le troisième jour après l'accouplement contre 21 jours en pratique conventionnelle.

Certains logiciels d'imagerie permettent d'identifier individuellement les animaux sur la base des modèles de peau et de la reconnaissance faciale, d'assurer le suivi de données-clés telles que la consommation d'aliments et d'eau, la détection des chaleurs et les modèles de comportement. Ces logiciels sont susceptibles de prendre des décisions à la ferme concernant la production laitière, la gestion de la reproduction et la santé générale des animaux. Ce qui était auparavant un processus manuel qui prenait des jours, voire des semaines, se déroule désormais presque en temps réel.

L'étude des émotions des animaux et les nouveaux moyens d'analyse d'image et de son ouvrent des pistes pour détecter et mieux gérer la douleur et les autres émotions en élevage.

---

<sup>72</sup> <http://esanteanimale.fr/alibaba-utilise-lintelligence-artificielle-pour-un-diagnostic-de-gestation-des-truies-sept-fois-plus-rapide/>

## **Bénéfice-risque du numérique en élevage**

L'entrée du numérique dans les élevages a favorisé la réévaluation et l'élargissement du concept de santé, un suivi personnalisé des animaux, mais aussi l'anticipation sur le développement de pathologies avec la mise en place de démarches efficaces de prévention.

Cette médecine dite « 4 P » (prédictive, préventive, personnalisée et participative), produit de l'e-santé, pourrait selon certains évoluer vers une médecine « 6 P » qui serait, en plus, prouvée et de précision.

Cependant, le développement de ces nouveaux dispositifs technologiques et des modifications des pratiques professionnelles pose des questions en matière de gestion de la santé animale : émergence de nouveaux acteurs ou de nouveaux rôles, transformations des modes d'élevage et/ou de la structure des filières, mécanisation des animaux, relations homme / animal, etc.

## **Médecine connectée des animaux de compagnie**

Les outils connectés pour les animaux de compagnie sont plutôt développés à destination des propriétaires que des vétérinaires. En effet, les propriétaires sont de plus en plus connectés avec leur téléphone portable et peuvent obtenir des données selon les objets connectés dont ils disposent :

- Colliers GPS, solutions de géolocalisation.
- *Trackers* permettant de quantifier l'activité, le comportement, les paramètres biologiques ou physiologiques.
- Systèmes de surveillance connectés.
- Gamelles et fontaines connectées ; l'historique des consommations et des comportements alimentaires peuvent permettre d'identifier ou de confirmer d'éventuels problèmes de santé.
- Autre dispositif : sous un bac à litière, mesure du poids de chaque chat, de la production d'urine et de fèces, des visites quotidiennes et des mouvements à l'intérieur du bac. L'application repère sur une douzaine de paramètres les habitudes et les comportements du chat, détecte tout changement pathologique.

Un exemple de prédictivité en médecine 4P concerne la sélection des chiens guides d'aveugle. L'utilisation de l'intelligence artificielle aboutit à une prédiction précise à près de 100 % pour un chiot qui serait potentiellement futur chien guide, alors que la prédiction actuellement est d'environ 64 % (*Alexandre, 2017*).

## **Résumé**

- La télésanté englobe toutes les informations payantes ou gratuites, produites par différents médias (télévision, magazines, sites Internet, blogues). Ces différentes sources d'informations orientent les propriétaires d'animaux vers l'autodiagnostic, tout comme en médecine humaine. Néanmoins, avec la télémédecine, un avis spécialisé, une surveillance du patient ou une décision thérapeutique sont prises par le vétérinaire. De plus la télémédecine facilite les échanges entre praticiens ou la consultation d'un spécialiste par un généraliste.
- La gestion, l'interprétation et la valorisation des informations, dans un objectif de prévention de maladies, participent à l'émergence de nouveaux métiers en santé animale, entre le vétérinaire praticien et le mathématicien-programmateur, en lien avec les bases de données agricoles et les systèmes de suivi de la santé des élevages. Comme en médecine humaine, la multiplication des appareils recueillant des données physiologiques pose la question de la propriété intellectuelle de ces informations.
- Des usages variés du numérique ont pénétré dans l'agriculture et l'élevage avec le développement d'une agriculture connectée et d'un élevage de précision. De même que l'application du numérique a conduit

au développement de la télémédecine et de la télésanté chez l'homme, la télémédecine vétérinaire (codifiée depuis le 5/05/2020) utilise entre autres les données numériques associées au suivi des élevages avec une orientation vers un suivi personnalisé des animaux et la mise en place de stratégies de prévention de maladies.

- Remarquons aussi que le numérique introduit une fragilité supplémentaire dans l'agriculture. Désormais, les vaches sont bardées de tout un tas de capteurs qui permettent de savoir quand elles vont vêler, etc. Les groupes électrogènes dont disposent certains producteurs de lait ont une autonomie d'une semaine : autant dire que, passé ce délai, ils se retrouveront avec des centaines de vaches et de brebis à traire... à la main ! La même remarque peut être faite pour l'industrie laitière à l'échelle européenne.
- La médecine des animaux de compagnie est encore peu orientée vers l'utilisation de données numériques issues d'outils connectés qui sont plutôt développés à destination des propriétaires.

## Références bibliographiques et sites Internet

- Alexandre L. (2017) : La guerre des intelligences : comment l'intelligence artificielle va révolutionner l'éducation, Jean-Claude Lattès.
- Allain C., Chanvallon A., Clément P., Guatteo R., Bareille N., Élevage de précision : périmètre, applications et perspectives en élevage bovin, in Rencontres Recherches Ruminants (RRR), 21, 2014:3-10.  
[http://www.journees3r.fr/IMG/pdf/Texte\\_1\\_Elevage\\_de\\_precision\\_C-Allain.pdf](http://www.journees3r.fr/IMG/pdf/Texte_1_Elevage_de_precision_C-Allain.pdf)
- Anses (2018) : Définition du bien-être animal.  
<https://www.anses.fr/fr/content/l%E2%80%99anses-propose-une-d%C3%A9finition-du-bien-%C3%AAtre-animal-et-d%C3%A9finit-le-socle-de-ses-travaux-de>
- Assie S., Relun A., Guatteo R., Médecine et élevage de précision : surveillance et détection précoce individualisée en élevage. Innovations Agronomiques, INRA, 2018;66:43-51.
- Avis et rapport de l'Académie Vétérinaire de France sur la télémédecine vétérinaire, in *Bull Acad Vet France*, 2017 - Tome 170 - n°5.  
<http://www.academie-veterinaire-defrance.org/>
- Lesage M. (2019), Les métiers de la santé animale en France : tendances et perspectives, centre d'études et de prospective du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Analyse n° 144.  
<https://agriculture.gouv.fr/les-metiers-de-la-sante-animale-en-france-tendances-et-perspectives-analyse-ndeg144>
- Perrin R., Thèse pour le doctorat vétérinaire (7/06/2019), Émergence de l'intelligence artificielle et utilisation des technologies big data en médecine vétérinaire : importance de la sensibilisation des futurs vétérinaires, Faculté de Médecine-Université de Créteil.
- Veissier I. et al., Élevage de précision et bien-être en élevage : la révolution numérique de l'agriculture permettra-t-elle de prendre en compte les besoins des animaux et des éleveurs ?, in *INRA Prod Anim*, 2019 ;32(2) : 281-90.

## Autres

Les Dossiers de l'Observatoire des usages de l'agriculture numérique, n°1 (2017) à n°8 (2020).  
<http://agrotic.org/observatoire/>

Analyses de spécialistes et d'experts.

<http://esanteanimale.fr/enjeux-et-analyses-de-specialistes-et-d-experts/>

Vet IN Tech - Livre blanc, *E-santé animale : en savoir plus sur les objets connectés*.

<https://vet-in-tech.com/>

Vet IN Tech - Livre blanc, *Télémédecine vétérinaire*.

[https://vet-in-tech.com/#!publications\\_livre-blanc-telemedecine-veterinaire](https://vet-in-tech.com/#!publications_livre-blanc-telemedecine-veterinaire)

## D. Recommandations relatives à la partie II

De façon globale, le CPP recommande, comme cela a déjà été évoqué, le lancement d'un débat à l'échelle nationale sur la « sobriété numérique ».

***En termes de prévention et concernant les dimensions sociales des technologies du numérique, le CPP émet les préconisations suivantes.***

La fracture numérique, en matière de politique mais aussi d'information et de culture, ne peut être résorbée que si une éducation et une dialectique numériques appropriées sont mises en œuvre, précisément par les instances politiques.

L'examen des mutations organisationnelles prévues pour les entreprises et les institutions sous l'influence du numérique permet de constater qu'un modèle vertueux se distingue, dit de « l'organisation apprenante ». Or, aujourd'hui, l'attachement aux valeurs humaines semble représenter l'une des meilleures garanties face aux organismes digitalisés, en préservant notamment « l'intelligence collective » face à « l'intelligence artificielle ».

***Concernant le handicap, le CPP se fait l'écho des recommandations prises dans le rapport du Conseil national du numérique en 2020, ici rappelées :*** l'accessibilité du Web mériterait d'être davantage développée et encouragée, et cela très rapidement, par les pouvoirs publics.

Saisi par Sophie Cluzel, secrétaire d'État chargée des Personnes handicapées, et Cédric O, secrétaire d'État chargé du Numérique, le Conseil national du numérique (CNNum) a conduit une étude sur des scénarios d'amélioration de l'accessibilité numérique entre février 2019 et janvier 2020. Il a publié un rapport sur l'accessibilité numérique, remis aux ministres le 5 février 2020. Les 50 recommandations issues de ce rapport ont vocation à nourrir la réflexion de l'État français sur le sujet de l'accessibilité numérique, en vue de la Conférence Nationale du Handicap (CNH) qui était prévue le 11 février 2020.

***Le CPP préconise en matière de numérique au service des Activités Sociales et Culturelles de :***

- Mettre en place un système d'observations partagé relatif aux pratiques des bénéficiaire.
- Démocratiser les Activités Sociales.
- Créer une culture numérique des acteurs des Activités Sociales.
- Redéfinir le contenu des missions de chaque acteur pour faire face aux défis à venir.
- Promouvoir des expérimentations porteuses d'innovation et de progrès sociaux.

***En termes de précaution, le CPP est favorable à la menée d'études relatives aux constats suivants :***

- Citoyens et consommateurs ont-ils vraiment envie d'utiliser les technologies « qu'on ne peut plus empêcher », ou évoluent-ils selon un processus d'addiction et d'aveuglement suite au forçage publicitaire visant à une « soumission » ? Le *smartphone* est arrivé dans l'espace public sans que personne n'ait jamais songé à s'interroger sur les conséquences de son utilisation.
- En janvier 2019, le *Défenseur des droits* a alerté les pouvoirs publics sur le risque lié à une dématérialisation trop rapide et sans précaution des services publics. Où ira notre préférence, si l'on n'envisage pas par anticipation les résultats finaux, sachant que le *Plan France numérique 2020* prévoit que « le papier devra être définitivement abandonné et l'intégralité des démarches administratives devront être dématérialisées » ?

***Le CPP alerte également sur le questionnement suivant :***

- L'espèce humaine va-t-elle vraiment s'adapter, et quelles seront alors les modalités d'adaptation, et non, souhaitons-le, de disparition progressive des liens vitaux unissant en un ensemble complexe les diverses composantes constitutives de notre espèce ?
- Face à une situation évolutive de « honte prométhéenne », exprimant le sentiment d'être constamment en défaut par rapport à des machines que nous avons pourtant créées, il faut garder à l'esprit que nous resterons encore très longtemps beaucoup plus polyvalents que ne le sont les machines.

Dès lors, le CPP propose de mener des études selon les objectifs suivants :

- Organiser la réflexion entre une modernité techno-centrée et une modernité réflexive, autrement dit penser les outils numériques sans entrer dans une dualité par trop binaire entre ces deux pôles.
- Face au façonnement d'une idéologie majeure des technologies nouvelles, par le biais de la création de machines qui se substituent à l'humain – ce dont est capable l'intelligence artificielle –, doit être favorisée la mise en place de trois parades :
  - En premier lieu, il faut toujours rappeler qu'il y a un programmeur derrière la machine : l'homme parle à l'homme qui est derrière la machine, et non à celle-ci !
  - Ensuite, il ne faut pas oublier que ces machines, qui bientôt développeront de l'empathie et de l'humour selon leurs zélateurs, ne feront que simuler ces capacités. Il y a une maltraitance des internautes à leur faire croire que le robot Sophia a les capacités que ses fabricants lui prêtent !
  - Le troisième principe consiste dans le fait de toujours garder à l'esprit que les qualités humaines ne sont pas celles des machines, comme la fiabilité !

***En termes de prévention et de précaution pour l'usage du numérique chez l'enfant, le CPP formule les recommandations suivantes :***

- Concernant les relations parents-enfants, il faut promouvoir auprès des parents l'intégration des écrans dans une démarche éducative globale : comment utiliser les écrans en famille pour développer des capacités de socialisation, de mémoire ou d'autocontrôle ?
- Le Conseil supérieur de l'audiovisuel a lancé en 2006 le slogan « Pas de télé avant 3 ans ». Or, comme le montre l'étude ELFE, les progrès dans ce domaine ne sont que marginaux. C'est pour cela qu'un consensus existe pour dire qu'avant 3 ans, l'usage des écrans ne fait que prendre aux enfants le temps dont ils ont besoin pour autre chose nécessaire à leur développement et leur épanouissement. C'est un message important qu'il faudra diffuser.
- Pour les enfants âgés de 2 à 5 ans, ces médias ne sont pas indispensables et devraient être limités à une heure par jour, *au maximum*. En outre, le contenu doit être de haute qualité et totalement dédié à l'épanouissement de l'enfant.
- Par conséquent, les parents, les travailleurs socio-éducatifs et les professionnels de l'enseignement se doivent non seulement de prêter attention au temps passé par les enfants devant les médias numériques, mais aussi être attentifs à la manière, au moment et au lieu où ils les utilisent.
- Au-delà des recommandations pratiques nécessaires et de la vigilance à apporter quant à ces usages, la prise de conscience par les adultes et les enfants des modèles des industries des médias et divertissement numériques fondés sur la création d'une dépendance est importante. L'apprentissage à des mécanismes attentionnels possibles pour y résister est essentiel. Pour les enfants, parce qu'il s'agit d'une question sociale, cela doit passer par l'école ; or, des dispositifs opérationnels existent qui devraient toutefois être davantage encouragés.

***En termes de précaution concernant l'usage professionnel du numérique***, le CPP recommande des études ayant trait aux différents effets des TIC, relatifs tant aux facteurs de risque psychosociaux qu'à l'expression différente de risques physiques plus classiques :

- L'intensification du travail et la réduction de l'autonomie.
- L'extension de la disponibilité et de l'espace-temps professionnel.
- Le développement des incivilités numériques.
- L'expression différente de risques physiques classiques.

***En termes de précaution concernant les personnes âgées, le CPP recommande de :***

- Multiplier les dispositifs itinérants pour aller au-devant des personnes âgées dans les zones rurales.
- Prendre la mesure du clivage générationnel que peut engendrer le numérique et appuyer la démarche des associations qui œuvrent pour l'autonomie numérique des personnes âgées.

***En ce qui concerne la médecine vétérinaire, le CPP souhaite que soient promues, en termes de prévention, les recommandations suivantes :***

- L'usage de la télésanté oriente les propriétaires d'animaux vers l'autodiagnostic tout comme en médecine humaine. Un avis spécialisé, une surveillance, une décision thérapeutique doivent être décidés par le vétérinaire.
- La télémédecine et le développement de l'élevage de précision méritent un enseignement adapté et conséquent dans les écoles vétérinaires.
- La télémédecine animale peut représenter une réponse à la désertification vétérinaire dans les campagnes mais nécessite une évaluation de l'expérimentation réglementaire en court et des financements pour son développement. En ce domaine, les données collectées par les différents capteurs et outils numériques pourraient s'avérer utiles sous réserve d'être accessibles à la recherche publique.

# III. Pathologie liée au numérique en population générale

## A. Impacts des agents physiques liés à l'usage du numérique sur la santé humaine, en termes de morbidité (santé humaine et exposome numérique)

De fortes incertitudes subsistent aujourd'hui sur les effets éventuels des différentes expositions auxquelles sont confrontés les individus qui utilisent des objets issus du numérique : effets des écrans, de certaines ondes, effets sur les postures physiques, effets des matériaux utilisés, etc. Ce chapitre dresse un bilan des connaissances dans les principaux champs de recherche concernés.

### 1. La lumière bleue et les écrans

#### a) Introduction

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde exprimée en nanomètres (nm). Le domaine de la lumière visible correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum, avec un spectre qui s'étend de 380 nm (violet) à 800 nm (rouge).

*Ce chapitre se limite aux effets visuels et non visuels induits par la lumière émise par les diodes électroluminescentes* qui, par l'émission d'une lumière riche en longueurs d'onde courte (couleur bleue), sont susceptibles d'induire des effets visuels avec l'endommagement de la rétine (photo-toxicité, effets de la modulation temporelle, éblouissement) et des effets non-visuels (Anses, 2019a, 2019b). Comme tout appareil électrique, les diodes électroluminescentes émettent un champ électromagnétique de très faible intensité (écran LCD d'ordinateur 0.1  $\mu$ T à 15 cm).

Les effets des champs électromagnétiques de plus forte intensité sont discutés dans le chapitre suivant. Pour étudier les effets toxiques ou bénéfiques de la lumière bleue, il est nécessaire d'effectuer quelques rappels à propos de la structure de la rétine ainsi que de photométrie, en définissant les unités utilisées.

#### b) La lumière bleue, qu'est-ce que c'est ?

La lumière bleue est une partie du spectre visible de la lumière, dont les longueurs d'onde se situent entre 380 et 500 nm. Elle est émise par le soleil, mais aussi par des sources lumineuses artificielles : ampoules LED et écrans d'outils numériques (tablettes, télévisions, ordinateurs, *smartphones*). Les longueurs d'onde inférieures à 380 nm correspondent à la lumière UV qui est subdivisée en UV-A (380-315 nm), UV-B (315-280 nm) et UV-C (280-100 nm). Cependant, en raison de l'absorption des UV par la couche d'ozone de l'atmosphère, les UV-C n'atteignent pas la surface de la terre et 95 % de la lumière UV appartient à la gamme des UV-A. Si la toxicité oculaire de la lumière UV est établie depuis longtemps, celle de la lumière bleue est discutée et présentée dans ce chapitre.

La lumière « bleue » peut aussi être subdivisée en couleurs perçues par l'œil humain et correspondant à une bande de longueurs d'onde : violet (380 à 449 nm), violet-bleu (449 à 466 nm), bleu-violet (466 à 478 nm), bleu (478 à 484 nm), bleu-vert (483 à 490 nm) et vert-bleu (490 à 510 nm).

Le spectre solaire est relativement plat avec un maximum dans le vert. Les spectres des sources lumineuses artificielles sont très différents de celui de la lumière solaire, différences cependant non évidentes à l'œil qui



perçoit une lumière blanche. Le spectre de la lumière émise par les LED (ou *Light-Emitting Diode*. En français, on devrait dire DEL, pour Diode Électroluminescente) présentes dans les écrans montre un pic dans le bleu centré sur 450 nm et un pic plus large centré dans le vert-jaune, vers 550 nm, avec un creux dans le cyan vers 480 nm<sup>73</sup>. Les écrans (télévision, ordinateur, tablette, *smartphone*) émettent ainsi une quantité importante de lumière bleue.

Les écrans tout particulièrement diffusent des pics de lumière bleue appelée lumière à Haute Énergie Visible (ou HEV). En 2014, les Français ont passé en moyenne 6 heures devant un écran. On estime qu'un enfant né en 2015 aura passé à l'âge de 7 ans l'équivalent d'une année pleine, jour et nuit, à fixer un écran. Nous sommes ainsi surexposés à cette lumière bleue dès le plus jeune âge et une surexposition précoce aux écrans entraîne une augmentation des risques pathologiques comme l'obésité, le retard au langage, le cancer ou bien des risques sociétaux comme une moindre autonomie ou une intégration sociale plus difficile<sup>74</sup>.

### c) **Rappel sur la structure de la rétine**

La rétine capte les signaux lumineux et génère une impulsion électrique analysée par le système nerveux central. Parmi les différentes couches cellulaires de la rétine, les cellules sensorielles (cônes et bâtonnets) sont en contact étroit avec l'épithélium pigmentaire rétinien (RPE). Le complexe RPE/cellules sensorielles maintient une balance entre absorption de photons pour la vision, image rétinienne de qualité et réduction des risques de photo-toxicité, en rapport avec une forte luminosité d'exposition.

Le RPE secrète des facteurs de croissance, des nutriments destinés aux photorécepteurs, élimine les déchets et absorbe de la lumière. Une abondante littérature documente les effets toxiques sur la rétine d'une lumière enrichie en longueurs d'onde courte en comparaison de longueurs d'onde longue (*Chamorro et al.*, 2013; *Ham et al.*, 1976).

### d) **Rappel sur les unités et sur les écrans numériques**

Quelques unités de photométrie pour mieux comprendre :

- **Intensité lumineuse (unité candela, cd)** : intensité d'une source dans une direction donnée qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. Une sphère contenant  $4\pi$  stéradians, une source à rayonnement isotrope de 1 cd rayonnera dans l'espace une intensité de  $4\pi/683 = 0,0184$  watt.
- **Flux lumineux (unité lumen, lm)** : indique la quantité totale de lumière émise dans toutes les directions par une source primaire. 1 lumen représente le flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme positionnée au sommet d'un angle solide et d'une intensité de 1 candela.  $1 \text{ Lumen} = 1/683 \text{ w} = 1,464 \text{ mW}$ .
- **Luminance (unité cd/m<sup>2</sup> ou nit)** : caractérise l'aspect lumineux d'une surface éclairée qui devient une source secondaire. La comparaison de quelques valeurs de luminance selon différentes sources est la suivante : neige au soleil : ciel de jour 3 000-10 000 cd/ m<sup>2</sup>, pleine lune 3 000 cd/ m<sup>2</sup>, téléviseur 300-400 cd/ m<sup>2</sup> et ordinateur 150-200 cd/ m<sup>2</sup>. On constate que l'exposition de l'œil humain aux écrans est 10 à 20 fois inférieure à l'exposition en extérieur.
- **Éclairement (unité lux)** : correspond au flux lumineux reçu par unité de surface. Un éclairement de 1 lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit un flux de 1 lumen par mètre carré, donc  $1 \text{ lux} = 1,464 \text{ mW/ m}^2$ . L'éclairement en plein soleil est de l'ordre de 100 000 lux, ce qui correspond à environ 150 W/ m<sup>2</sup>. Comme exemples, donnons : le ciel couvert : 25 000 lux ; l'éclairage domestique : 100 à 200 lux ; la luminosité minimale pour lire un texte : 100 lux.

---

<sup>73</sup> Zanier & Delahaye, 2019.

<sup>74</sup> Byeon & Hong, 2015 ; Chonchaiya & Pruksananonda, 2008 ; Collet *et al.*, 2019 ; Pagani *et al.*, 2016, 2010 ; Zimmerman *et al.*, 2007 ; Stevens *et al.*, 2013, 2014 ; Ades *et al.*, 2019.

- **Température de couleur (T) Kelvin (K) :** précise la teinte d'une lumière blanche. Une lumière « chaude » aura une température basse (couleur qui tire vers le jaune,  $T < 3\,000\text{ K}$ ), une lumière « froide » une température élevée (couleur qui tire vers le bleu,  $T > 5\,000\text{ K}$ ). Il est intéressant de noter que la dénomination « blanc chaud » et « blanc froid » qui se réfère aux couleurs rouge et jaune du feu et au bleu de la glace utilise des valeurs numériques en contradiction avec la physique car la température du jaune est en effet plus élevée que la température du bleu.

Puisque la lumière est une forme d'énergie, on peut définir le flux avec comme unité le joule par unité de temps (J/s correspondant au watt, W) et l'intensité avec comme unité le watt par stéradian (W/sr). Pourquoi des unités photométriques telles que lumen au lieu de watt, candela au lieu de W/sr ? En fait, ces unités photométriques tiennent compte du fait que l'œil humain n'a pas la même sensibilité selon la longueur d'onde de la lumière émise. Par exemple, une lumière monochromatique verte (510 nm) est perçue comme deux fois moins intense qu'une lumière vert-jaune (555 nm) de même intensité énergétique.

## Les écrans

Pour un écran (téléviseurs, ordinateurs) à cristaux liquides (LCD), la lumière est émise par des LED réparties derrière ou sur les côtés de la dalle LCD. La luminance de ces écrans est très faible et la lumière bleue n'est pas transmise directement à l'utilisateur.

Pour les écrans OLED (*Organic Light-Emitting Diode*) ou AMOLED (*Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode*), la lumière est émise directement par les cellules, ce qui a contribué à un amincissement des écrans utilisés pour les tablettes, écrans d'ordinateurs portables et téléphones.

Ainsi, les écrans d'ordinateurs à LED avec des températures de couleur de 4 500 K à 6 900 K correspondent à des éclairages variant de 20 à 60 lux. Les écrans à LED de *smartphones* ou de tablettes électroniques avec des températures de 4 100 K à 7 000 K correspondent à des éclairages de 2 à 10 lux. Le risque est fonction de la distance à l'écran, du temps d'exposition et de la luminance. La luminance est de l'ordre de 150 nits pour un écran d'ordinateur et de 300 nits pour un écran de téléviseur (*Behar-Cohen et al., 2011*).

### e) Effets visuels d'une exposition aux écrans

Suite à une exposition aux LED, trois types d'effets sont rapportés : photo-toxicité, modulation temporelle et éblouissement. Ces effets ont été étudiés soit *in vivo* en expérimentation animale ou *in vitro* sur des cellules en culture. La modulation temporelle et l'éblouissement ne représentent pas de risque pour la santé pour les raisons suivantes :

1 - La fréquence du courant alternatif (50 Hz) induit un effet modulateur temporel avec une fréquence de répétition de 100 Hz. Il a été rapporté un effet de papillotement (*invisible flicker*) (*Anses, 2019b*) maximal aux fréquences de l'ordre de 10 Hz et pouvant déclencher une crise d'épilepsie, mais cet effet n'est pas observé pour des fréquences de 100 Hz. En revanche, vers 100 Hz et à des valeurs supérieures, un effet stroboscopique apparaît mais n'est pas considéré comme une gêne, avec un pourcentage de modulation des lampes LED inférieur à 8 % (*Anses, 2019a*). De plus, les effets d'une modulation temporelle de l'éclairage ne sont pas retrouvés avec les écrans de téléphone et tablette en raison d'une alimentation par un courant continu.

2 - En rapport avec la faible luminance des écrans, l'effet d'éblouissement ne peut être évoqué.

Ainsi, la question posée est celle d'une *potentielle photo-toxicité rétinienne suite à une exposition à la lumière bleue des LED*. Afin de déterminer le risque toxique d'une exposition à la lumière bleue, les expérimentations ont été conduites sur des systèmes cellulaires *in vitro* et sur des modèles animaux, généralement les rongeurs mais aussi les singes.

Deux types de dommages photochimiques sont induits par une lumière de haute intensité (390-600 nm) (*Tosini et al., 2016*) :

1) Une courte exposition (jusqu'à 12h) à une forte intensité de lumière bleue induit des dommages de l'épithélium pigmentaire rétinien (RPE) chez le singe rhésus. Cette toxicité est dépendante de la concentration en oxygène et l'utilisation d'antioxydants réduit l'intensité des lésions.

2) Une exposition plus longue (12-24 h) à plus faible intensité lumineuse endommage les photo-pigments (rhodopsine et opsines). Le mécanisme de toxicité dépend d'une part du type de photo-pigment et d'autre part de l'énergie des photons en rapport avec la longueur d'onde de la lumière émise. Ainsi, la lumière bleue induit un maximum d'effet toxique sur des cellules en culture pour des longueurs d'onde de 415 à 455 nm (Arnault *et al.*, 2013). L'effet photo-toxique repose sur la génération d'espèces réactives oxygénées (ROS) en rapport avec une réponse inflammatoire et la perturbation de fonctions mitochondriales (Chamorro *et al.*, 2013).

Parmi les résultats de la littérature scientifique, seules ont été considérées les expérimentations mentionnant le spectre de lumière appliquée sur un système *in vitro* ou *in vivo* et utilisant des valeurs de flux lumineux en rapport avec une utilisation des écrans et non des LED en général, dont l'éclairement est bien supérieur à celui des écrans et qui peuvent provoquer des lésions de la rétine en fonction de la durée d'éclairement, de l'intensité, de la position de l'œil par rapport à la source et d'une population sensible (voir ci-après) ou non.

La viabilité de cellules de l'épithélium pigmentaire de porc testée *in vitro* est altérée après 3 jours d'exposition à une lumière LCD à 300 nits (Lin *et al.*, 2019). Bien que la relation entre luminance et toxicité déterminée *in vitro* puisse être discutée pour une évaluation du risque *in vivo*, si l'on tient compte d'un temps d'exposition bien inférieur à 3 jours et d'une luminance des écrans de l'ordre de 150-300 nits, le risque estimé est très faible.

Sur la base d'études chez les animaux, l'ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) définit les valeurs-seuils d'exposition aiguë à la lumière bleue chez le macaque de l'ordre de 20 à 30 J/cm<sup>2</sup>. La conversion en valeur limite d'exposition (VLE) pour les humains en intégrant un facteur de sécurité de 5 à 10 est de 2.2 J/cm<sup>2</sup> pour des durées d'exposition inférieures à 10 000 secondes (2,8 heures). Pour des durées d'exposition plus longues, au-delà de 10 000 secondes, l'exposition n'est plus exprimée en dose mais en éclairement énergétique de la rétine pondéré dans le bleu, avec comme valeur limite 0.22 mW/cm<sup>2</sup>. La toxicité de la lumière bleue pour l'œil humain correspond à une longueur d'onde comprise entre 415 et 455 nm (bleu-violet ou bleu profond) ; cependant un effet toxique dû aux écrans ne peut être évoqué (Renard & Leid, 2016) car :

- Les écrans LCD classiques et LCD éclairés par LED ne transmettent pas directement la lumière. Les écrans OLED ou AMOLED émettent une lumière bleue mais la quantité totale de lumière est faible par rapport à une diode de forte puissance utilisée pour l'éclairage domestique (10 à 20 fois moins) et le blanc est formé par l'allumage simultané des 3 sous-pixels colorés.
- L'exposition aux écrans avec des valeurs de luminance de 150-200 cd/m<sup>2</sup> n'a pas été démontrée comme inductrice d'un effet photo-toxique.

Les symptômes attribués à une exposition prolongée à lumière bleue des écrans relèvent du domaine de la fatigue oculaire par sollicitation excessive de la convergence et de l'accommodation ainsi que de l'aggravation de la sécheresse oculaire par réduction du clignement (Renard & Leid, 2016).

Par ailleurs, l'ICNIRP définit une population sensible à la lumière bleue : les aphaques (œil sans cristallin), les pseudo-phaques (œil avec un implant en remplacement du cristallin) et les enfants d'un âge inférieur à 2 ans (cristallin clair). Des effets photo-toxiques pourraient en conséquence être mis en recherche dans ces populations ultra-sensibles, mais, même pour cette population, il n'est pas établi de risque avéré par une exposition devant les écrans.

Cependant, deux questions restent ouvertes :

- La question d'une exposition long terme à la lumière bleue à faible dose et en chronique n'est pas résolue en raison du manque de données.

- La question des VLE qui d'après l'Anses devraient être revues (Anses, 2019b) en raison d'une augmentation de la sensibilité des techniques récentes de détection de la photo-toxicité et de la nécessité de prendre en compte les effets cumulatifs d'une exposition de longue durée. Très récemment, cette demande de révision des VLE de l'ICNIRP a été argumentée par un avis de l'Anses (Anses, 2020), mais comme nous l'avons noté précédemment, il faut tenir compte des valeurs de luminance et de la composition spectrale de la lumière, car l'effet nocif de la lumière bleue peut être modulé par la quantité de lumière rouge contenue dans le spectre étudié. D'autre part, une controverse sur le modèle de l'œil de rongeur dont la taille, les structures cellulaires et la sensibilité aux différentes longueurs d'onde sont assez éloignées de celles de l'œil humain. En conséquence, la valeur du facteur de sécurité pour l'homme afin de définir une VLE, sur la base des expérimentations chez les rongeurs, fait l'objet de discussions.

Enfin, les études épidémiologiques qui s'intéressent aux troubles du sommeil ne peuvent répondre à la question de la photo-toxicité suite à une exposition la lumière bleue des écrans, car même si un examen ophtalmologique était programmé dans ces études, un effet indésirable ne pourrait être rapporté aux seuls écrans en raison d'une exposition à la lumière naturelle et artificielle quelle qu'elle soit.

#### f) *Effets non visuels d'une exposition aux écrans*

L'effet adverse le plus documenté concerne les troubles du sommeil. Il est établi que les photorécepteurs à mélanopsine (ou *Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells, ipRGC*) (Zaidi et al., 2007 ; Hattar et al., 2002 ; Berson et al., 2002) régulaient le niveau de mélatonine en fonction de l'éclairement. La sensibilité spectrale de l'excitation des ipRGC est observée avec un maximum correspondant à une longueur d'onde de 490 nm (Anses, 2019a ; Zaidi et al., 2007 ; Mure et al., 2019). Ce système distinct du système visuel envoie des informations vers les noyaux supra-chiasmatiques de l'hypothalamus, siège de l'horloge circadienne centrale. Ainsi, une perturbation de cette régulation induit une désynchronisation des rythmes biologiques. En effet, la sécrétion de la mélatonine débute 2 heures avant le coucher, augmente vers un maximum au milieu de la nuit puis diminue avec un taux sanguin très faible le matin. Ainsi, l'activation des ipRGC inhibe la sécrétion de mélatonine.

Il est rapporté dans de nombreux articles une association entre le temps passé devant les écrans et l'induction de troubles du sommeil, avec un retard à l'endormissement ou une durée de sommeil raccourcie (Bowler & Bourke, 2019 ; Cheng et al., 2010 ; Hale & Guan, 2015). L'Académie Américaine de Pédiatrie rapporte une augmentation des troubles du sommeil chez les enfants qui dorment avec leur *smartphone*. Ainsi, même en exposition avec une luminosité faible, l'écran du *smartphone* retarde l'horloge interne *via* la mélatonine et perturbe le sommeil en différant l'endormissement et en diminuant sa qualité.

Des études sur l'impact des téléphones portables sur le sommeil ont été conduites. Par exemple, Heo et al. rapportent l'une des premières expérimentations en double-aveugle et incluant un contrôle (téléphone portable sans émission d'une bande dans le bleu) sur une population d'adultes (22 hommes de 20 à 40 ans) (Heo et al., 2017). L'exposition le soir à la lumière bleue du téléphone retarde l'endormissement, à la limite de la significativité statistique, par la diminution du taux de mélatonine et l'hyperthermie corporelle. Ces résultats sont à confirmer avec une population de taille plus large et la question d'un effet potentiel du genre. L'exposition le soir aux écrans de téléphone portable à 20 cm des yeux diminue le taux de mélatonine avec un effet sur l'endormissement qui peut être limité en abaissant la luminosité de l'écran et en ajustant le spectre vers des couleurs chaudes (Oh et al., 2015).

Par ailleurs, la mélatonine circulante de la mère passe la barrière placentaire et de plus les cellules du trophoblaste en secrètent (Carlomagno et al., 2018). Les récepteurs à la mélatonine sont exprimés dans le cerveau du fœtus et la variation du taux de cette hormone participe à la régulation de l'horloge circadienne. Notons que la mélatonine exerce un effet protecteur sur le neuro-développement du fœtus en limitant l'induction de lésions cérébrales par un stress oxydant (Carlomagno et al., 2018). Cependant, une exposition de la mère à la lumière bleue, en perturbant le taux de mélatonine, induirait un effet sur les rythmes circadiens qui persisterait chez l'enfant puis l'adulte. Une désynchronisation du rythme circadien a pour conséquence une symptomatologie atypique avec troubles du sommeil, de l'humeur, de l'appétit et diminution de la vigilance ou des performances cognitives...

### **g) *Autres effets d'une exposition aux écrans chez les enfants et les nouveau-nés***

L'augmentation de risque de myopie est-il corrélé avec l'exposition aux écrans ? Une étude sur une cohorte de 1958 enfants âgés de 7 à 12 ans habitant Taiwan a conclu à une augmentation de l'incidence de développer une myopie pour les enfants exposés plus de 2 heures par jour (Ku et al., 2019). Ce résultat mérite cependant d'être confirmé par d'autres études épidémiologiques.

Le nouveau-né est hypermétrope et l'œil évolue avec une croissance axiale du globe (myopinisation) qui s'arrête à la taille présumée idéale pour la fonction oculaire. D'autres modifications participent à la fonction oculaire : aplatissement de la courbure cornéenne et du cristallin ou encore augmentation de la profondeur de la chambre oculaire. Ce processus physiologique est appelé emmétropisation\_ENREF\_11 (Anses, 2019b). Le déséquilibre spectral des LED avec un déficit en lumière rouge pourrait priver des effets photo-protecteurs potentiels de cette bande de longueur d'onde lors du processus physiologique d'emmétropisation. Ainsi, une exposition du nouveau-né à la lumière des écrans peut participer à l'augmentation de fréquence de myopie.

### **h) *Quid des lunettes anti-lumière bleue ?***

Les lunettes filtrant la lumière bleue ne sont pas, à proprement parler, faites pour protéger les yeux, la pupille ou la rétine. Elles sont fabriquées pour pouvoir continuer à utiliser les écrans, sans dérégler l'horloge interne ni le cycle du sommeil, ce qui pourra, par voie de conséquence, favoriser une meilleure santé des yeux. Selon le docteur Rahul Khurana, ophtalmologiste et porte-parole de l'American Academy of Ophthalmology, la fatigue visuelle numérique et les effets négatifs de la lumière bleue sur nos yeux sont deux préoccupations distinctes. Nous continuons de rendre responsables les lumières bleues de nos ordinateurs et de nos smartphones, mais en réalité, nous sommes davantage exposés à la lumière bleue du soleil. Ce n'est pas la lumière bleue qui nous fait mal aux yeux après une journée passée à regarder l'ordinateur, mais le fait de regarder un écran pendant des heures sans pause. C'est pourquoi ce spécialiste ne recommande pas le port de lunettes spéciales pour un usage informatique quotidien, si l'on respecte des pauses régulières.

Des études, conduites très souvent sur un petit nombre de volontaires, font état d'un effet du port de lunettes anti-lumière bleue sur le sommeil. Par exemple, des adolescents de 15-17 ans sont suivis pendant deux semaines. Le port de lunettes anti-lumière bleue atténue la suppression de synthèse de mélatonine induite par les écrans (van der Lely et al., 2015). Des résultats opposés ont été publiés (comme, par exemple, l'analyse de Lawrenson et al.) qui porte sur trois études (136 volontaires) destinées à tester le bénéfice relatif de lunettes bloquant la lumière bleue. Ces études concluent à un manque de preuves de haute qualité pour appuyer l'utilisation de lunettes anti-lumière bleue afin d'améliorer les performances visuelles, la qualité du sommeil, atténuer la fatigue oculaire ou encore préserver la santé maculaire (Lawrenson et al., 2017).

Par ailleurs, les fabricants de verres de lunettes cherchent à résoudre une équation impossible : les verres ne doivent pas transformer les couleurs (argument publicitaire : « ne pas dénaturer les couleurs »), mais doivent réduire significativement la lumière bleue des écrans, ce qui n'est bien sûr pas possible ! En effet, si on retire le bleu de la lumière blanche, on obtient une lumière de couleur jaune (Zanier & Delahaye, 2019).

Le manque de preuve d'une utilité du port des lunettes peut aussi être relié aux verres utilisés. Si l'on effectue une mesure de l'efficacité de verres anti-lumière bleue, on constate que ceux-ci coupent assez efficacement dans le proche ultraviolet (350-400 nm) comme attendu, mais que la transmission de la lumière est quasi identique au verre classique aux alentours de 450 nm. En d'autres termes, avec les écrans lumineux, l'efficacité est faible avec le pied du pic du côté des courtes longueurs d'onde qui est affecté, alors que le maximum du pic est réduit au mieux de 10 % (pour un pic centré sur 450 nm) (Zanier & Delahaye, 2019). Ainsi, pour supprimer la composante bleue de la lumière, il faut porter des lunettes avec des verres de couleur jaune.

## Résumé

- Les LED (*Light-Emitting Diodes*) émettent une lumière riche en longueurs d'onde courte (couleur bleue) susceptible d'effets adverses visuels avec endommagement de la rétine et des effets non-visuels.

La lumière émise peut avoir un effet toxique, mais c'est aussi son intensité qui permet d'évaluer la dangerosité de la lumière bleue des écrans. Il faut comparer la luminance des écrans, bien plus faible que celle des sources naturelles de lumière ou des LED utilisées en extérieur ou dans les habitations.

Les cellules photo-réceptrices classiques de la rétine (cônes et bâtonnets) sont principalement responsables de la formation des images, alors que les cellules ipRGC jouent un rôle majeur dans le processus de photo-réception non visuelle et participent au système de régulation de l'horloge circadienne.

- *Effets visuels* : un effet photo-toxique suite à une exposition aux LED peut être évoqué seulement pour des populations sensibles comme les aphaques (œil sans cristallin), les pseudo-phaques (œil avec un implant en remplacement du cristallin) et les enfants d'un âge inférieur à 2 ans (cristallin clair), mais il n'est pas établi de risque par une exposition devant les écrans.

De nombreuses publications d'ophtalmologistes, ainsi que des campagnes de publicité pour la vente de lunettes anti-lumière bleue interviennent dans un cadre de prévention des effets sur la santé, induits par une exposition prolongée aux écrans, avec la surreprésentation de lumière bleue dans le spectre d'émission.

Le déséquilibre spectral des LED, avec un déficit en lumière rouge, pourrait priver des effets photo-protecteurs potentiels de cette bande de longueur d'onde lors du processus physiologique d'emmétropisation. Une exposition du nouveau-né à la lumière des écrans pourrait participer à l'augmentation de fréquence de myopie.

- *Effets non visuels* : le niveau de mélatonine est inhibé par exposition à une lumière bleue de longueur d'onde égale à 490 nm. Cette perturbation induit une désynchronisation des rythmes biologiques illustrée par une corrélation entre le temps passé devant les écrans et l'induction de troubles du sommeil, avec un retard à l'endormissement et/ou une durée de sommeil raccourcie.

Des sources lumineuses intenses produites par des LED dans l'habitat ou en extérieur peuvent donc induire un effet photo-toxique. Mais, si la lumière bleue des écrans n'induit pas de photo-toxicité en population générale, elle contribue en revanche à la perturbation de l'horloge circadienne et à la fatigue oculaire. Si la lumière émise par les écrans riches en longueurs d'onde courtes (400-500 nm) n'a pas d'effet toxique sur la rétine sauf peut-être dans le cas d'une population sensible (les aphaques, les pseudo-phaques et les enfants de moins de 2 ans), ce déséquilibre spectral présente un effet sur notre horloge circadienne.

### **Références bibliographiques**

- Ades J. et al. (2019), L'enfant, l'adolescent, la famille et les écrans. Appel à une vigilance raisonnée sur les technologies numériques.
- Anses (2020), Avis relatif aux « valeurs limites d'exposition à la lumière bleue pour la population générale », cf. pp. 1–16.
- Anses (2019a), Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED).
- Anses (2019b), Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED).
- Arnault E. et al., Phototoxic Action Spectrum on a Retinal Pigment Epithelium Model of Age-Related Macular Degeneration Exposed to Sunlight Normalized Conditions, in *PLOS One*, 2013;8:e71398.
- Behar-Cohen F. et al., Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye ? in *Prog. Retin. Eye Res*, 2011;30:239–57.
- Berson D. M. et al., Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, in *Science*, 2002;295:70–3.
- Bowler J. and Bourke P. Facebook use and sleep quality: Light interacts with socially induced alertness, in *Br J Psychol*, 2019;110:519–29.
- Byeon H. and Hong S., Relationship between Television Viewing and Language Delay in Toddlers: Evidence from a Korea National Cross-Sectional Survey, in *PLOS One*, 2015;10: e0120663.
- Carlomagno G. et al., From Implantation to Birth: Insight into Molecular Melatonin Functions, in *Int J Mol Sci*, 2018-19.
- Chamorro E. et al., Effects of light-emitting diode radiations on human retinal pigment epithelial cells in vitro, in *Photochem Photobiol*, 2013;89:468–73.
- Cheng S. et al., Early television exposure and children's behavioral and social outcomes at age 30 months, in *J Epidemiol*, 2010;20 Suppl 2:S482-9.
- Chonchaiya W. and Pruksananonda C., Television viewing associates with delayed language development, in *Acta Paediatr*, 2008;97:77–82.
- Collet M. et al., Case-control study found that primary language disorders were associated with screen exposure, in *Acta Paediatr*, 2019;108:1103–9.
- Ferguson I. et al., Imitating Broadband Diurnal Light Variations Using Solid State Light Sources, in *J Light Vis Environ*, 2008;32:63–8.
- Hale L. and Guan S., Screen time and sleep among school-aged children and adolescents: a systematic literature review, in *Sleep Med Rev*, 2015;21:50–8.
- Ham W. T. et al., Retinal sensitivity to damage from short wavelength light, in *Nature*, 1976;260:153–5.
- Hattar S. et al., Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity, in *Science*, 2002;295:1065–70.
- Heo J. Y. et al., Effects of smartphone use with and without blue light at night in healthy adults: A randomized, double-blind, cross-over, placebo-controlled comparison, in *J Psychiatr Res*, 2017;87:61–70.

- Ku P. W. et al., The Associations between Near Visual Activity and Incident Myopia in Children: A Nationwide 4-Year Follow-up Study, in *Ophthalmology*, 2019;126: 214–20.
- Lawrenson J. G. et al., The effect of blue-light blocking spectacle lenses on visual performance, macular health and the sleep-wake cycle: a systematic review of the literature, in *Ophthalmic Physiol Opt J Br Coll Ophthalmic Opt Optom*, 2017;37: 644–54.
- van der Lely S. et al., Blue blocker glasses as a countermeasure for alerting effects of evening light-emitting diode screen exposure in male teenagers, in *J Adolesc Health Off Publ Soc Adolesc Med*, 56, 113–9.
- Lin C. W. et al., Effects of the Emitted Light Spectrum of Liquid Crystal Displays on Light-Induced Retinal Photoreceptor Cell Damage, in *Int J Mol Sci*, 2019-20.
- Mortazavi S. A. R. et al., Blocking Short-Wavelength Component of the Visible Light Emitted by Smartphones' Screens Improves Human Sleep Quality, in *J Biomed Phys Engl*, 8.
- Mure L. S. et al. Functional diversity of human intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, in *Science*, 2019;366:1251–5.
- Oh J. H. et al., Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night, in *Sci Rep*, 2015;5:1132-5.
- Pagani L. S. et al., Prospective associations between early childhood television exposure and academic, psychosocial, and physical well-being by middle childhood, in *Arch. Pediatr Adolesc Med*, 2010;164:425–31.
- Pagani L. S. et al., Prospective associations between televiewing at toddlerhood and later self-reported social impairment at middle school in a Canadian longitudinal cohort born in 1997/1998, in *Psychol Med*, 2016 ;46:3329–37.
- Renard G. and Leid J., Les dangers de la lumière bleue : la vérité !, in *J Fr Ophtalmol*, 2016;39:483–8.
- Stevens R. G. et al., Adverse health effects of nighttime lighting: comments on American Medical Association policy statement, in *Am J Prev Med*, 2013;45:343–6.
- Stevens R. G. et al., Breast cancer and circadian disruption from electric lighting in the modern world CA. Cancer, in *J. Clin.*, 2014;64:207–18.
- Tosini G. et al., Effects of blue light on the circadian system and eye physiology, in *Mol Vis*, 2016;22:61–72.
- Zaidi F. H. et al., Short-Wavelength Light Sensitivity of Circadian, Pupillary, and Visual Awareness in Humans Lacking an Outer Retina, in *Curr Biol*, 2007;17: 2122–8.
- Zanier S. and Delahaye J. *La lumière bleue sous l'œil du spectroscope*, in *BUP n°1010*, 2019;113:61–76.
- Zimmerman F. J. et al., Associations between media viewing and language development in children under age 2 years, in *J Pediatr*, 2007;151:364–8.



## 2. Impact sur la santé des radiofréquences et des applications associées dans le domaine de la téléphonie mobile sur la santé

Les technologies de transmission mobile de données (voix, données Internet...) utilisent des champs électromagnétiques dont la gamme de fréquences est comprise entre 10 kHz et 300 GHz. Elles se sont fortement développées au cours des vingt dernières années, avec l'apparition de nouvelles fonctions associées à la téléphonie mobile : normes Bluetooth, Wi-Fi, ainsi que nouvelles générations de téléphonie mobile.

En téléphonie mobile, pour les installations, les niveaux se situent entre 36 V/m et 61 V/m. Dans la réalité, les niveaux sont bien en-deçà, 80 % étant inférieurs à 1 V/m, la médiane s'étant établie en 2018 à 0,4 V/m. Celle-ci reste stable d'année en année, même si 2018 a été marquée par une légère hausse. Cette tendance reste à confirmer mais l'ANFR (Agence nationale des fréquences) pense que la médiane continuera à augmenter.

L'ANFR a réalisé une étude sur le 14<sup>e</sup> arrondissement de Paris, à propos de l'exposition future à la 4G en zone urbaine très dense. L'objectif consistait à simuler les évolutions prévisibles d'exposition dans le cadre du déploiement de la 4G toutes bandes. L'ANFR compte reproduire l'exercice avec la 5G. Dans le scénario futur, les puissances ont été augmentées de 1 800 MHz à 2 600 MHz et sont passées à 4 x 40 W. Dans les hypothèses retenues, il a été supposé que toutes les bandes de fréquence seraient utilisées sur tous les sites. Les niveaux d'exposition progressent en moyenne de 0,6 à 0,9 V/m à l'intérieur des bâtiments. Le nombre de points atypiques supérieurs à 6 V/m passe alors de 0,07 % à 0,5 %. La tendance en extérieur est similaire : la moyenne progresse de 1 V/m à 1,7 V/m, les points atypiques passant de 0,5 % à 3,1 %. En intérieur, les émetteurs à l'origine d'un point supérieur à 6 V/m passent de 1,6 % à 5,2 %. En extérieur, le nombre d'émetteurs impactés augmente également (ANFR, 2020).

Cependant, les nouvelles technologies sont susceptibles d'augmenter l'exposition de la population générale par l'intermédiaire d'émetteurs fixes, les antennes-relais qui inquiètent les riverains, ou les utilisateurs par la surexposition aux ondes électromagnétiques qu'émettent les téléphones mobiles. Des comportements contradictoires peuvent s'observer : ces développements technologiques sur la téléphonie mobile sont largement plébiscités car ils apportent des facilités individuelles et collectives certaines. Cependant, ils provoquent également des inquiétudes par l'émission des ondes électromagnétiques nécessaires à leur fonctionnement. Cette méfiance se trouve exacerbée lorsqu'il s'agit d'expositions subies, comme c'est le cas avec les antennes-relais.

Depuis près de quinze ans, l'Anses a été très mobilisée sur ce sujet. L'agence a réalisé des expertises des effets sanitaires potentiels à plusieurs reprises, en 2003 et 2005 sur la téléphonie mobile (Anses, 2005) et en 2009, 2013 et 2016, plus spécifiquement sur l'impact des radiofréquences chez les enfants (Anses, 2016) sans oublier, plus généralement, sur l'ensemble des applications utilisant des radiofréquences (Anses, 2020). L'Anses a créé en 2011 un groupe de travail « radiofréquences et santé » réunissant les acteurs de la recherche et les parties prenantes.

Ce groupe de travail actualise régulièrement l'expertise des risques potentiels liés aux radiofréquences.

L'étude des effets sur la santé des champs électromagnétiques couvre différents aspects. Le premier concerne la fréquence des rayonnements, qui joue sur l'interaction des champs magnétiques avec le vivant et notamment le corps humain. En fonction des fréquences, l'exposition des enfants et des adultes sera ainsi différente. Il existe également un impact sur la profondeur de pénétration dans les tissus. L'intensité des rayonnements reçus agit sur l'interaction et sur les effets potentiels, comme agit également la forme temporelle des expositions. La différence d'impact entre exposition aiguë et exposition chronique est une question centrale largement débattue dans l'évaluation des risques. Les interrogations portent également sur la forme des signaux, que ceux-ci soient analogiques ou numériques, et sur les personnes exposées et

notamment les personnes sensibles (enfants, femmes enceintes, travailleurs exposés à des niveaux supérieurs à ceux du grand public).

Ce sujet mobilise différents domaines complémentaires de recherche, des études expérimentales *in vitro* et *in vivo* et des études épidémiologiques. Dans le domaine des effets des radiofréquences sur le vivant, 200 millions de dollars à l'échelle mondiale ont été investis en recherche depuis 1997, avec des résultats pouvant être contradictoires, ce qui rend de fait l'analyse de risque difficile.

En France, la recherche sur ce sujet s'est articulée en trois temps :

- 1998-2005 : le Réseau national de recherche en télécommunications a piloté des projets orientés sur l'effet sanitaire et la dosimétrie.

- 2005-2010 : la Fondation santé et radiofréquences a financé 27 projets pour un total de 3 millions d'euros.

- Depuis 2011, l'appel à projets de recherche de l'Anses a repris le principe de financement de projets sélectionnés par un comité scientifique. Entre 2011 et 2016, 9 millions d'euros ont été affectés à 45 projets. Depuis 2019, le mode de financement a évolué avec l'inscription au programme 181 du ministère de l'Environnement de 2 millions d'euros par an pour la recherche sur les radiofréquences.

Les appels à projets de recherche ont pour objectif de financer des projets relativement longs (3 ans) qui impliquent en moyenne 3 équipes et dont le plafond a été doublé pour atteindre 400 000 euros. Ces projets nécessitent des collaborations fortes, par exemple entre biologistes et physiciens, le but étant de :

- Renforcer les liens entre la recherche et l'expertise.

- Aider à structurer et renforcer une communauté de recherche relativement petite. Il y aurait une grande utilité à fédérer les équipes travaillant sur les aspects thérapeutiques et / ou toxiques et à renforcer les collaborations, par exemple en créant un centre où elles pourraient travailler ensemble. L'intégration de chercheurs chargés des aspects thérapeutiques pourrait également permettre d'augmenter la confiance du public dans les messages qui sont délivrés.

Le premier grand rapport général sur les radiofréquences a été publié en 2009 puis mis à jour en 2013. Depuis 2003, les évaluations sont relativement cohérentes, avec un niveau de preuve en particulier sur les effets à long terme sur le cancer comparable à ce qu'a pu produire le CIRC en 2010, soit une classification en catégorie 2B. Ce qui traduit un effet possible de l'exposition au téléphone mobile sur la cancérogénicité à long terme. Cette évaluation a été précisée en 2013 par un effet possible de l'usage du téléphone mobile sur les risques de cancer, en particulier les gliomes, pour la catégorie des plus gros utilisateurs.

Il en a découlé des recommandations en matière de limitation des expositions, qui ont été précisées en 2016 dans le cadre d'un travail spécifique sur les radiofréquences et les enfants, lequel mettait en évidence, en complément des risques de cancer, des effets possibles en matière de perturbation cognitive. Les recommandations ont été renforcées à destination des enfants, incitant à une utilisation la plus faible possible pour ceux-ci jusqu'à 6 ans et à un usage raisonné pour les adolescents.

Des travaux spécifiques ont également été menés sur la compatibilité électromagnétique des dispositifs médicaux, qui sont de plus en plus exposés à des sources de radiofréquences. En particulier, des recommandations ont été émises pour que les risques spécifiques soient évalués dans chaque hôpital, afin de définir des zones où l'usage du téléphone mobile devrait être potentiellement exclu.

Plus récemment, l'Anses s'est penchée sur le compteur Linky et sur l'électro-hypersensibilité, à propos de laquelle elle a émis des recommandations en matière de prise en charge des personnes se déclarant touchées. Et ce, même s'il est aujourd'hui impossible de faire le lien direct entre l'exposition aux ondes

électromagnétiques et les symptômes.

De gros efforts ont été déployés pour tenter d'identifier des paramètres physiologiques affectés chez les personnes hypersensibles exposées aux champs magnétiques. Des progrès ont été accomplis pour respecter au mieux la sensibilité des personnes électro-sensibles. Cependant, les paramètres physiologiques demeurent toujours difficiles à identifier. De la même manière, la relation de cause à effet avec l'exposition est toujours difficile à démontrer. Il est cependant important de poursuivre les consultations et de former et informer, pour prendre en charge les personnes électro-sensibles, tenter de les comprendre et les aider au maximum (pour l'ensemble de ces travaux, voir Anses, 2020).

### **La question du développement de la téléphonie mobile et de la couverture 4G et maintenant 5G se pose également de façon cruciale pour les élus.**

Cette question est apparue dans les années 2003-2004, avec les premiers programmes de résorption des zones blanches en centre-bourg. Tandis que les élus des grandes villes commençaient à développer des chartes de bonnes pratiques avec les opérateurs, une autre partie des élus était demandeuse d'une augmentation de la couverture. Ceci a d'ailleurs conduit dès 2004 à l'élaboration, à la demande des opérateurs, d'un guide des bonnes pratiques destiné à assurer une forme d'équité à l'échelle du territoire. La loi Abeille (2015) a fixé la règle en permettant au maire d'être averti des dispositifs existants sur le territoire de sa commune et en mettant en place un dossier d'information au maire (DIM) pour établir la concertation. Il convient toutefois de rappeler que la décision d'urbanisme ne relève pas forcément des mairies et que le maire n'est pas nécessairement celui qui détient la décision in fine. En parallèle, les habitants de la commune ont la possibilité de faire réaliser des études gratuitement lorsqu'ils ont le sentiment de ne pas disposer des informations nécessaires, les mesures étant récapitulées sur le site de l'ANFR<sup>75</sup>. Notons que le Comité de dialogue de l'ANFR n'a été activé que fin 2018.

Le sujet est revenu récemment dans l'actualité avec le plan « France mobile » ou « New Deal Mobile », à savoir l'accord passé entre le Gouvernement et les opérateurs pour améliorer la couverture du territoire. Le plan « France mobile » a conduit à vouloir accélérer le dispositif de déploiement. La loi Elan (2018) a permis de simplifier les démarches et d'accélérer le processus. Le point d'achoppement a tenu au maintien ou non du DIM auprès des mairies. Le Gouvernement a tranché en maintenant le DIM mais en ramenant le délai de 2 à 1 mois. D'autres échanges ont actuellement lieu et le protocole de coopération est en cours de finalisation. Le dernier point d'achoppement concerne les loyers.

Les associations d'élus sont associées à ce déploiement, qui est à la charge des opérateurs, en identifiant les points nécessitant une amélioration de leur couverture. Le délai de réalisation est de 12 à 24 mois. Les citoyens attendent de la couverture en téléphonie mobile qu'elle leur apporte d'autres services, en particulier l'accès aux données. Avant de s'installer dans une commune, les gens demandent désormais ce qu'il en est de la 4G et du très haut débit. La frustration des habitants s'accroît proportionnellement avec le fait que la 4G se rapproche sans être disponible et que le nombre de services augmente. Plus ils vivent éloignés des centres urbains, plus le réseau constitue un moyen essentiel d'accéder aux services. Le maire est souvent en première ligne pour traiter ces demandes, parfois contradictoires. La demande des élus porte en premier lieu sur les moyens de les aider à arbitrer ces situations difficiles :

- Ils souhaitent une information plus précise sur la nature même de l'exposition aux ondes.
- Ils sont très demandeurs d'informations de la part des opérateurs le plus en amont possible, afin de prévenir les contentieux ou les litiges.

---

<sup>75</sup> [www.cartoradio.fr](http://www.cartoradio.fr)

- Ils appellent de leurs vœux une cartographie de l'exposition pour la 4G sur le même modèle que celle qui existe pour le radon.

Il semblerait que le Gouvernement ait pris la mesure de la situation en activant fin 2018 le Comité de dialogue prévu dans la loi Abeille, par anticipation de l'arrivée de la 5G. Pour les collectivités, le passage à la 5G constituera un vrai tournant, en les rendant à leurs tours émettrices de fréquences radio, dans la perspective des villes ou villages intelligents. Les enjeux liés à la 5G sont ceux du développement du territoire, et ce quelle que soit la taille des collectivités. Les maires sont très demandeurs d'informations prioritaires sur cette nouvelle technologie et souhaitent l'implication très en amont des associations d'élus, pour éviter la situation actuelle dans laquelle les élus « prennent systématiquement le train en route ». L'installation de petites antennes appelle une réglementation particulière prenant en compte l'avis des collectivités. La directive européenne sur l'implantation dans l'espace public et le mobilier urbain rendra a priori toutefois très difficile la possibilité d'éviter le déploiement des réseaux.

### ***Références bibliographiques***

- ANFR (2020) : Étude de l'exposition du public aux ondes radioélectriques Simulation de l'évolution de l'exposition du public créée par la téléphonie mobile en zone urbaine très dense (Paris XIV). <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/rapport-paris14-v1.pdf>
- Anses (2005) : *Téléphonie mobile et santé*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2004et4856Ra.pdf>
- Anses (2016) : *Exposition aux radiofréquences et santé des enfants*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2012SA0091Ra.pdf>
- Anses (2020) : *Radiofréquences, téléphonie mobile et technologies sans fil*. <https://www.anses.fr/fr/content/radiofréquences-téléphonie-mobile-et-technologies-sans-fil>
- Loi n°2015-136 du 9 février 2015, dite loi Abeille, relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques.
- Loi ELAN 2018 : loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique.

## B. Impacts sur les attitudes physiques en poste de travail

### Quels risques en lien avec les pratiques professionnelles recourant au numérique ?

- Le terme de TMS (troubles musculo-squelettiques) est discutable alors qu'il s'agit d'atteintes de tendons et de syndromes canaux. Ces déterminants sont importants pour prévenir la survenue de ces maladies : c'est la raison pour laquelle ces dernières années, des programmes de promotion de la santé ont été mis en place, comprenant des approches combinées.
- Les termes de risques psychosociaux correspondent à certains facteurs identifiés depuis une trentaine d'années. Ils ont été caractérisés selon différents modèles et s'intègrent parfaitement dans le modèle multifactoriel des affections de santé mentale, mais aussi d'hyper-sollicitation.
- Dans les faits, plus on est exposé au travail sur ordinateur, moins on a de probabilité de développer un syndrome du canal carpien. Le problème n'est probablement pas dû à l'outil numérique lui-même, mais à la manière dont on l'utilise. Ces résultats ne sont pas anodins, car, d'abord provisoires, puis consolidés, ils ont abouti au fait de ne plus indemniser les personnes souffrant de ce syndrome, car il a semblé préférable de réfléchir en amont, en ne considérant pas l'outil lui-même comme un risque.
- C'est pour cela que lorsque l'on réfléchit au travail déporté ou au télétravail, il est toujours important d'avoir une vision globale, l'ergonomie ayant ainsi pu nous enseigner que les techniques numériques, si elles pouvaient apporter de nombreuses facilités de travail, pouvaient également accroître le risque d'isolement.
- Nous découvrons parallèlement le monde de la sécurisation des données, avec le RGPD (Règlement général de la protection des données) qui est devenu un véritable casse-tête pour de nombreuses unités de chercheurs, mais il faut savoir que les entreprises, elles, ont intégré ces questions depuis très longtemps, le piratage industriel étant un problème ancien.
- Parallèlement, force est de constater de nombreux incidents survenus en France concernant les questions de sécurisation des données de santé.
- Dans le domaine, la productivité et le productivisme sont deux choses différentes : en effet, le fait d'augmenter le second à tout prix n'a pas de sens, alors que celui d'augmenter la première a quelque chose de sain. La productivité signifie qu'on a certes plus de temps pour produire, mais aussi pour soi. On voit bien que nous avons depuis deux siècles gagné en productivité et probablement, aussi, en temps de travail personnel. Cependant, certaines personnes sont des exemples parfaits de la perte presque totale, à certains moments, du cadre de leur vie professionnelle, de la limite entre la vie personnelle et le monde du travail !
- Concernant les inégalités sociales face aux risques en santé, les risques « modernes » sont à la fois démocratiques et pourtant différenciés socialement : ce sont plutôt les classes populaires qui subissent davantage les nuisances que les classes très favorisées.

### Compte rendu du rapport de 2012 du Centre d'analyse stratégique et de la DGT sur les TIC

Le rapport de 2012 du Centre d'analyse stratégique et de la DGT consacré aux TIC (Technologies de l'informatique et de la communication) indique leur impact sur l'ensemble de l'organisation du travail, et l'analyse est assez globale sur la question du facteur organisationnel et humain. Parmi les recommandations, la réalisation de bilans réguliers et de l'analyse des évolutions dans les modes de travail figure en bonne place, mais il n'y a pas (ou peu) de données sur l'effectivité de cette recommandation.

#### *Impact physique des postures au poste de travail, notamment lors du télétravail*

En 2012 déjà, 99 % des cadres, 88 % des employés et 82 % des ouvriers utilisaient Internet. L'INRS préconise les bonnes pratiques suivantes :

- Pour réduire la contrainte musculo-squelettique, on peut alterner les tâches sur écran et le travail de bureau ou multiplier les pauses.
- Travailler toute la journée sur un écran n'est pas recommandé. Si cela s'avère impossible, il est alors impératif de respecter un régime de pauses qui doit être établi en fonction de l'intensité du travail.
- Aménager une pause d'au moins 5 minutes toutes les heures si la tâche est intensive ou bien d'un quart d'heure toutes les 2 heures si la tâche l'est moins. Il faut bouger pendant les pauses. Attention, il est à noter que les temps d'attente de réponses qui imposent la surveillance de l'écran ne sont pas des pauses !
- Pour la vision, il est recommandé de quitter des yeux l'écran pour regarder au loin de temps en temps (environ toutes les 20 minutes), ce simple geste constituant une pause visuelle qui permet de relâcher l'accommodation.

### ***Impact relatif aux risques psycho-sociaux***

L'impact en termes postural et physique n'est qu'une partie des aspects. L'INRS la traite sous l'angle du « travail sous écran »<sup>76</sup>, avec trois points de vigilance principaux que sont : la fatigue visuelle, les TMS, mais aussi le stress, avec un impact relatif aux risques psychosociaux.

- On observe également ce phénomène lorsqu'il s'agit de réfléchir à la limite entre la vie personnelle et la vie au travail qui représente un point très important dans les cultures occidentales, mais aussi dans les cultures asiatiques : on s'intéresse ainsi de plus en plus au fait que l'augmentation du temps de travail, dès 50 heures voire 55 heures par semaine, présenterait un risque de maladies cardiovasculaires graves, comme les accidents vasculaires voire les infarctus.
- Citons à l'inverse plusieurs effets positifs en termes de prévention : grâce à ces techniques, on a pu favoriser des maintiens dans l'emploi, mais aussi des préventions de la désinsertion. Il est aussi maintenant possible de permettre à des patients, y compris très fortement handicapés comme des personnes paraplégiques, de reprendre un travail et de diminuer ainsi le poids de leur handicap au plan professionnel.

---

<sup>76</sup> <https://www.inrs.fr/risques/travail-ecran/prevention-risques.html>

## C.Impacts sur l'hypersédentarité

### **Exposome numérique, sédentarité, hypersédentarité et déficit d'activité physique**

*L'exposome* est un terme nouveau qui désigne l'intégration de l'ensemble des expositions nocives environnementales, comportementales et professionnelles auquel est soumis un être humain tout au long de son existence. Autrement dit, l'exposome est un concept correspondant à la totalité des expositions à des facteurs environnementaux (c'est-à-dire non génétiques) que subit un organisme humain de sa conception à sa fin de vie, débutant dès le développement *in utero*, et complétant l'effet du génome.

#### *Qualifier et mesurer la sédentarité et la réduction d'activité physique*

Il faut distinguer déficit d'activité physique et sédentarité. Les études utilisent fréquemment deux indices que sont SB (*Sedentary Behaviour*) et PA (*Physical Activity*).

*L'activité physique* correspond à tous les mouvements de notre corps produits par la contraction des muscles et qui entraînent une dépense en énergie supérieure à celle du repos. Elle peut être effectuée dans le cadre du travail, des transports, des activités domestiques (à l'intérieur et à l'extérieur de chez soi) et des loisirs (incluant le sport et les exercices physiques réalisés sans encadrement). Le sport est une activité physique où les participants adhèrent à un ensemble commun de règles et où un objectif de performance est défini (par exemple : sports collectifs, gymnastique, gymnastique aquatique, course à pied, marche nordique, cyclisme, ski de fond, aviron, natation).

*La sédentarité* correspond aux situations passées en position assise ou allongée (en dehors de la période de sommeil et de repas), dans lesquelles les mouvements du corps sont réduits à leur minimum : regarder la télévision, travailler sur un ordinateur, jouer aux jeux vidéo, lire, téléphoner, être passager dans un véhicule, etc.

L'impact au niveau de l'individu dans son ensemble peut se produire également sur le plan psychosomatique.

#### ***Sédentarité, hypersédentarité et déficit d'activité physique : des effets néfastes sur la santé reconnus par tous***

L'OMS a mis l'accent depuis longtemps (2002) sur le lien entre sédentarité et pathologie, et estime aujourd'hui la prévalence à 31 % des adultes en manque d'activité physique, et à 3,2 millions le nombre de personnes à mortalité induite. La part de la sédentarité au travail et dans les activités domestiques a été citée mais n'a pas été évaluée [les données ne sont pas citées dans les courtes notes de l'OMS]. Dans la résolution WHA66.10, les États membres de l'OMS ont convenu comme cible mondiale volontaire pour les maladies non transmissibles une réduction de 10 % de la sédentarité d'ici 2025.

Pour l'OMS<sup>77</sup>, la sédentarité est ainsi un des principaux facteurs de risque de morbidité, derrière le tabagisme, mais loin devant la pollution atmosphérique.

#### *Impact de l'hypersédentarité*

Le sujet activité physique/sédentarité a une implication « énergie dépensée » et une implication « je reste au même endroit » (et je vois donc moins de choses, moins de gens, etc.), ou autrement dit une implication « énergétique et musculaire » et une implication « relation et perception de l'environnement ».

L'aspect mobilité/énergie est plus facilement mesurable avec les outils de l'ergonomie. La réduction d'activité physique se situe à deux échelles : la réduction des déplacements du domicile vers d'autres lieux, consécutive au télétravail par exemple, mais aussi par d'autres causes, telle la réduction des mouvements au

---

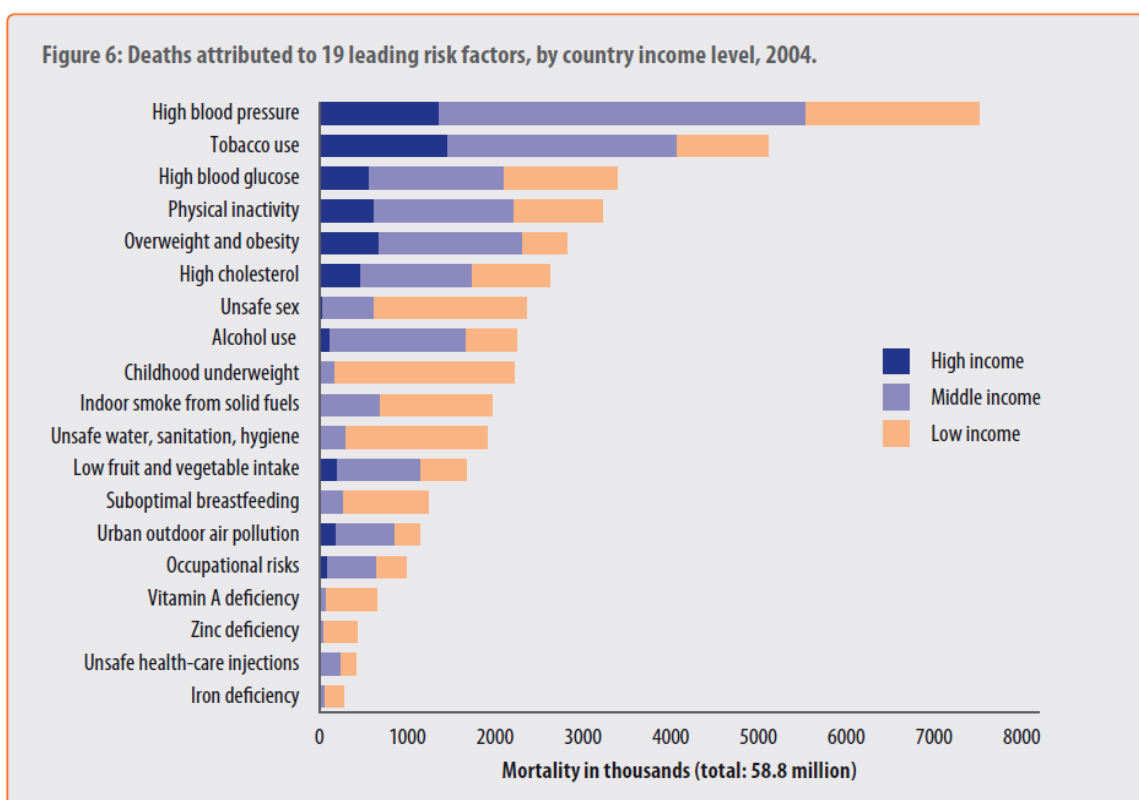
<sup>77</sup> Voir OMS 2009, Global Health Risks, Mortality and burden of disease attributable to selected major risks.

sein d'une pièce, avec le temps passé assis, et des mouvements réduits aux mains, plus spécifique du travail sur ordinateur.

L'enquête Esteban met aussi en lumière l'accroissement de la sédentarité, en particulier chez les jeunes, mais elle y associe explicitement le temps passé devant les écrans<sup>78</sup>. Cette enquête rend ainsi compte de niveaux d'activité physique encore faibles et d'une sédentarité élevée, chez les adultes et les enfants résidant en France métropolitaine en 2015, ainsi que d'une dégradation quasi générale de ces indicateurs depuis 2006.

Est-ce l'accentuation de ce déséquilibre que l'on peut qualifier d'« hypersédentarité », induisant des conséquences aggravées par rapport à la sédentarité ?

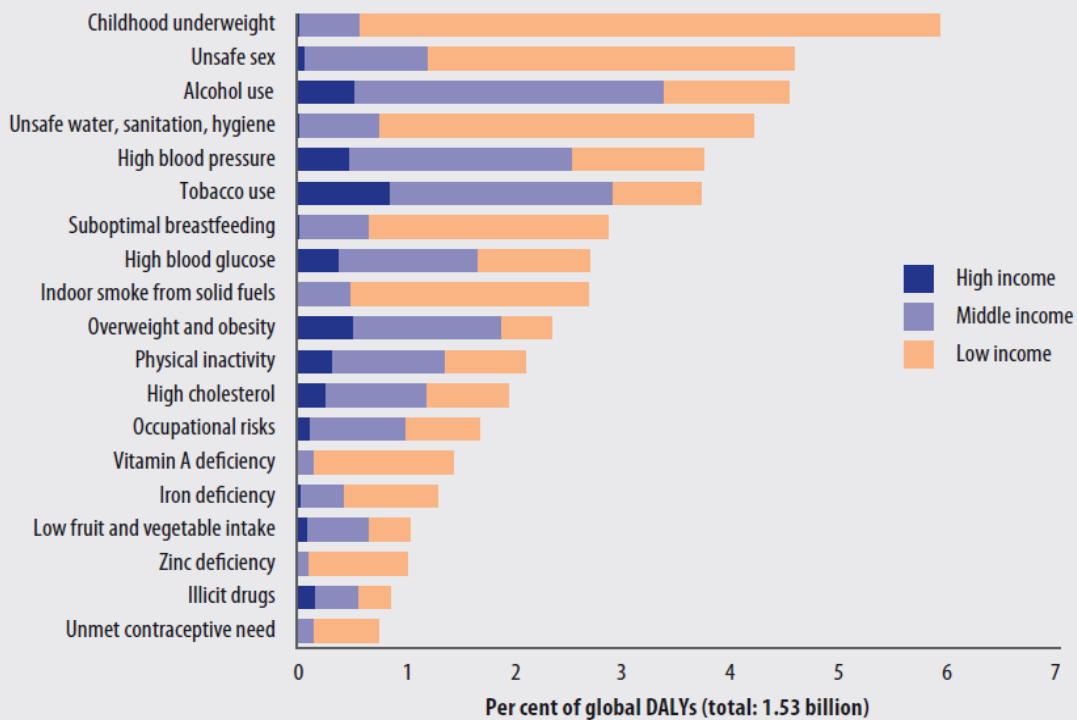
Les figures qui suivent sont tirées du document "Global Health Risks, Mortality and burden of disease attributable to selected major risks" :



<sup>78</sup> <https://www.santepubliquefrance.fr/etudes-et-enquetes/esteban>

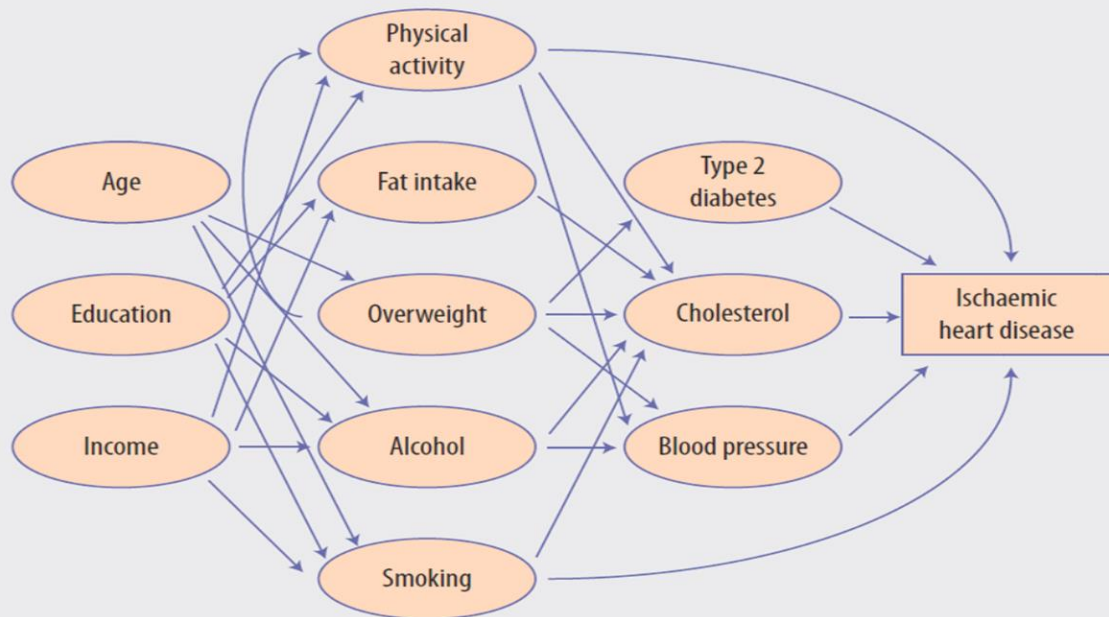


**Figure 7: Percentage of disability-adjusted life years (DALYs) attributed to 19 leading risk factors, by country income level, 2004.**



Les hiérarchies indiquées supposent toutefois des interprétations des interactions qui sont nombreuses, comme le montre le cas des pathologies ischémiques.

**Figure 1: The causal chain. Major causes of ischaemic heart disease are shown. Arrows indicate some (but not all) of the pathways by which these causes interact.**



Depuis 2015, l'Observatoire national de l'activité physique et de la sédentarité (<https://onaps.fr/>) a été mis en place. Il a été fondé sur les constats suivants relatifs au sujet : en 2008 une expertise collective de l'Inserm a porté sur « Activité physique : contextes et effets sur la santé ». Elle évoque des impacts sur de nombreuses maladies chroniques non transmissibles (maladies cardio-vasculaires, certains cancers, diabète, obésité, ostéoporose...<sup>79</sup>) ainsi que sur la santé psychique. L'inactivité physique est considérée aujourd'hui comme la première cause de mortalité évitable, devant le tabagisme<sup>80</sup>, vision qui doit être confrontée à celle de l'OMS. La sédentarité constitue par ailleurs un facteur de risque de mortalité et de morbidité<sup>81</sup>, et cela indépendamment du niveau d'activité physique.

Plus récemment, dans notre pays, Santé publique France a mis en garde contre la croissance de l'inactivité physique et de la sédentarité dans la population française<sup>82</sup>. Santé publique France souligne par ailleurs des inégalités associées, indiquant que les femmes sont les plus concernées. Les dernières données de l'étude Esteban<sup>83</sup> montrent que l'inactivité physique et la sédentarité gagnent du terrain dans la population française. En 10 ans, la proportion de femmes physiquement actives a baissé de 16 %. Un niveau de sédentarité élevé associé à un niveau d'activité physique bas augmente les risques de maladies non transmissibles. En France, en 2015, ce sont encore 22 % des femmes qui cumulent ces deux facteurs de risques contre 17 % des hommes, et seulement 53 % des femmes atteignent les recommandations de l'OMS en matière d'activité physique, contre 70 % des hommes. En 10 ans, la population féminine physiquement active a diminué de façon préoccupante de 16 %, une baisse particulièrement prononcée chez les femmes de 40-54 ans (-22 %).

Des analyses plus complètes sont nécessaires concernant la sédentarité et sa relation avec l'exposome numérique

L'exposome numérique contribuerait-il à l'inactivité physique et à la sédentarité, figurant parmi les principaux facteurs de risque de maladies auxquels nous sommes confrontés ?

L'exposome numérique est un facteur de sédentarité paraissant indéniable, mais il n'est certainement pas le seul. Ainsi Santé publique France cite le fait de : regarder la télévision, travailler sur un ordinateur, jouer aux jeux vidéo mais aussi lire, téléphoner, être passager dans un véhicule, etc. Déterminer la part de l'exposome numérique n'est donc pas un exercice aisé.

## Résumé

Compte tenu de leur impact considérable en matière de morbidité aiguë et surtout chronique, de la baisse d'activité physique et de la sédentarité, les résultats publiés par l'OMS et ceux faisant suite à l'enquête Esteban mettent en lumière la nécessité d'intervenir conjointement pour :

- 1) Augmenter le niveau d'activité physique de la population.
- 2) Limiter le temps passé dans des comportements sédentaires.

*Il est nécessaire d'agir sur ces deux facteurs indépendamment l'un de l'autre et de manière ciblée selon les besoins de chacun.* Une attention particulière doit être portée aux femmes et aux enfants, chez qui ces facteurs se sont dégradés de manière plus prononcée au cours de ces 10 dernières années, ainsi que sur la nécessaire réduction des inégalités sociales, toujours présentes en matière d'activité physique et plus encore de sédentarité, et de ce que certains qualifient d'« hypersédentarité ».

***En termes de prévention, la démarche du CPP est la suivante :***

---

<sup>79</sup> Ces maladies sont multifactorielles. On notera d'ailleurs un début de polémique quant à la part des perturbateurs endocriniens sur l'obésité.

<sup>80</sup> Pen *et al.*, 2012 cité par l'Onaps.

<sup>81</sup> Katzmarzyk *et al.*, 2009 ; Pate *et al.*, 2008 ; Owen *et al.*, 2010 ; Tremblay, 2012, *Sedentary Behaviour Research Network*, 2012, autant de travaux cités par l'Onaps.

<sup>82</sup> <https://www.santepubliquefrance.fr/les-actualites/2017/bouger-plus-une-necessite-pour-les-francais>

<sup>83</sup> Esteban est l'Étude de Santé sur l'Environnement, la Biosurveillance, l'Activité physique et la Nutrition. Elle a été menée d'avril 2014 à mars 2016, en France métropolitaine, sur un échantillon national représentatif de 2 678 adultes et 1 182 enfants de 6 à 17 ans.

On peut parler de **prévention** pour décrire la façon de réduire les facteurs organisationnels et structurels conduisant à la sédentarité et à l'insuffisance d'activité physique.

Beaucoup d'études et de recommandations portent sur ce que l'on pourrait appeler la **mitigation**, c'est-à-dire la réintroduction d'activités physiques pour contrebalancer une sédentarité forcée (par exemple le travail de bureau sur ordinateur). Des préconisations et des tutoriels numériques ont été conçus à cet effet et ils ont été mis en avant pendant la période de confinement liée à la Covid-19.

Là aussi l'effectivité de la mise en œuvre semble imparfaite. Elle est en tout cas loin, en termes de prise de conscience et de pratique, de celle vis-à-vis par exemple des risques chimiques au poste de travail. Il semble que le développement des écrans tactiles, dont la généralisation peut être considérée comme probable, doive conduire à des recommandations plus spécifiques.

Par ailleurs, le risque de « surcharge » a été pris en compte dans la Loi n°2016-1088 du 8 août 2016 relative au travail, à la modernisation du dialogue social et à la sécurisation des parcours professionnels qui introduit le *droit à la déconnexion*.

## D. Numérique et addiction : le cas des jeux en ligne

Ce chapitre est présenté autour de deux thématiques, deux domaines ludiques différents que sont, d'une part les jeux d'argent en ligne et d'autre part les jeux vidéo, en abordant conjointement la question de la relation pathologique qu'est l'addiction.

### État des lieux

- D'un point de vue scientifique et médical, les addictions sont des maladies cérébrales définies par une dépendance à une substance ou une activité, avec des conséquences délétères. Cette notion est largement validée pour ce qui est des addictions classiques, à savoir celles aux substances chimiques ; petit à petit, elle s'est élargie aux addictions comportementales, qu'il s'agisse des jeux d'argent ou des jeux vidéo.
- Le numérique est en très forte progression, puisqu'il représente 11 à 12 % de la part de marché des jeux d'argent.
- Il s'avère que dans ce champ scientifique, la langue anglaise est plus puissante, notamment pour ce qui est de la distinction entre deux concepts très différents que sont le « *gambling* » et le « *gaming* », le premier correspondant exactement à ce que nous appelons en France les jeux d'argent et de hasard, le second à l'action de jouer, simplement.
- Le cadre légal des jeux d'argent, en France, a profondément évolué en 2010 ; il faut savoir que la loi définit un principe général de prohibition, mais qu'elle affirme dans le même temps qu'il ne s'agit pas d'un commerce ordinaire, raison pour laquelle des dérogations sont applicables : ainsi, jusqu'en 2010, les jeux sur Internet étaient prohibés. Par la suite, quasiment tous les jeux vont être légalisés, sauf celui des machines à sous en ligne pour lesquelles nous n'avons actuellement pas d'offre légale.
- Le domaine du « terrestre » représente encore 89 % du chiffre d'affaires des jeux d'argent, le numérique 11 %, la loterie 42 %, les jeux de casino, les paris hippiques et les paris sportifs seulement 10 %, même s'il s'agit du secteur qui connaît la plus forte progression ces 5 ou 10 dernières années.
- La dépense moyenne des Français continue de progresser, malgré la crise, la part du numérique étant ainsi passée de 0 % en 2010 à 11-12 %, avec une progression annuelle de 1 ou 2 %.
- Les données sont tirées du *Baromètre Santé* qui est une grande enquête de santé publique. Celles-ci sont établies sur des échantillons représentatifs de Français auxquels on pose différentes questions ; ce qui est important, dans ce type d'enquête, est en fait le suivi de tendances.
- La part des pratiques sur Internet concerne principalement les paris sportifs et le poker.
- Ce sont de 2 à 3 millions de Français qui pratiquent ces jeux d'argent sur Internet.
- De nombreux travaux, notamment anglo-saxons, ont montré que le jeu en ligne attire un profil de joueurs assez particulier, en général plus masculin, plus jeune et de milieux culturels et sociaux plus élevés.
- *In fine*, un joueur en ligne aura quatre fois plus de risques d'être classé dans la catégorie des joueurs problématiques qu'un joueur traditionnel.
- Concernant les jeux vidéo, en 2018, le chiffre d'affaires de ce secteur s'élevait à 4,9 milliards d'euros, soit la moitié du chiffre d'affaires des jeux d'argent. Cette pratique concerne 74 % des Français, selon l'enquête menée par le S.E.L.L. (Syndicat des éditeurs de logiciels de loisir). Enfin, le support mobile devient prépondérant.

- Une enquête comprenant, au départ, 25 000 internautes, a révélé que 58,5 % jouent au type de jeux appartenant à la catégorie des « *Free-to-Play* » comme *Angry Birds* qui a atteint un milliard de téléchargements dans le monde au mois d'avril 2019. 10 % de ces joueurs vont devenir des joueurs « *Pay-to-Win* », qui engageront donc une dépense pour mieux progresser dans le jeu. Cette enquête ne porte pas sur les jeunes, car, comme on le sait, il est très difficile en France d'enquêter sur ces derniers.
- Un tiers environ des joueurs de « *Pay-to-Win* » estiment que ces jeux vidéo les ont conduits progressivement à jouer à des jeux d'argent et de hasard.

## Pathologie

- Comment évalue-t-on la pathologie dans le domaine ? Trois grands outils standards internationaux mesurent l'addiction, pour la plupart issus de la nomenclature de la psychiatrie américaine, lesquels ont ensuite été transposés sur les jeux d'argent. L'indice canadien du jeu excessif ou ICJE, semble être le plus puissant au niveau épidémiologique et mesure bien la prévalence. Les jeux d'argent ne génèrent, à 95 %, aucun problème, mais 5 % des joueurs, soit 1,2 million de personnes en France, vont rencontrer des difficultés. Globalement, nous pouvons conclure que *le risque sur le jeu en ligne est beaucoup plus élevé que celui sur les jeux traditionnels*. Nous pouvons tirer comme conclusion que *certains jeux sont beaucoup plus addictogènes que d'autres*.
- Les données, là encore, sont tirées du *Baromètre Santé*.
- Le problème de la pathologie, dans le domaine des jeux vidéo, est qu'il n'existe pas encore de consensus. Malgré l'absence de consensus, on peut quand même constater une autocensure assez forte sur ces sujets, notamment en France. Par ailleurs, si l'on considère les quelques dizaines d'études épidémiologiques existant sur le sujet, on constate que la prévalence de ce trouble peut varier de 0,7 % à 15,6 % ; véritablement rien ne justifie une telle différence, qui semble suspecte !
- Une enquête récente vient d'être publiée par l'*Observatoire français des drogues et des toxicomanies* ; elle établit des indications intéressantes sur la prégnance des écrans, 57 % des jeunes de 17 ans ayant ainsi passé au moins quatre heures par jour devant un écran, et 39 % au moins six heures. Dans cette enquête, une vingtaine de questions ont été posées sur les problèmes pouvant être liés à la pratique de ces jeux « *Pay-to-Win* » : ce sont essentiellement trois types de problèmes qui sont déclarés. Pour deux-tiers des « *Pay-to-Win* », les questions de gestion du temps sont essentielles. Pour un tiers, ce seront des problèmes relationnels qui seront mentionnés et, pour environ 1 joueur sur 5, des problèmes financiers.
- L'essentiel des pratiques se fait bien sur l'offre légale, mais elle n'est pas exclusive, comme le montre la pratique, illégale pour le coup, sur le poker. On constate également le développement de nouveaux supports de jeux plus mobiles, développement qui représente une inquiétude pour la santé publique.
- La jeunesse et la précarité sont des facteurs d'exposition à ces difficultés.
- Est-ce que l'addiction à des pratiques de jeux relève physiologiquement des mêmes mécanismes qu'une addiction chimique liée au tabac, à l'alcool ou à la drogue ? Globalement oui, dans la mesure où ces pratiques font fonctionner les mêmes mécanismes basés sur la sérotonine et la dopamine, même si la recherche distingue de plus en plus un découplage entre ces deux médiateurs. En France, on compte 500 centres de soins spécialisés sur les addictions aux substances, mais aussi sur les addictions comportementales.

## E. Recommandations relatives à la partie III

Concernant les agents physiques liés à l'usage du numérique

En ce qui concerne lumière bleue et écrans

***En termes de prévention, le CPP recommande :***

- *Une meilleure gestion des temps d'exposition*

Selon une étude de Harvard comparant 6,5 heures d'exposition à la lumière bleue à la même exposition de lumière verte, la lumière bleue supprime la mélatonine. Cela signifie que les gens mettent plus de temps à s'endormir et à rester endormis après avoir été exposés à la lumière bleue. En effet : 1) la lumière bleue stimule l'attention ; 2) elle stimule les temps de réaction ; 3) elle stimule le comportement pendant la journée. Ainsi il est recommandé d'éviter les écrans pendant environ une heure ou deux avant le coucher.

Les désagréments dont souffrent parfois les personnes qui travaillent sur écran sont surtout liés à une fatigue visuelle, du fait que le regard reste fixé sur l'écran et que les yeux convergent. Pour éviter cela, il est conseillé de faire des pauses de 5 minutes toutes les heures

- *La limitation de la composante bleue émise par les écrans*

Il est possible d'atténuer la composante bleue de la lumière des écrans soit directement, soit indirectement. Cette modification du spectre est prévue pour les écrans vendus actuellement ou bien certaines applications gratuites le proposent. L'écran prend une couleur jaunâtre avec un rendu affecté des couleurs. Bien que cela puisse poser problème pour certaines utilisations comme la photographie, la composante bleue est fortement atténuée.

Les preuves obtenues à partir de différents modèles expérimentaux indiquent que l'exposition à la lumière bleue dans la bande 470–490 nm est moins dommageable pour l'œil que la lumière bleue dans la bande 400–460 nm. En conséquence, le développement de LED avec un pic d'émission dans la bande 470 à 490 nm pourrait représenter une avancée importante dans la sécurité des LED pour la santé oculaire (*Ferguson et al.*, 2008). Cependant un enrichissement dans la bande centrée sur 480 nm aura un effet sur le sommeil.

Il est aussi possible d'utiliser des filtres anti-lumière bleue pour les écrans. D'après la communication d'un fabricant d'écrans, en déplaçant le pic de 450 nm à 460 nm, on réduirait la quantité de lumière bleue « nocive » (en dessous de 450 nm) de 90 %, sans déformer trop les couleurs. Cependant, comme précédemment, les troubles du sommeil ne seront pas atténués par ces écrans, car le pic d'émission se rapproche du maximum de sensibilité du cycle veille-sommeil.

***En termes de précaution, vis-à-vis de la lumière bleue, le CPP propose de :***

- Développer les recherches pour établir des protocoles thérapeutiques utilisant la lumière bleue pour le traitement de la dépression, l'insomnie, les migraines ou encore le trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité.
- Développer des recherches en rapport avec un usage de plus en plus fréquent des écrans dans nos sociétés, associé à une exposition quotidienne de plusieurs heures, et a fortiori pendant la nuit, l'effet majeur des écrans portant sur une désynchronisation de l'horloge circadienne. Cet effet peut de plus être induit chez le fœtus via le taux de mélatonine sérique de la mère avec un impact potentiel chez l'enfant.
- En pratique, pour limiter l'impact de la lumière bleue émise par les écrans, il conviendra de :

- Régler l'éclairage de l'écran d'ordinateur en diminuant la contribution de la lumière bleue.
- Respecter des pauses régulières devant l'écran d'ordinateur.
- Limiter l'exposition aux écrans des nouveau-nés et nourrissons (jusqu'à 2 ans).
- Limiter l'exposition à la lumière des écrans des téléphones mobiles, tablettes et ordinateurs quelques heures avant le coucher.

En ce qui concerne les ondes électromagnétiques, *en termes de prévention, le CPP recommande de :*

- Améliorer l'accessibilité d'une information compréhensible par le grand public en matière de données d'exposition du public aux champs électromagnétiques au niveau local, avec l'appui conjoint de l'ANFR.
- Développer la communication vers le public sur l'exposition aux ondes Wifi et aux compteurs connectés, sujet qui génère de l'inquiétude par manque de compréhension de la nature et de l'étendue des expositions.
- Élaborer des guides de bonnes pratiques médicales sur l'électro-sensibilité à destination des médecins.
- Communiquer davantage auprès du public, des bailleurs sociaux, des maires et des associations de parents d'élèves sur les possibilités de faire réaliser des mesures représentatives des champs électromagnétiques, en particulier d'extrêmement basse fréquence, au droit des ouvrages de transport d'électricité par le biais d'un laboratoire accrédité.
- Construire un cadastre électromagnétique : avoir une meilleure connaissance de l'exposition existante (4G), notamment pour les populations sensibles, afin d'avoir une cartographie complète de l'exposition.
- Lancer une campagne de publicité sur la possibilité de faire réaliser des mesures pour les particuliers.

Attitudes physiques en poste de travail

*En termes de prévention, concernant les TMS, l'INRS préconise des bonnes pratiques que reprend le CPP :*

- Pour réduire la contrainte musculo-squelettique, on peut alterner les tâches sur écran et le travail de bureau ou multiplier les pauses.
- Travailler toute la journée sur un écran n'est pas recommandé. Si cela s'avère impossible, il est alors impératif de respecter un régime de pauses qui doit être fonction de l'intensité du travail.
- Aménager une pause d'au moins 5 min toutes les heures si la tâche est intensive ou bien d'un quart d'heure toutes les 2 heures si la tâche l'est moins. Il faut bouger pendant les pauses. Comme cela a été indiqué, il est rappelé que les temps d'attente de réponses qui imposent la surveillance de l'écran ne sont pas des pauses !
- Pour la vision, quitter des yeux l'écran pour regarder au loin de temps en temps (environ toutes les 20 minutes) constitue une pause visuelle qui permet de relâcher l'accommodation.

L'impact en termes postural et physique n'est qu'une partie des aspects. L'INRS le traite sous l'angle du « travail sous écran »<sup>84</sup>, avec trois points de vigilance principaux que sont : la fatigue visuelle, les TMS, mais aussi le stress, avec un impact relatif aux risques psychosociaux.

- Ainsi dès lors que l'on s'intéresse aux troubles liés à l'attitude en poste de travail, et pour être efficace, il s'agira de mettre en place *une prévention globale et intégrée à la fois*. On essaiera de développer à ce titre des méthodes dites de « *double health* », en tenant compte de facteurs personnels tout autant que socioprofessionnels, avec le risque d'isolement.
- Comme nous l'avons également noté (cf. p. 107), *plusieurs effets positifs* en termes de prévention existent comme des maintiens dans l'emploi, mais aussi des préventions de la désinsertion. Il est aussi possible maintenant de permettre à des patients, y compris très fortement handicapés comme des personnes paraplégiques, de reprendre un travail et de diminuer ainsi le poids de leur handicap au plan professionnel.
- Enfin, il ne faut pas forcément considérer le terme de productivité de manière négative, mais comme le fait de se donner du temps pour soi, y compris du temps « à perdre », ce temps perdu étant important pour que les gens disposent de bonnes qualités de vie au travail.

***Concernant l'hypersédentarité, en termes de prévention, la démarche du CPP est la suivante :***

On peut parler de prévention pour décrire la façon de réduire les facteurs organisationnels et structurels conduisant à la sédentarité et à l'insuffisance d'activité physique.

Beaucoup d'études et de recommandations portent comme nous l'avons affirmé sur ce que l'on pourrait appeler la mitigation, c'est-à-dire la réintroduction d'activités physiques pour contrebalancer une sédentarité forcée. Là aussi l'effectivité de la mise en œuvre semble imparfaite.

***En termes de précaution, le CPP recommande*** que des études soient ciblées sur la contribution de l'exposome numérique à la baisse d'activité physique et à la sédentarité constatées et, semble-t-il, en accroissement dans la population.

Ce domaine demande à être exploré dans trois directions :

1. Quels types d'activité/non-activité sont générateurs de sédentarité ?

- Par exemple, dans le document OMS, la part de la sédentarité au travail et dans les activités domestiques a été citée mais n'a pas été évaluée.
- Les facteurs de sédentarité sont listés, mais le numérique n'est pas particulièrement ciblé.
- La contribution des différents facteurs de sédentarité est à préciser.
- La notion d'hypersédentarité n'est pas mise en avant ; elle devra être définie.

2. Quelles sont les populations concernées ?

- Dans la littérature, on retrouve des études sur les jeunes et sur les personnes âgées, moins sur les adultes.

3. Quels sont les impacts négatifs sur la santé ?

- Les maladies chroniques type obésité, maladies cardiovasculaires, etc. sont souvent citées.
- La santé mentale est évoquée, notamment chez les jeunes et les personnes âgées.

---

<sup>84</sup> <https://www.inrs.fr/risques/travail-ecran/prevention-risques.html>



- En revanche, dans ce domaine, on n'aborde pas les aspects sociaux et relationnels, déficit qu'il sera nécessaire de combler.

Concernant numérique et addictions : le cas des jeux en ligne

***En termes de prévention relativement aux jeux en ligne, le CPP propose*** l'élaboration de mesures visant à mieux réguler les conditions de jeux, responsables d'addiction et de pertes financières incontrôlées, notamment chez les jeunes.

- Hormis pour le poker, force est de constater que les pratiques de jeu sur l'offre régulée sont plus sûres et génèrent moins de problèmes que sur l'offre non régulée.
- Le problème est que, dans le domaine des politiques publiques, le champ du « *gambling* », c'est-à-dire celui des jeux d'argent et de hasard, est fortement régulé, alors qu'on est absolument libre de faire tout ce que l'on veut dans celui des jeux vidéo ! Cette situation demandera donc à être modifiée.
- Deux dommages potentiels sont à craindre dans ces questions. D'abord, bien sûr, le fait de perdre de l'argent, mais aussi celui de perdre du temps : cette dernière question semble avoir été assez peu mise en relation avec l'étude de l'addiction, ce qui demandera des études complémentaires.
- Qu'en est-il des enfants ? Il n'a pas été possible de disposer du budget suffisant pour mener à bien les études souhaitées sur ce sujet. Quoiqu'il en soit, celui-ci n'étant absolument pas prioritaire au sein du ministère de la Santé, son degré de priorité devra être reconsidéré.
- Les comorbidités liées à des addictions au tabac et à l'alcool ont été explorées ; on pourrait le faire sur les troubles somatiques ou les tentatives de suicide. Les co-addictions ne peuvent en tout cas être analysées que dans une perspective dynamique, et, encore une fois, seules les cohortes peuvent offrir cette possibilité. Or, en France, nous ne disposons pas des budgets pour ce type d'études. L'inquiétude est légitime, sachant que, si nous avons sur les études des jeux d'argent posé les premières briques, il faudrait aller plus loin, en mesurant le coût social de ces questions. Il ne faut absolument pas oublier ce paramètre, puisqu'il faut savoir que le coût social engendré par les jeux d'argent est estimé à 10 milliards d'euros !
- Finalement, si l'on veut jouer sur l'offre régulée, il faudra ainsi s'inscrire, par exemple en déclarant son identité et en acceptant la présence de modérateurs de jeu, qu'il s'agirait toutefois de renforcer. Le numérique nous donne ainsi, de ce point de vue, des outils de suivi qui permettent de compenser le risque représenté pour la santé publique.

# IV. Apports du numérique dans les activités de soin

## A. Les techniques numériques en pratique médicale : la vie réduite à la santé ?

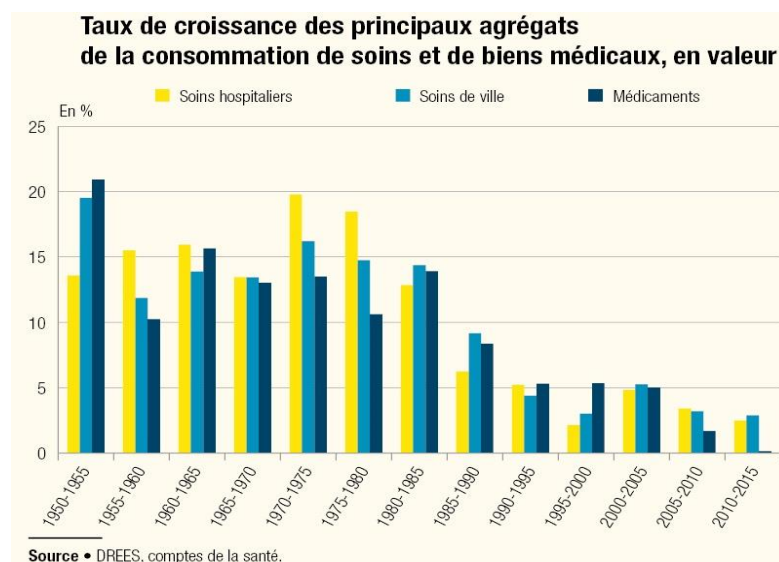
Dans sa définition d'une anthropologie de la santé, Didier Fassin soulignait que « la santé est une production sociale, car c'est la société qui définit ce qui relève de la santé ou plutôt qui donne une expression sanitaire à certaines réalités de préférence à d'autres », et discutait le fait que « la mesure de la santé est une objectivation de ce donné [du vivant] » (Fassin, 2000).

Le développement et la généralisation de la compétence médicale (« médecine fondée sur des données scientifiques probantes », ou *evidence-based medicine*) a constitué une première étape dans une forme de médicalisation, de bio-médicalisation plus exactement, de la société (Clarke *et al.*, 2003). L'accent mis sur la santé au niveau du risque et de la surveillance, la nature de plus en plus technoscientifique de la biomédecine, ainsi que l'évolution de la gestion et de l'utilisation de l'information médicale sont à la fois l'origine et la conséquence de cette bio-médicalisation.

L'intégration d'innovations technoscientifiques dans la médecine permet d'aborder des phénomènes et des interactions de plus en plus complexes, tant sur les plans scientifique et médical que sur le plan social. On attend des techniques du numérique, et de la soi-disant « intelligence » artificielle (IA), une extension considérable de ces capacités d'intégration. On en escompte évidemment un bien, un bien pour la santé, un bien pour l'humain donc. Mais c'est peut-être oublier ou minimiser la dimension politico-économique de cette biomédecine numérique, dont le culte de l'innovation et du progrès technique peut n'apparaître qu'un asservissement à un économisme qui, lui, n'a rien de « bio ». Rappelons que nombreux sont ceux qui affirment que la santé est un des champs des plus prometteurs de la « révolution digitale », ce qui, en retour justifie que l'impact du numérique dans le domaine de la santé est dès à présent très fort.

En soixante-cinq ans, la part de la consommation de soins et de biens médicaux (CSBM) dans la richesse nationale a été multipliée par 3,5, passant de 2,5 % du PIB en 1950 à 8,9 % en 2015 (Soual, 2017). On peut remarquer sur le graphique de la DREES que le taux de croissance de ces dépenses a été le plus important avant les années 1990, et donc avant la « révolution digitale ». Malgré cette croissance et la qualité reconnue de notre système de protection sociale, la France est loin d'être bien classée en Europe pour l'espérance de vie en bonne santé (64,4 ans chez les femmes et 62,6 chez les hommes en 2015) (Moisy, 2018).

### La santé réduite à l'efficience des systèmes de santé ?



Dans le contexte d'un foisonnement d'avancées technoscientifiques et techno-médicales, le développement massif des outils numériques et la multiplication des objets connectés est anticipé comme devant révolutionner notre système de soins. Comme s'il y avait une inéluctabilité de ces changements, comme si la technologie n'était que positive, ou au minimum neutre par rapport à son objet, comme s'il y avait un caractère objectif à la définition même de la santé ! Certes, nous disposons d'outils de plus en plus nombreux pour soigner efficacement, mais cette efficacité a

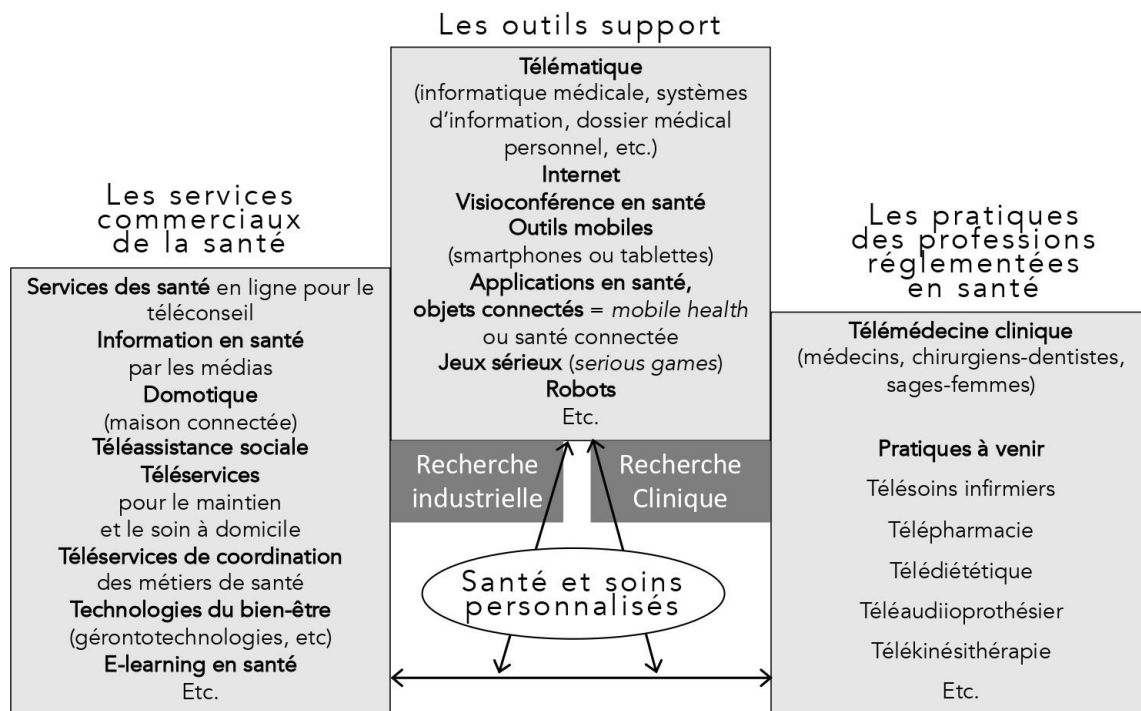
un coût, et un coût qui est croissant. La médecine deviendrait-elle dès lors une activité de luxe, la santé elle-même ne serait-elle pas un luxe, au sens financier, et non au sens biologique qu'évoquait Georges Canguilhem (« Être en bonne santé, c'est pouvoir tomber malade et s'en relever. C'est un luxe biologique ») ? Le numérique est présent dans tous les secteurs de la santé mais il y a au moins deux approches de la médecine qui sont interconnectées : *la médecine du diagnostic/pronostic/traitement et celle de la prévention/évaluation du risque ; en France la médecine penche plutôt du côté thérapeutique* tout en travaillant sur la prévention (cardiovasculaire, cancer...), alors que, dans les pays nordiques, c'est plutôt la prévention des pathologies qui est mise en avant. Le numérique n'est pas utilisé, on le constate, pour les mêmes finalités.

Dans le cadre d'une grille d'analyse économique qui n'a, elle non plus, aucune objectivité mais se trouve être déterminée par des choix de politique budgétaire, l'efficacité s'efface devant l'efficience, dans laquelle les ressources nécessaires sont déterminantes, et le seuil de rentabilité devient une donnée centrale. On peut donc légitimement s'interroger sur la justification d'une invasion du numérique en médecine et en santé : s'agit-il de développer une compétence médicale toujours plus grande ou de concevoir un système efficace de contrôle et de limitation des dépenses de santé ? Il est probable qu'au-delà des motivations réelles des décideurs du champ politico-économique, ces deux justifications opèrent à niveau comparable.

« [...] il faut se souvenir que le « sur-mesure » a un coût : le sur-mesure en santé, est, comme le sur-mesure dans la confection, réservé aux plus riches. Il place la société devant de nouveaux dilemmes éthiques, devant des choix politiques d'équilibre entre consumérisme et responsabilisation, entre choix individuels et nécessité d'assurer l'équité au sein de la population, le partage des risques financiers en matière de santé publique, par exemple. La santé est-elle un bien de consommation comme les autres ? Dans la mesure où les maîtres-mots en matière de santé sont devenus « économie », « maîtrise des dépenses », « concurrence », « rentabilité », la personne malade devient consommatrice de biens de santé, sans que le système de santé lui permette de devenir pleinement un « consommateur » (Gaudray, 2019).

### **Les nombres de la santé : au nom de quoi le numérique envahit-il la médecine ?**

Le terme générique de santé digitale – on parle d'*e-santé*, traduction directe du « *digital healthcare* » anglais –, désigne l'ensemble des processus de la numérisation du secteur de la santé. Il englobe la gestion hospitalière, l'utilisation/intégration de capteurs médicaux et le développement d'applications de santé et de suivi médical, dont le *dossier médical partagé* (DMP) n'est qu'un exemple. Dans les années 2000, un système a permis de remplacer le traditionnel film radiologique par une image numérique accessible en tout point d'un établissement de santé (hôpital, par exemple). De fait, la plupart des analyses quantitatives (examens biologiques et d'imagerie), sont des objets facilement numérisables, et constituent une masse considérable de données qui peuvent être tout aussi facilement transmises, et qui représentent de bons supports pour l'interprétation automatisée (*big data*, IA). Elles sont donc devenues une part centrale de l'activité médicale, allant même jusqu'à laisser penser que la médecine pourrait se résumer à cela. Mais ce serait oublier qu'il ne s'agit que d'outils...



Représentation graphique de l'e-santé (Safon, 2019).

### Internet dans la transformation des relations entre malades et soignants

L'accès facilité à Internet a contribué au fait que l'information n'est plus le privilège d'élites qui faisaient reposer sur elle tout ou partie de leur pouvoir. Elle est un droit revendiqué par tous au titre de la démocratie. Internet constitue, dans de nombreux pays, une source d'information sur la santé de plus en plus utilisée par les individus qui recherchent des renseignements. De nombreuses enquêtes montrent, internationalement, que de nombreux patients effectuent des recherches en ligne, à partir d'un problème médical particulier, sur les pathologies, les traitements, sur leurs impacts dans la vie quotidienne, mais aussi sur les ressources médicales ou les avis médicaux reçus, et les médecines dites alternatives. Cette évolution s'inscrit également dans le besoin de partager des expériences de vie, de vie malade en particulier. C'est donc « naturellement » que les médias sociaux, forums, blogues, Facebook ou Twitter, jouent un rôle de plus en plus important dans le partage d'informations et de conseils pratiques parallèles à ceux dispensés par les soignants et les acteurs de santé publique (Thoër, 2015). Mais une préoccupation importante, tant des utilisateurs de ces plateformes que des soignants et autres acteurs de santé, concerne la qualité des informations obtenues sur Internet. Reconnue comme très inégale et souvent médiocre, celle-ci souffre surtout du fait que l'analyse des informations recueillies n'est souvent pas soumise au filtre de la rigueur scientifique.

S'en suit une grande confusion entre abondance de données disponibles et information vraie et utile. En effet, il est paradoxal que plus la connaissance avance, plus le nombre d'informations théoriquement disponibles est important, plus il faut être en mesure de faire des tris, et donc d'évaluer pour soi-même la validité des faits scientifiques et donc des informations reçues. Sinon, l'abondance peut créer une illusion de savoir dont une conséquence peut être une certaine déstabilisation de la relation entre le patient et son médecin et la rupture d'un indispensable lien de confiance dans cette relation de soin. Christine Thoër pointe « la remise en cause de l'institution médico-scientifique qui résulte de l'action du mouvement des femmes, de ceux d'auto-santé et de la mobilisation des associations de malades. Ces acteurs contestent la « médicalisation du champ social » et la mainmise de la profession médicale sur la définition de la maladie et de sa prise en charge ».

### Exploitation des bases de données numériques de santé

Les données numériques de santé, relatives à la santé et aux prestations de soins de personnes physiques, sont d'origine multiple (par exemple, les données « en vie réelle » recueillies par la CNAM pour le remboursement des soins). La numérisation a facilité le recueil et le stockage de ces données, ainsi que leur

exploitation en grand nombre. Le développement de méthodes d'exploitation et d'algorithmes permet de proposer des usages nouveaux de ces données.

On n'aborde pas ici les exploitations individuelles (par exemple : *monitoring*, y compris pour des patients à domicile, téléconsultation d'experts de certaines maladies ou affections, médecine « de précision »), mais les exploitations de données « agrégées » (Polton, 2018).

Ainsi, les bases de données de l'assurance maladie (système national d'information inter-régimes d'assurance maladie) ont montré leur potentiel en matière de pharmaco-surveillance (Weil *et al.*, 2010) et sont régulièrement exploités à cette fin.

Ces données de santé agrégées sont utilisées aussi, ou utilisables, pour la surveillance sanitaire, l'analyse de l'efficacité des traitements « en vie réelle », la conformité des soins pratiqués aux recommandations, ou encore la production de connaissance scientifique.

Ces bases de données permettent d'envisager, par comparaison avec les données d'un patient (par des méthodes dites *big data* – données massives – ou des algorithmes d'« apprentissage profond »), de développer pour ce dernier des stratégies thérapeutiques personnalisées, voire préventives.

Ces usages font apparaître des risques : désintermédiation du médecin, au profit de plateformes de diagnostic/thérapeutiques ; privatisation de ces plateformes, accompagnée d'une opacité algorithmique – protégée par le secret industriel - ; mondialisation de plateformes privées, s'appropriant, au nom de l'*open data*, les bases de données nationales publiques ou captant de nouvelles données *via* des associations de patients ; développement d'un commerce de ces données vers l'industrie pharmaceutique, sans mentionner les risques de rupture de solidarité inhérents à toute approche favorisant une médecine prédictive.

À titre d'illustration, un accord conclu en juillet 2019 entre le gouvernement britannique et Amazon sur l'accès aux informations médicales détenues par le NHS, pour permettre à Amazon de développer une plateforme de conseils aux malades, a récemment fait débat au Royaume-Uni.

### **Données personnelles et *big data***

Autre question d'importance que celle des données personnelles. Nous sommes là dans une tension entre deux exigences : celle de la sécurité individuelle, mais aussi celle de la préservation de l'intimité. D'un point de vue collectif, on aimerait qu'un certain nombre de nos données soient utilisées par la science médicale pour faire des progrès, en tenant toutefois compte du risque de voir ces données être utilisées à mauvais escient. En effet, le fait d'anonymiser ne signifie pas seulement la possibilité d'enlever le nom d'une personne, mais bel et bien de rompre le lien entre la donnée *et* la personne qui est à l'origine de cette dernière. Il faudrait que nous puissions tirer parti de toutes ces informations pour faire des progrès, par exemple en détectant éventuellement des épidémies.

Ce n'est pas seulement la taille, véritablement vertigineuse, qui constitue les *big data*, car il faut bien comprendre que ces masses de données vont être acquises de façon continue : or, cette acquisition continue va être traitée sans échantillonnage, la recherche d'anomalies, autrement dit de signaux faibles, pouvant ainsi caractériser l'utilisation de l'intelligence artificielle. De la sorte, nous pourrions trouver des facteurs pathogènes sur de très grandes masses de données. Ces technologies pourraient donc être potentiellement très précieuses. Les questions de science ouverte demandent aussi à être posées, certaines des données utilisées pouvant être personnelles, alors que tel ou tel acteur pourrait, du coup, mieux profiter de ces dernières que ne serait à même de le faire tel ou tel autre acteur, comme des laboratoires scientifiques.

Ce n'est pas seulement la médecine qui est concernée par ces questions, mais aussi l'agriculture et l'environnement ainsi que l'inventaire de la biodiversité. Dans ces domaines, les objets connectés peuvent être très utiles, le numérique pouvant être utilisé pour pratiquer du « *crowdsourcing* » ou production participative pour recueillir des informations. Ces techniques permettent de disposer de grandes masses d'informations à un coût modique, mais aussi de sensibiliser la population à l'observation et éventuellement aux problèmes écologiques. Ajoutons les problématiques propres à la gestion des catastrophes ou encore celles relatives à l'étude de l'évolution du climat, mais aussi à la gestion de la consommation de l'énergie ou des incendies. Enfin, les questions d'éducation sont importantes, non seulement pour la société, mais

également pour l'environnement. De la sorte, l'intelligence artificielle offre un certain nombre d'opportunités si, bien sûr, elle est correctement utilisée.

L'une des questions posées par les techniques d'anonymisation est la suivante : faut-il une anonymisation totale pour un coût prohibitif et au risque de ne jamais pouvoir parvenir à la réaliser ou faut-il une anonymisation raisonnable, afin de ne pas pouvoir remonter jusqu'à la personne, et ceci dans un temps et des coûts eux-mêmes raisonnables ?

Il est urgent que nous trouvions des solutions à la fois techniques et juridiques pour bénéficier de l'apport de ces données, tout en préservant les personnes concernées.

Dans son avis n°124, le CCNE avait tenté de montrer que la notion de vie privée devait changer de manière fondamentale à cause de ces évolutions, raison pour laquelle il a été estimé qu'il *valait mieux retirer des données plutôt que d'essayer d'empêcher qu'elles n'entrent dans des systèmes.*

### **Dossier médical partagé, un exemple de partage ou une mutualisation des données personnelles ?**

Un des outils au service de la e-santé est la mise en place de dossiers médicaux informatisés et partagés (DMP), qui visent à la centralisation des informations (médicales) des personnes (pas seulement des patients) pour faciliter le partage de ces informations, et donc l'échange entre les différents acteurs de santé :

- Stockage de l'ensemble des informations concernant une personne en un seul point.
- Accès délocalisé (et partagé) à ces informations.
- Gestion et suivi de maladies aiguës et surtout chroniques grâce aux objets connectés.
- Réduction des coûts.

Dans l'exemple du DMP, dont la première ébauche est apparue en 2004 sous le nom de Dossier Médical Personnel devenu Dossier Médical Partagé en 2015, on voit que les frilosités, tant des usagers que des personnels de santé, en ont fait un objet de controverses. Alors que l'idée semblait plutôt pertinente, la technologie performante, l'intérêt médical pour la personne avéré et le marketing en faveur de son développement très prégnant, quatorze ans n'ont cependant pas été suffisants pour permettre sa généralisation. Est-ce seulement un problème pédagogique ?

« On dit souvent que la santé n'a pas de prix mais qu'elle a un coût, laissant penser qu'il convient de contrôler, de réguler ce coût. Il faut, à l'inverse, retourner la proposition en affirmant que la santé a un coût, certes, mais qu'elle n'a pas de prix, inférant que la valeur de la santé justifie le prix croissant que les progrès médicaux induisent » (*Gaudray, 2019*).

« L'histoire des techniques montre qu'il est rare qu'une innovation soit limitée à l'usage initial qui lui a été dévolu. Le dossier médical personnel n'est qu'une pièce dans un nouveau système de prise en charge qui comporte notamment la prescription informatisée. Le CCNE, tout en étant favorable à son appropriation progressive par les établissements de santé, a déjà eu l'occasion de souligner les dangers des dispositifs d'aide électronique à la prescription médicale. Il a noté, entre autres, le risque lié à la « triangulation » de la relation de soin par la présence de l'ordinateur qui s'intercale entre le médecin et son patient. La technicisation de la médecine peut de fait entrer en conflit avec la composante relationnelle et humaine nécessaire à une pratique clinique de qualité » (*CCNE, 2008*).

### **La télémédecine est-elle une réponse à l'existence de déserts médicaux ?**

Pour la DGOS (Direction générale de l'offre de soins), le « virage ambulatoire » se décline, en particulier, par la chirurgie ambulatoire, l'hospitalisation à domicile et la télémédecine, qui, à l'instar du maillage territorial des parcours et de la coopération professionnelle, sont étroitement dépendants du développement des outils du numérique.

« La télémédecine constitue [...] une voie nouvelle pour faciliter l'accès aux soins ; c'est pourquoi elle a vocation à s'installer comme une pratique régulière en France » indique un communiqué de presse de la Caisse nationale de l'Assurance Maladie en 2018. C'est en effet en septembre 2018 qu'a été mise en œuvre

la loi de financement de la sécurité sociale (LFSS) permettant d'inscrire la télémédecine dans le droit commun de l'Assurance Maladie et d'en favoriser la généralisation en l'intégrant dans le parcours de soin. Depuis, une quantité croissante de plateformes de téléconsultation ont été ouvertes partout en France par des professionnels de santé ou des opérateurs privés (organismes agréés). *L'ambition des autorités est d'atteindre 1,3 millions d'actes à distance en 2021. Dans ce cadre, l'assurance maladie espère réaliser 2,3 milliards d'euros d'économies*, en particulier grâce à un moindre recours aux transports sanitaires, voire à une diminution significative du nombre d'hospitalisations, évitées par une plus grande précocité du diagnostic. Pourtant, les actes médicaux principalement impactés par la télémédecine sont :

- Les réponses à des questions simples de santé.
- Le suivi de routine des maladies chroniques.
- Le renouvellement d'ordonnances.
- Le suivi médical en EHPAD.

Les quatre champs d'activité principaux de la télémédecine sont : 1) les échanges entre médecins et patients (téléconsultation), 2) les échanges de compétence entre professionnels de santé (télé-expertise), 3) la télésurveillance et 4) la téléassistance (soutien entre professionnels de santé).

Toutefois, la question des « déserts médicaux » n'est pas du même ordre que l'innovation technologique qui ouvre à la télémédecine. Il s'agit d'un « assèchement » de l'offre de soins sur un territoire, visible en particulier dans certaines régions défavorisées ou isolées géographiquement. La diminution du nombre des professionnels de santé ne leur permet plus de répondre à la demande de leurs patients, ni surtout d'accepter de nouveaux patients. Ce qui vaut pour la médecine généraliste est encore plus prégnant pour la médecine de spécialité. Il est peu probable que la télémédecine puisse être une réponse quantitativement satisfaisante à la pénurie de médecins, certes plus marquée dans les zones identifiées comme « déserts médicaux », mais néanmoins plus générale, au moins dans le cas de certaines spécialités (gériatrie, psychiatrie). De plus, Il serait bon de *connaître la relation entre la carte des déserts médicaux et celle de l'Internet, liée à celle des ordinateurs et utilisateurs qui ne sont peut-être pas majoritaires en raison de l'âge de la population médicale*. Quoi qu'il en soit, la télémédecine ne permet pas (encore ?) la prise en charge d'actes médicaux nécessitant la présence physique d'un personnel de santé ou un équipement spécifique.

### **Peut-on se contenter d'une logique binaire (bénéfice-risque, avantages-inconvénients) pour aborder la place croissante du numérique en santé ?**

« Il faut reconnaître que l'analyse coûts-bénéfices a souvent été utilisée comme une boîte noire qui, nourrie des données nécessaires, fournit un verdict « économique » ou « scientifique » sur la démarche à suivre. Cet usage s'avère particulièrement problématique pour les décisions relatives au risque, surtout lorsque l'incertitude est forte » (CPP, 2010, *La décision publique face à l'incertitude – Clarifier les règles, améliorer les outils*)<sup>85</sup>.

Le rapport du CESER Pays de la Loire de 2016 sur *Les technologies numériques au service de la santé* apporte, au terme d'une analyse sérieuse et minutieuse du sujet, la démonstration que l'engouement pour les techniques nouvelles conduit à présenter plus en détails les bénéfices et avantages que leur contrepartie négative. On rencontre le même biais sur le site Sophia, service d'accompagnement des malades chroniques de l'Assurance Maladie. Et ce constat n'est ni surprenant ni choquant, dans la mesure où l'analyse choisit de rester dans le champ de la technique, technique médicale notamment. Ainsi, les réserves qui sont mentionnées dans le rapport concernent d'une part la confidentialité des données et leur contrôle, et, d'autre part, la manière dont peuvent être prises en charge les modifications des conditions et de l'évaluation du travail des personnels de santé experts. De fait, *l'accessibilité du numérique dans la population n'est évoquée qu'en tant que problème transitoire, de nature économique-pratique*.

---

<sup>85</sup> <https://www.alerte-sante-environnement-deontologie.fr/cpp/les-rapports/article/la-decision-publique-face-a-l-incertitude-clarifier-les-regles-ameliorer-les>

Paul Tournier, médecin à Genève dans les années 1940, précisait en parlant d'une *médecine de la personne*, qu'il convenait de « [mettre] l'accent sur la prise de conscience de la personne dans son intégralité physique, psychique, spirituelle et sa dimension communautaire et sociale ». Georges Canguilhem, philosophe et médecin, allait dans le même sens en disant que « la prise en charge d'un malade ne relève pas de la même responsabilité que la lutte rationnelle contre les maladies ». Et que dire, au-delà de la « prise en charge », de l'accompagnement et de la dynamique du « *care* » !

Personne n'aurait l'idée ou l'envie de définir le médecin comme un outil de la médecine et de la santé. Ce constat permet d'envisager son action en termes de responsabilité. Ce n'est probablement pas à ce titre que le numérique prétend se substituer à l'humain dans l'activité médicale. Il prétend au contraire évacuer l'humain et son potentiel de défaillance, pour évaluer, tant au niveau du diagnostic que du traitement, des données obligatoirement objectives, sauf à considérer que la machine possède sa propre subjectivité.

Cynthia Fleury nous rappelle cependant qu'il n'existe pas d'antagonisme essentiel entre l'humanisme, l'humanité et la technique, pour autant que celle-ci reste sous contrôle car : « se mettre au service des humanités et de la santé, ce n'est pas s'inscrire contre la technique. Au contraire, c'est lui donner sa seule orientation viable, sa finalité. Les humanités sont technophiles par essence ; elles demeurent un grand plaidoyer pour la science, les machines, au sens même où celles-ci ont pour finalité d'émanciper l'homme et de l'aider à poursuivre sa sortie de l'état de minorité. Il faut revenir au rapport sur l'établissement d'un Conservatoire des Arts et Métiers, séance du 8 vendémiaire de l'an III de la République une et indivisible (29 septembre 1794). On y lit le refus de faire des arts mécaniques des arts qui ne seraient pas libéraux. Les machines sont au service de l'humain, et non l'inverse ; en invitant à la création d'un Conservatoire, ce rapport a refusé le leurre de l'évidence : celui de croire à la neutralité de la technique, à la neutralité des machines. Les machines sont conçues par les hommes, elles reproduisent leurs biais cognitifs et émotionnels. Plus on crée des machines, plus il faut renforcer la formation des hommes et « finaliser » la technique, afin que celle-ci maintienne l'homme dans son humanisme. »

## Résumé

- On attend des techniques du numérique, et de la soi-disant intelligence artificielle, une extension considérable des capacités d'intégration complexes des innovations technoscientifiques de la médecine.
- Rappelons que nombreux sont ceux qui affirment que la santé est un des champs les plus prometteurs de la « révolution digitale », ce qui, en retour justifie que l'impact du numérique dans le domaine de la santé est dès à présent très fort.

Dans le contexte d'un foisonnement d'avancées technoscientifiques et techno-médicales, le développement massif des outils numériques et la multiplication des objets connectés est anticipé comme devant révolutionner notre système de soins. Cette efficacité a pourtant un coût, et un coût qui est croissant. La médecine deviendrait-elle une activité de luxe, la santé elle-même ne serait-elle pas un luxe, au sens financier, et non au sens biologique qu'évoquait Georges Canguilhem (« Être en bonne santé, c'est pouvoir tomber malade et s'en relever. C'est un luxe biologique ») ?

- On peut donc légitimement s'interroger sur la justification d'une invasion du numérique en médecine et en santé : s'agit-il de développer une compétence médicale toujours plus efficace ou de concevoir un système efficace de contrôle et de limitation des dépenses de santé ? Il est probable qu'au-delà des motivations réelles des décideurs du champ politico-économique, ces deux justifications opèrent à un niveau comparable.
- La clinique humaine, elle, représente une expérience intime du corps, une relation de soin dans la durée, intégrant certes, mais, aussi, dépassant les seules données quantifiables.
- Si « la télémédecine constitue [...] une voie nouvelle pour faciliter l'accès aux soins ; c'est pourquoi elle a vocation à s'installer comme une pratique régulière en France » indique un communiqué de presse de la Caisse nationale de l'Assurance Maladie en 2018. Il est cependant à noter que :



- Les quatre types d'actes médicaux principalement impactés par la télémédecine sont : 1) les réponses à des questions simples de santé, 2) le suivi de routine des maladies chroniques, 3) le renouvellement d'ordonnances, et 4) le suivi médical en EHPAD,
- Les quatre champs d'activité principaux de la télémédecine sont : 1) les échanges entre médecins et patients (téléconsultation), 2) les échanges de compétence entre professionnels de santé (télé-expertise), 3) la télésurveillance, et 4) la téléassistance (soutien entre professionnels de santé).
- Il est peu probable que la télémédecine puisse être une réponse quantitativement satisfaisante à la pénurie de médecins, certes plus marquée dans les zones identifiées comme « déserts médicaux », mais aussi plus générale, au moins dans le cas de certaines spécialités (gériatrie, psychiatrie).
- Le numérique est présent dans tous les secteurs en santé, mais il y a au moins deux approches de la médecine qui sont interconnectées : 1) la médecine du diagnostic/pronostic/traitement, et 2) celle de la prévention/évaluation du risque. En France, la médecine penche plutôt du côté thérapeutique (« cure ») tout en travaillant sur la prévention, mais de manière ciblée (cardiovasculaire, cancer...), alors que dans les pays nordiques par exemple, c'est plutôt la prévention des maladies qui est mise en avant, en accompagnement des personnes tout au long de leur vie (« care »). Dans ce contexte, le numérique n'est pas utile aux mêmes finalités.
- La collecte de données numériques ou numérisables et l'utilisation d'objets connectés servent la conception d'un corps réduit aux seuls éléments que l'on peut mesurer, dont on dispose dans une temporalité qui est celle d'une relative immédiateté et qui induit donc une forme d'abstraction. *La clinique humaine, elle, représente une expérience intime du corps, une relation de soin dans la durée, intégrant, mais dépassant les seules données quantifiables.*

## Références bibliographiques

- *Les technologies numériques au service de la santé*, in Rapport du CESER Pays de la Loire du 23 février 2016.
- CCNE, Le « dossier médical personnel » et l'informatisation des données de santé, in Avis n°104, 2008.
- Clarke A. E., Shim J. K., Mamo L., Fosket J. R., Fishman J. R., Biomedicalization: Technoscientific Transformations of Health, Illness, and U.S. Biomedicine, in *American Sociological Review*, 2003;68:161-94.
- Fassin D., Entre politiques de la vie et politiques du vivant. Pour une anthropologie de la santé, in *Anthropologie et Sociétés*, 2000;24:95-116.
- Fleury C., *Le Soin est un humanisme*, Gallimard, coll. Tracts n°6, 2019.
- Gaudray P. Éthique et médecine de précision en oncologie, in *Innov. Ther. Oncol.*, 2016;2:81-6.
- Gaudray P. Quand la santé fait parler l'ADN... Les promesses et les enjeux éthiques d'une nouvelle révolution médicale, Symbiose Éditions, 2019.
- Livre blanc intitulé Contribution des outils numériques à la transformation des organisations de santé. Paroles d'acteurs, 2019.
- Moisy M. (DREES), Les Français vivent plus longtemps, mais leur espérance de vie en bonne santé reste stable, DREES, Études & résultats, n° 1046, 2018.
- OMS Europe : *Systèmes de santé numérique : ce que vous devez savoir*. Voir-> <http://www.euro.who.int/fr/health-topics/Health-systems/e-health/news/news/2019/2/what-you-need-to-know-about-digital-health-systems>
- Polton D. Les données de santé, in *Médecine/Sciences*, 2018;34:449-55.
- Safon M. O. *La e-santé Télésanté, santé numérique ou santé connectée*, Centre de documentation de l'Irdes, Bibliographie thématique, 2019.
- Soual H. (DREES), Les dépenses de santé depuis 1950. DREES, Études et Résultats, n°1017, juillet 2017.
- Thoër C., Internet : un facteur de transformation de la relation médecin-patient ?, in *Communiquer*, 2015. Voir-> <https://journals.openedition.org/communiquer/506>
- Weill A., Païta M., Tuppin P. et al., Benfluorex and valvular heart disease: a cohort study of a million people with diabetes mellitus, in *Pharmacoepidemiol Drug Saf*, 2010;19:1256-62.

## B. Intelligence artificielle et médecine

### Qu'est-ce que l'intelligence artificielle

On pense savoir ce qu'est l'intelligence artificielle, mais il faut insister sur le fait qu'il s'agit d'une discipline scientifique. En effet, il ne faut pas prendre le terme dans son sens littéral, en imaginant que les hommes pourraient tout d'un coup parvenir à créer une intelligence, mais comprendre quelles sont les vraies questions qui se posent. Autrement dit, il faut parvenir à ne pas seulement tenir compte d'une vision mythologique, comme si l'homme créait un golem qui est, comme l'on sait, une statue d'argile finissant par dépasser son créateur.

L'intelligence artificielle a été créée en 1956, au cours d'une école d'été organisée par deux jeunes chercheurs et parrainée par deux chercheurs plus confirmés, Nathaniel Rochester et Claude Shannon, l'homme de la théorie de l'information. Il ne s'agissait pas de produire une intelligence mais de la décomposer en fonctions ou facultés cognitives pouvant être simulées par une machine.

Depuis 60 ans, cette science a fait des progrès considérables, car ces facultés cognitives, une fois simulées, peuvent être utilisées dans des applications pratiques : le Web, inventé par le britannique Tim Berners-Lee, est ainsi le couplage des réseaux de télécommunication avec le concept d'hypertexte. C'est certainement la discipline scientifique qui a le plus transformé le monde du point de vue des échanges quotidiens.

L'intelligence artificielle constitue à la fois une menace et une opportunité, notamment pour les questions écologiques. Il faut rappeler que ce sont des ressources (en particulier des matériaux rares) qui sont massivement consommées. La consommation électrique est elle aussi considérable : les moteurs de recherche enregistrent ainsi 20 000 milliards de requêtes par jour ! Les grands acteurs de l'Internet passent d'ailleurs totalement sous silence ce problème.

Prenons l'exemple du Bitcoin qui se fonde sur une compétition entre acteurs, les preuves de calcul étant extrêmement consommatrices. Si on étendait le Bitcoin à une masse comme celle du dollar, cela reviendrait à une consommation annuelle équivalente à celle d'un pays comme la France, et bien sûr en pure perte.

Au plan matériel, il est donc nécessaire de rappeler que l'utilisation de toutes ces machines, en particulier en Afrique, implique un coût écologique terrifiant. Ces questions ne pourront quoi qu'il en soit que faire l'objet d'une réflexion.

Cette problématique a quand même des aspects positifs, notamment dans le domaine de la santé, le suivi des patients par le biais d'objets connectés pouvant être cité à cet égard. Certes, il ne faudrait pas que ce diagnostic automatique désresponsabilise les médecins ! Il n'est pas certain non plus que les assurances sociales n'aient pas la tentation de se doter de systèmes automatiques qui vérifieraient ce que pourraient prescrire les médecins, quitte à les mettre en cause.

### Intelligence artificielle et diagnostic

La part de l'IA en termes de diagnostic allant en s'accroissant, l'usage de cette nouvelle technologie est-elle susceptible de porter atteinte, à l'avenir, aux relations humaines qui doivent s'établir entre le médecin et le patient qu'il va accompagner ?

Cela irait à l'encontre d'un des objectifs actuels de santé publique affichés dans notre pays, à savoir le rétablissement d'une confiance entre patient et médecin, visant notamment à une meilleure efficacité de l'exercice médical, avec une amélioration du rapport coût (collectif, porté par l'assurance maladie) – bénéfice (pour chaque patient).

Au printemps 2018, il a été rapporté que *Watson*, la machine d'IA développée par IBM est parvenue, en dermatologie, à obtenir un résultat meilleur que 58 praticiens de 17 nationalités différentes, pour le diagnostic

de cancers cutanés : respectivement 95 % contre 86,6 % des cas examinés. Cependant, par la suite, *Watson* a été accusée de délivrer des prescriptions thérapeutiques erronées en matière de cancérologie.

Pour le diagnostic de la maladie d'Alzheimer, une équipe de San Francisco (*Ding Y. et al., Radiology, 2018*) a développé un algorithme d'« apprentissage profond » (*Deep Learning*), capable de prédire le développement de cette maladie, avec une spécificité de 82% et une sensibilité de 100 %. Ce programme reconnaît des schémas métaboliques caractéristiques de la maladie sur des images fonctionnelles par TEP-FDG (tomographie par émission de positons au 18-fluorodésoxyglucose), chez des patients, en moyenne 6 ans avant le début des symptômes. Les auteurs de l'étude travailleraient actuellement à une amélioration de la spécificité de la méthode.

Ce nouvel exemple de rapport homme/machine interroge, comme cela s'est déjà produit par le passé en d'autres domaines, sur le modèle « relationnel » à établir entre eux. Pour l'heure, l'IA apparaît essentiellement comme une aide au diagnostic, notamment en imagerie, et au traitement, notamment en termes de compatibilités médicamenteuses (*Synapse Medicine, start-up* développée par le docteur Clément Goehrs en France). Cependant, certains craignent que cette situation n'évolue vers une substitution du médecin par la machine, au dépend du malade.

Cela pose des questions éthiques (voir chapitre spécifique), non seulement sur les modalités-mêmes d'application du savoir médical, mais également sur les responsabilités juridiques endossées respectivement par le médecin et la machine, notamment dans l'éventualité d'un diagnostic erroné ou d'un traitement inadéquat. Enfin, le questionnement porte sur le respect de la déontologie, pour ne pas dire de la morale, inhérent à l'acte médical, au regard notamment du contenu du serment d'Hippocrate en France. Va-t-on devoir débiter une réflexion éthique/machine et établir des règles déontologiques propres à l'IA, indépendamment de celles attachées à la personne professionnelle... humaine ?

Sur un plan général, quels sont les motifs rationnels et raisonnables qui permettraient de justifier une telle substitution ?

S'agit-il de la prééminence du diagnostic de l'atteinte d'un ou de plusieurs organes chez la personne, plutôt que de celui de l'atteinte de la personne à un ou plusieurs niveaux organiques donnés ? Dans cette configuration, la personne ne serait plus à proprement parler elle-même malade, mais uniquement porteuse d'un organe atteint ne la concernant en somme que « de loin », à traiter pour son propre compte.

Peut-on concevoir finalement que la personne ne serait plus qu'un assemblage de constructions organiques physiquement « détachables », que l'on pourrait éventuellement réparer séparément, sans que l'ensemble n'en soit affecté, notamment au plan psychique ? On a pu entendre effectivement par le passé des malades considérer que leur maladie, engageant parfois un pronostic vital, n'était pas leur affaire mais celle des médecins, sachant cependant que cela n'est jamais apparu comme la manifestation d'une attitude « détachée », mais toujours comme une forme de résilience, particulièrement courageuse, et en tout cas jamais comme une réaction-machine.

## C.L'exemple des apports médicaux des techniques d'impression 3D

Parmi les outils reposant sur le numérique, l'impression 3D revêt un intérêt particulier et connaît un essor important dans le domaine de la santé. Outre la production d'instruments utiles comme par exemple des visières et respirateurs pour répondre à des attentes en rapport avec la pandémie de Covid-19, le domaine médical utilise la bio-impression (*bioprinting*). Des cellules sont déposées sur des supports pour créer des prothèses, la charpente d'un organe de remplacement, voire des organes comme par exemple un cœur. Il est aussi possible d'imprimer certains médicaments.

L'impression 3D est une technique additive de fabrication qui permet la préparation d'objets par dépôts successifs de couches de matière. Il s'agit du même principe de base que celui des imprimantes 2D utilisées pour l'écriture ou le dessin, mais qui permet un empilement de matière au lieu de se limiter à une impression de surface.

Pour mettre en œuvre cette technologie :

- Il faut disposer d'un fichier informatique représentant l'objet en 3 dimensions, décomposé en tranches.
- On envoie ces informations à une imprimante 3D, à un ou plusieurs compartiments.
- On utilise fréquemment comme matériaux des fils plastiques, mais aussi des poudres, des résines liquides, des encres, des métaux, des cires et du verre ; ces matériaux sont en constante évolution pour améliorer la finesse de l'impression, mieux restituer les couleurs, augmenter la gamme de tailles et la vitesse d'impression. L'application en pratique médicale amène à utiliser des matériaux issus du vivant.

Impression 3D en santé et environnement : développement et questionnements éthiques particuliers

L'impression 3D « au service du médical » est considérée comme une vraie révolution : la fabrication de prothèses sur mesure et d'implants est déjà pratiquée, alors que l'impression d'organes et de peau sera bientôt appliquée en médecine en raison du développement et des progrès accomplis par la bio-impression (*bioprinting*).

**La fabrication de prothèses et d'implants** est à distinguer de l'impression d'organes et de peau car elles ne posent pas les mêmes problèmes, essentiellement écologiques pour la première et éthiques pour la seconde. Prothèses et implants procèdent des mêmes démarches qui accompagnent l'utilisation de l'impression 3D en secteur industriel ; il se pose ici les mêmes questions quant aux matériaux utilisés, la mise en œuvre de la fabrication elle-même et des nuisances qu'elle peut entraîner. Saluons au passage l'initiative d'une communauté de bénévoles, *e-Nable*, qui prépare ainsi des « mains de super-héros » pour des enfants « sans main ».

C'est un lieu commun que de s'interroger sur la capacité de cette technique à être « écologique » dans ce secteur et à répondre aux besoins réels des patients. En faveur de cette hypothèse on peut citer : la baisse de la production de déchets, la fabrication de prothèses et d'implants personnalisés (et donc l'arrêt de la production en masse), la fin de l'obsolescence programmée et la diminution de la consommation d'énergie. Ajoutons que cela conduit aussi à la diminution des transports, car la plupart des fabrications peuvent être réalisées au plus près des consommateurs.

Il faut cependant tenir compte de quelques facteurs négatifs : le prototypage (très utilisé en 3D) est générateur de déchets ; les formes complexes et les mises au point fabriquent des pièces inutilisables et la dispersion des imprimantes 3D conduit à des déchets eux-mêmes dispersés difficiles à récupérer ; enfin, lors des fabrications, il se produit souvent l'émission de particules ultrafines.

**Les impressions d'organes et de peau** sont certainement plus maîtrisables au plan physique et biologique, mais commencent à interpeler au plan éthique. Au plan biologique c'est l'utilisation de cellules souches, sur l'usage desquelles repose la bio-impression, qui peut poser des questions éthiques et sociales suivant l'origine, le prélèvement et l'usage des embryons. À l'avenir, la création d'organes de synthèse nécessitera une multiplication cellulaire intense qui peut entraîner des risques de prolifération cellulaire, et donc la formation de tératomes ou de cancers, tandis que les implants pourraient être délogés ou amenés à migrer.

Où en sont les établissements de santé français ?

Un article original récent fait le point sur cette question : Dispositifs médicaux et modèles anatomiques produits par impression 3D : quelle diffusion et quelles utilisations dans les établissements de santé français ?<sup>86</sup>

Les auteurs se sont intéressés aux établissements équipés d'imprimantes 3D et aux établissements ayant recours à des prestataires extérieurs pour bénéficier de cette technologie. Plusieurs dizaines d'établissements de santé ont pu être identifiés comme ayant recours à l'impression 3D, dont 8 disposant d'imprimantes 3D en interne.

### **Débat éthique et social**

Au fur et à mesure que se développent les applications médicales de l'impression 3D, de nombreuses questions éthiques et sociales se posent, amenant une explosion de la littérature scientifique de ces secteurs dont le nombre d'articles a été multiplié par un facteur supérieur à 4 en 3 ans. Il faut citer particulièrement les travaux de la National University of Singapore dont plusieurs équipes s'intéressent à l'éthique de la bio-impression.

Au plan éthique en général, voici, par exemple, une proposition d'organisation proposée par cette université : « Une approche politique « complète » pour cette technologie est recommandée plutôt qu'une approche « au coup par coup » des différents composants de cette technologie. Un plan d'action efficace consistera à mettre en place un groupe international multidisciplinaire chargé de travailler sur le cadre politique, qui se penchera sur les impacts « durs » et « mous » de la bio-impression 3D, les défis éthiques associés, les mesures juridiques telles que des contrôles efficaces pour prévenir les utilisations abusives, ainsi que les aspects sociaux englobant les différences culturelles et religieuses qui sont à la base du succès de cette technologie. La mise en place de panels au niveau national pour évaluer l'analyse risques-avantages, en tenant compte de la vision culturelle et religieuse de la population et d'autres aspects juridiques et sociaux, pourrait constituer un bon point de départ ».

Problème de la brevetabilité du vivant. La loi interdit la brevetabilité d'organismes humains : elle précise qu'un produit est brevetable s'il est créé par l'homme et n'apparaît pas commodément dans la nature. En principe donc, sont brevetables les processus de bio-impression et les organes bio-imprimés, mais :

- Si l'organe ou le tissu est identique exactement à un organe ou un tissu humain, il ne sera pas brevetable.
- Pour les organes bio-imprimés, il faudra démontrer que le produit n'apparaît pas naturellement dans la nature ! Les tissus bio-imprimés sont fonctionnellement très semblables à des produits naturels mais, pour le moment, ils sont structurellement différents, donc brevetables.

En revanche, les procédés de fabrication peuvent être brevetés.

Au plan social, les coûts de la bio-impression étant en général élevés, cette technologie pourrait n'avoir des applications que dans une population suffisamment aisée amenant à des divisions parmi les personnes susceptibles de pouvoir profiter ou non de ses avancées pour une vie meilleure !

---

<sup>86</sup> Pierreville J, Serrano C, van den Brink H, Prognon P, Pineau J, Martelli N., in *Annales Pharmaceutiques Françaises*, 2018 ;76:139-46.

## D. Place du numérique en période de catastrophe sanitaire : l'exemple de la pandémie de Covid-19

Quelles peuvent être les réponses du numérique face aux défis propres à une pandémie, notamment celle liée à la Covid-19 ?

De façon générale, les technologies numériques, dont l'intelligence artificielle, ont été largement utilisées en vue d'essayer d'optimiser la qualité des soins et la prise en charge des patients atteints de la Covid-19. De nombreuses applications, non spécifiquement liées aux traitements, peuvent également être citées. Nous nous limiterons ici à celles qui ont donné lieu à des innovations déployées à une échelle limitée et de nature parfois expérimentale. Force est de reconnaître que nombre des mesures mises en œuvre n'ont pas eu la publicité attendue ni le succès escompté, pour traiter la pandémie en question.

### Détection précoce de la pandémie

Fin décembre 2019, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) avait été informée de la présence de plusieurs cas de pneumonie dans la ville de Wuhan, capitale de la province chinoise de Hubei. Le 6 janvier 2020, le Centre de contrôle des maladies de Taiwan a demandé à la Chine l'autorisation d'envoyer un groupe d'experts à Wuhan pour enquêter sur l'origine de cette pandémie de pneumonie virale, dont au moins 59 patients étaient affectés à cette époque.

Le 9 janvier 2020, l'OMS a diffusé l'information suivante : « une épidémie de type grippal sévit depuis Wuhan en Chine ». Par la suite, le virus responsable devait être identifié comme un nouveau coronavirus, le SARS-CoV-2. Pourtant quelques jours avant ces déclarations officielles, une société canadienne d'IA, *BlueDot*, avait détecté l'épidémie et avait lancé une mise en garde contre le nouveau virus, grâce à l'utilisation d'un algorithme d'IA capable de parcourir différentes sources d'informations dans 65 langues.

C'est ainsi que le 31 décembre 2019, la société a pu prévenir ses clients quelques jours avant l'annonce officielle et prédire dans quels pays le virus risquait de se propager. Comme l'explique Kamran Khan, fondateur et directeur général de *BlueDot* : « Dans ce cas précis, notre modèle a correctement prédit que le virus passerait de Wuhan à Bangkok, puis Séoul, Taipei et Tokyo dans les jours suivant son apparition initiale ». Ce qu'il complète plus tard par : « Notre modèle est capable de faire la différence entre une épidémie d'anthrax qui démarre en Mongolie ou un concert du groupe de *heavy metal* Anthrax ».

Combattre de telles pandémies implique de réagir rapidement ; c'est ce que permettent les prédictions ainsi obtenues et diffusées. En supplément de cette conclusion positive, l'examen de la stratégie et des moyens utilisés amène à remarquer l'importance de la qualité et de la quantité des données nécessaires, tout en soulignant le respect des questions éthiques qui accompagnent leur récolte.

### Suivi et visualisation de la pandémie

L'IA a eu pour objectifs de :

- Chercher les caractéristiques du virus et accélérer la recherche sur les médicaments et les traitements.
- Détecter le virus et prévoir l'évolution de la maladie.
- Empêcher ou ralentir la propagation du virus par la surveillance et le traçage des contacts.
- Répondre à la crise sanitaire grâce à des informations personnalisées puis à l'apprentissage.
- Surveiller, enfin, la reprise pandémique éventuelle et améliorer les outils d'alerte précoce.

De nombreux pays ont utilisé l'IA pour suivre et traiter la pandémie. Bien qu'il soit difficile d'établir une liste exhaustive, les quelques exemples qui suivent permettent d'apprécier l'intérêt, les limites et les échecs de cette stratégie.

Des travaux concernant la dynamique de la pandémie ont été réalisés dans trois universités américaines :

1) Les équipes du professeur Roni Rosenfeld, chef du Machine Learning Department (ou département d'apprentissage machine) et du groupe de recherche Delphi de l'Université Carnegie Mellon (Pittsburgh, Pennsylvanie), en collaboration avec les CDC (Centres pour le contrôle et la prévention des maladies), s'intéressèrent au suivi de la propagation du virus à partir des observations résultant du traitement saisonnier de la grippe. À cet effet, ils modifièrent les modèles existants, utilisés chaque année, selon trois méthodes :

a) La méthode dite *nowcast*, permettant de prédire le nombre de personnes infectées en temps réel. Pour cela les chercheurs se servent essentiellement des relevés historiques du CDC et autres organisations, ainsi que des données de l'activité sur Twitter, du nombre de recherche sur Google et de l'accès à des sites médicaux et des articles contenus dans Wikipédia.

b) En s'appuyant sur des *modèles d'apprentissage statistique*, les chercheurs de Pittsburgh ont effectué des prévisions pouvant permettre de déterminer, 4 semaines à l'avance, le pic d'infection et le nombre maximum de cas prévisibles.

c) Une troisième méthode, dite de la « *sagesse des foules* » (*wisdom of the crowds*), dont les résultats sont proches de ceux de l'apprentissage machine, s'appuie sur des consultations, chaque semaine, d'un groupe de volontaires, experts et non experts, par l'intermédiaire d'une plateforme en ligne.

2) Le professeur John Brownstein de l'Université d'Harvard, dirige *HealthMap*, un système d'information électronique automatisé et librement accessible pour surveiller, organiser et visualiser les rapports d'épidémies mondiales en fonction de la géographie, du temps et de l'agent infectieux. Il a développé un outil reposant, comme dans la méthode *wisdom of the crowds* citée ci-dessus, sur des données obtenues chez des volontaires. Ceux-ci peuvent signaler leurs symptômes en temps réel sur le site *Covid Near You*, dès leur apparition, avec une indication géographique.

3) À l'Université Johns Hopkins, située à Baltimore près de Washington, un tableau de suivi du nombre de cas, de décès, par pays, avec cartographie et courbes, a été mis en place. Des collaborations entre chercheurs français et américains ont permis d'établir des modèles mathématiques et statistiques qui aident la gestion de nouvelles épidémies, en apportant une meilleure compréhension de la propagation des agents pathogènes.

De tels modèles, comme ceux liés aux maladies infectieuses développés à l'Institut Pasteur par Simon Cauchemez, conduisent à l'optimisation des stratégies de contrôle de ces épidémies. Ils ont été appliqués, dans les Amériques, au suivi de l'épidémie de grippe A (H1N1), du Chikungunya, du Zika, puis du virus Ebola en Afrique, et lors d'une épidémie urbaine de peste à Madagascar.

Retombées : des algorithmes pour fluidifier la prise en charge des patients à l'hôpital

Une pandémie se traduit par l'arrivée d'un flux important de patients dans les hôpitaux. Il en résulte souvent des difficultés dans l'accueil des malades : des algorithmes avancés, capables d'analyser l'ensemble des données d'un hôpital, permettent de mieux gérer les flux de patients en anticipant les « goulots d'étranglement » et en allégeant la pression sur le personnel. À l'hôpital Johns Hopkins de Baltimore, les temps d'attente aux urgences ont par exemple été réduits de 25 %, alors que le temps d'attente pour un lit post-opératoire a diminué de 70 %. Un projet lancé et réalisé avec GE Healthcare a permis d'obtenir, en temps réel, une vue d'ensemble de 800 lits du Bradford Royal Infirmary, en Angleterre. De telles stratégies sont également utilisées dans les hôpitaux en France, comme par exemple à l'hôpital d'Amiens.

### **Détection de l'atteinte par le coronavirus SARS-CoV-2 et prédiction de ses complications**

Depuis l'apparition du nouveau coronavirus dans le monde, les pistes de traitement explorées sont nombreuses, y compris par la *e-santé*.



a. Projet « *Coughvid* » : son de la toux et smartphone

Cinq scientifiques du Laboratoire des systèmes embarqués de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne sont en train d'élaborer une application d'IA pour smartphone qui permettra de déterminer si l'on est positif ou non au coronavirus. Ce projet, nommé « *Coughvid* » repose sur la nature de la toux qui caractérise l'atteinte par le virus : toux sèche dans 67,7 % des cas d'après une statistique de l'OMS. Après avoir chargé l'application, il suffira d'enregistrer la toux : les propriétés de l'IA permettent de distinguer les caractéristiques de la toux en fonction du son émis, rapidement et avec une spécificité de 70 %, conduisant à un résultat instantané, d'où un dépistage pratique, gratuit, anonyme, facile à utiliser, orientant les autres examens médicaux indispensables.

b. Détection précoce de la Covid-19 par *patch connecté*

Des scientifiques américains de l'Université de Northwestern et de l'hôpital de recherche en médecine physique et en réadaptation Shirley Ryan Ability Lab (Chicago) ont mis au point un procédé qui repose sur « un ensemble d'algorithmes de données spécialement conçus pour détecter les premiers signes et symptômes associés à la Covid-19, et pour suivre les patients au fur et à mesure de l'évolution de la maladie ». Placé sur la gorge du porteur, un patch mesurant la fréquence de la respiration, l'intensité de la toux et la température du patient pourra déterminer si une anomalie décelée peut être attribuée ou non à une infection par la Covid-19.

c. Prédiction des complications liées à la Covid-19

Syndrome de détresse respiratoire aigüe

Certains malades atteints de la Covid-19 développent un syndrome de détresse respiratoire aigüe (SDRA), complication difficile à prévoir. Des chercheurs américains de l'Université de New York, Megan Coffee, de l'école de médecine Grossman et Anasse Bari, professeur de sciences de l'informatique, en collaboration avec les équipes de deux hôpitaux de Wenzhou, en Chine, ont développé une IA capable de déceler des signaux précurseurs d'un syndrome de détresse respiratoire aigüe à la suite d'une Covid-19.

Les indicateurs les plus précis utilisés par cette technique d'IA concernent des changements dans le taux d'une enzyme présente dans le foie, l'alanine aminotransférase, le taux d'hémoglobine et le signalement de douleurs.

Avec d'autres facteurs, cet outil, mis au point pour prédire quels malades du coronavirus développeront des complications pulmonaires graves, a permis de diagnostiquer un risque de SDRA avec une sensibilité de 80 %, ce qui pouvait aider les médecins à définir les malades à traiter en priorité dans les cas où les hôpitaux seraient surchargés.

**Toxicité cardiaque d'un médicament**

Les médicaments prescrits pour traiter la Covid-19 entraînent parfois des effets indésirables importants pour le cœur, en particulier le risque d'arythmie potentiellement mortelle.

Pour Colleen E. Clancy, professeur de physiologie et de biologie membranaire à l'Université de Californie à Davis (États-Unis), ces effets sont liés à la difficulté de prévoir la façon dont le médicament réagit avec les canaux potassiques, qui possèdent une fonction essentielle pour maintenir un rythme cardiaque normal, et sont codés par le hERG (*human Ether-à-go-go-Related Gene*). Avec son équipe, un modèle informatique a été proposé puis réalisé, basé sur la formule chimique du médicament afin de prédire son impact sur le rythme cardiaque, selon la relation classique « structure / fonction ». Ce système permet de révéler comment un médicament interagit spécifiquement avec les canaux hERG ainsi qu'avec les cellules et les tissus cardiaques. Les données cliniques humaines ont été utilisées pour la validation du modèle et ont montré une excellente corrélation, révélant ainsi la faisabilité d'une nouvelle approche pour la prédiction de la cardiotoxicité des médicaments. Les applications de l'apprentissage automatique indiquent les paramètres nécessaires et suffisants pour prédire la vulnérabilité d'un sujet à l'arythmie.

## Prédiction de la survenue d'un arrêt cardio-respiratoire

Des tests ont été conduits par le service de soins intensifs du Centre médical de l'Université de Pittsburg (USA) pour étudier un algorithme, et la plateforme qui lui est associée, en vue de suivre au mieux l'évolution du système cardio-respiratoire des malades. Ces tests ont fait l'objet de trois phases d'essai clinique permettant de surveiller et d'analyser en temps réel d'infimes variations des constantes vitales. En croisant les analyses et en prenant en compte les antécédents médicaux et familiaux du patient, l'algorithme peut prédire la survenue d'un arrêt cardio-respiratoire jusqu'à 6 heures avant cette dernière. La dernière étude a inclus 24 patients : aucun décès n'a été déploré dans le groupe bénéficiant de la plateforme, tandis que 6 décès ont été recensés dans le groupe contrôle. L'utilisation de cet outil de surveillance et d'analyse des constantes vitales, baptisé *Wave Clinic Platform*, qui a fait ses preuves en soins intensifs, a été autorisée aux États-Unis, par la *Food and Drug Administration*.

## Recherches sur les traitements médicamenteux

Un autre champ d'application de l'IA est l'identification de composés médicamenteux et l'élaboration de traitements. Deux stratégies peuvent être déployées :

- Le repositionnement de médicaments déjà connus qui, dans la situation actuelle d'urgence pandémique, est une méthode de choix avant la mise au point d'un vaccin ; ainsi, un important effort de repositionnement est en cours à l'échelle mondiale.
- La recherche de nouvelles molécules, méthode plus longue et plus coûteuse.

1) Comment identifier des médicaments existants, efficaces contre le coronavirus ?

a) La société française Pharnext, spécialisée dans l'intelligence artificielle et le *big data* pharmaceutique, a annoncé avoir identifié une centaine de médicaments fréquemment prescrits, comme candidats potentiels à repositionner pour le traitement de la Covid-19. Pharnext ne s'est intéressé qu'à des médicaments peu coûteux utilisés pour des maladies répandues, déjà autorisés dans d'autres indications. Il s'agit de la même démarche que celle qui fut développée avec le Remdesivir de Gilead, initialement destiné au virus Ebola (qui s'est avéré finalement inefficace) ou le Kevzara de Sanofi, actif contre la polyarthrite rhumatoïde.

Pharnext utilise sa technologie *Pléothérapie*, basée sur la pharmacologie des réseaux, et cela à partir de toutes les données biologiques disponibles : construction du réseau moléculaire de la maladie représentatif d'un inventaire des cibles potentielles, puis criblage *in silico* des médicaments déjà approuvés pour une certaine affection.

Les médicaments candidats sont alors soumis aux essais cliniques habituels avant d'être éventuellement approuvés ou non. En appliquant cette stratégie, le 23 mars 2020 Pharnext a annoncé l'identification de 97 médicaments fréquemment prescrits, comme candidats potentiels au repositionnement dans le traitement de la Covid-19, dont la plupart ne sont pas répertoriés comme des médicaments antiviraux. En outre, quatre des médicaments identifiés par la méthodologie de Pharnext étaient déjà en cours d'essais cliniques pour la Covid-19, dont l'hydroxychloroquine.

b) Des chercheurs de la société de découverte de médicaments à partir de l'utilisation de l'intelligence artificielle, Benevolent AI et de l'Imperial College de Londres, ont rapporté, en février 2020, qu'ils avaient utilisé un logiciel pour détecter un médicament déjà approuvé pour traiter la polyarthrite rhumatoïde, le baricitinib, qui pourrait limiter la capacité du virus à infecter les cellules pulmonaires<sup>87</sup>.

(L'équipe a rejeté deux médicaments anticancéreux, qui pouvaient également être efficaces, en raison de leurs effets secondaires et des doses efficaces prédites élevées).

---

<sup>87</sup> *Lancet*, 2020, 15-21 February; 395(10223). Published online 2020 Feb 4, e30–e31.

2) Utilisation de l'intelligence artificielle pour trouver de nouvelles molécules dans la lutte contre le coronavirus SARS-Cov-2 responsable de la pandémie de Covid-19

En utilisant les mêmes données que la société Benevolent AI, la société Insilico Medicine a annoncé, pratiquement en même temps, que ses algorithmes d'IA avaient conçu six nouvelles molécules qui pourraient empêcher le virus de se répliquer dans le corps humain.

L'article décrit six molécules qui, selon le groupe, sont significativement différentes des médicaments connus, mais devraient être des inhibiteurs de protéase de type 3C efficaces. Cinq des six molécules semblent être uniques, selon Todd Wills, directeur général de CAS, une division de l'American Chemical Society, qui publie C&EN. L'autre a un motif central décrit pour la première fois en 1910, et qui apparaît dans le médicament praziquantel. Les chercheurs annoncent qu'ils prévoient de commencer à synthétiser et à tester leurs molécules, mais qu'ils recherchent des partenaires extérieurs qui pourraient les aider.

### **Stratégies numériques d'identification des personnes ayant été au contact de personnes infectées**

a) Dispositifs de traçage : le *protocole ROBERT* et l'application *StopCovid*

La réussite de sortie du confinement par l'application de la stratégie nationale suppose la réalisation de deux objectifs importants :

- Le diagnostic précoce des nouveaux cas de Covid-19.
- La rupture des chaînes de contamination.

Pour cela, en France et dans un premier temps, deux outils numériques ont été mis à la disposition de tous les intervenants de la chaîne de diagnostics et de soins, ainsi qu'à celle des services de l'Assurance Maladie et de toutes les agences de santé :

- 1) *SI-DEP*, collecteur automatisé des résultats de test diagnostic (RT-PCR), qui permettra d'alerter très vite sur l'identification de nouveaux cas.
- 2) *Contact Covid*, pour prendre en charge les personnes détectées positives et leurs contacts rapprochés, afin de s'assurer de leur information, réaliser les tests nécessaires, et les accompagner, en particulier en leur faisant respecter une période d'isolement.

Pour protéger les libertés individuelles, l'intégralité du dispositif est soumise à la CNIL pour avis. Les garanties prévues par le règlement 2016/679, relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données (ou RGPD), ont été appliquées aux traitements *SI-DEP* et *Contact Covid*.

À côté des mesures de protection individuelles et collectives, le Gouvernement français a annoncé, le 8 avril 2020, une réflexion sur une application mobile de *traçage* des personnes atteintes de la Covid-19 qui, donc, les *tracera* et suivrait leurs mouvements. Grâce à son téléphone mobile, l'utilisateur serait prévenu par une notification s'il est proche d'un patient confirmé positif.

Appelée *StopCovid*, cette application mobile de « distanciation sociale » repose sur la possibilité pour des téléphones mobiles d'échanger leurs identifiants par transmission sans fil *Bluetooth*, à condition, bien sûr, qu'ils soient tous équipés de *StopCovid*. Un historique de tous ces identifiants est ainsi stocké et, si l'un des appareils appartient à une personne enregistrée comme atteinte de la Covid-19 – déclarée par une autorité médicale ou auto-déclarée –, toutes les personnes à proximité reçoivent une alerte sans que soit dévoilée l'identité du porteur du virus. L'échec de cette méthode, pour diverses raisons, a ouvert la mise en place d'une autre, *TousAntiCovid*, qui semble mieux suivie (voir plus loin).

Cette stratégie existe dans plusieurs pays d'Asie, et la méthode semble efficace pour contenir l'épidémie sous réserve d'un pourcentage suffisant (finalement jamais atteint en France dans cette configuration) de la

population équipée du logiciel. Ainsi, pour la Corée du Sud, un pays de 51 millions d'habitants, on a compté 10 000 cas et 220 décès seulement, en l'absence de toute mesure de confinement. Un tel résultat montre une gestion réussie de l'épidémie qui s'explique en grande partie par une stratégie massive de dépistage, soit 400 000 tests réalisés, mais aussi par le traçage numérique des malades.

La méthode coréenne a donc montré son efficacité, mais elle ne respecte pas la vie privée ni les libertés individuelles, ce qui n'est pas dans la culture française. Ainsi, en France, les autorités travaillent à la mise au point d'un outil qui permettrait à son utilisateur d'être prévenu s'il a été en contact avec une personne infectée, mais sur la base d'un engagement volontaire.

La solution française : le protocole ROBERT

Parmi les nombreuses alternatives, c'est celle portée par l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), le protocole ROBERT (*Robust and privacy-preserving proximity tracing*), qui a été retenue. En suivant ce protocole il était possible aux utilisateurs d'être informés du fait d'avoir été à proximité d'une personne infectée, et cela sans qu'aucune information personnelle ne soit dévoilée tant à une autorité de santé qu'aux utilisateurs eux-mêmes.

Le protocole ROBERT repose sur la technologie *Bluetooth* retenue pour sa précision, imparfaite certes, car cette technologie n'a pas été conçue pour le traçage, mais meilleure que les autres techniques de positionnement. L'API Apple/Google est disponible pour les premiers tests d'applications de traçage des contacts.

Fin avril 2020, Apple et Google ont diffusé la première version de leur API aux équipes des États partenaires, réservée comme prévu aux équipes étatiques qui travaillent sur les projets d'applications de *contact tracing* des gouvernements. Cette API (ou interface de programmation), est un outil provisoire, que les développeurs des États peuvent intégrer à leurs applications, qui permet un accès à la technologie *Bluetooth* et gère la diffusion des identifiants collectés. Cela signifie que les premières applications qui fonctionnent sur la majorité des *smartphones* pourront faire usage rapidement des API proposées par Google et Apple. Cette phase ouvre donc les premiers tests en conditions réelles des applications de *contact tracing* vraiment fonctionnelles, et dont les interfaces sont intégralement connues, pouvant fonctionner avec d'autres produits ou systèmes existants ou futurs, et ce sans restriction d'accès ou de mise en œuvre entre les différents *smartphones*.

b) *StopCovid* : l'application change sa version et devient *TousAntiCovid*

Mise en place le 2 juin 2020, l'application *StopCovid* n'a pas remporté le succès escompté par les autorités. Selon les chiffres du Gouvernement, diffusés début octobre 2020, seulement 7 969 personnes se sont déclarées comme étant positives sur l'application. Seules 472 notifications ont été envoyées à des personnes, potentiellement cas-contacts. Ainsi la France se retrouve à la dernière place des pays européens ayant mis au point des applications de traçage dans le cadre de la lutte contre la Covid-19, avec moins de 4 % de la population ayant téléchargé l'application à cette date, comparée à l'Irlande qui se hisse à la première place avec son appli « *Covid Tracker* », téléchargée par 26 % de sa population et l'Allemagne, au deuxième rang avec 18,4 millions de téléchargements pour « *Corona-Warn-App* ».

À la suite de cet échec de l'application *StopCovid*, le Gouvernement a lancé mardi 22 octobre 2020 une nouvelle version. Ce n'était pas en effet une nouvelle application mais une simple mise à jour de la première version, censée être plus pertinente et performante. Avec celle-ci, renommée *TousAntiCovid*, les usagers pourront accéder aux données concernant « la circulation du virus, des points pour se faire tester, etc. », a expliqué Emmanuel Macron lors de l'annonce, entre autres, de la mise en place d'un couvre-feu.

Contrairement à *StopCovid* qui fonctionnait en continu, l'application *Tous AntiCovid* devait être activée par l'utilisateur avant une situation dite « à risque », une sortie au restaurant par exemple (cela permettra également d'éviter la surconsommation de batterie, relevée par les utilisateurs de *StopCovid*).

Son heure de visite sera ainsi enregistrée par *Tous AntiCovid*. Si un autre client ayant fréquenté ce même lieu au même moment se révèle positif, les usagers recevront une notification sur leur téléphone. Un *QR Code* a

dû être mis en place dans les restaurants, censé être scanné par les clients, *via* l'application *Tous AntiCovid*, qui devait alors enregistrer la plage horaire pendant laquelle ils ont été présents et ainsi les alerter si un autre client de l'établissement venait à être testé positif au virus dans les jours qui suivaient. La simplicité d'utilisation, supérieure à celle des carnets de rappel mis en place dans les restaurants en zone d'alerte, a pu faire espérer un usage décuplé de l'application. Néanmoins, cette fonctionnalité n'était pas encore prête au moment où ce texte a été rédigé, sachant que plus est que les restaurants, entre autres lieux commerciaux de rencontre, étaient encore interdits d'ouverture fin 2020.

Pour accéder à ces données, les personnes devront entrer dans l'application leur ville de résidence ou leur région, puisque l'application fonctionne non par géolocalisation mais *via Bluetooth* qui, dans un système centralisé reste le moyen principal de répertorier les utilisateurs pour ressortir les connexions entre chacun. De même, pour tracer les cas-contacts, *Tous AntiCovid* ne semble pas pour le moment abandonner le *protocole ROBERT*, pas plus qu'elle n'utilise l'API d'Apple et de Google auquel nombre de pays ont fini par souscrire, ce qui voudrait dire qu'elle resterait incompatible avec les applications européennes.

Dans un avis daté du 20 octobre 2020 et publié le jeudi 22, le Conseil scientifique présidentiel a pu soutenir le nouvel ensemble numérique, composé de *TousAntiCovid*, mais également des outils *Dépistage Covid*, qui permet de « savoir où se faire tester », et de *Mes Conseils Covid*, « un service de prévention permettant de trouver une information fiable et personnalisée sur les conduites à tenir ». Le Conseil scientifique précise que cet ensemble numérique s'inscrit « dans la perspective de préparer la sortie des couvre-feux des zones en état d'alerte maximale, et d'éviter aux zones épargnées par la vague actuelle d'y entrer ».

c) Alternative *blockchain* au *protocole ROBERT* et à l'application *StopCovid* et sa nouvelle version *Tous AntiCovid*

Des dépistages plus ou moins complets doivent, en particulier, permettre d'isoler les personnes atteintes de la Covid-19 pour éviter que celles-ci ne contaminent leur entourage. Des applications, dites de « traçabilité des patients Covid-19 » ont déclenché des discussions à la fois sur leurs modalités coercitives, ou non, et sur leurs technologies qui doivent être respectueuses de la vie privée des personnes concernées et de leur entourage. Les États, dont la France, se sont attachés à proposer des solutions qui assurent un anonymat complet pour l'ensemble des personnes dépistées, mais aussi qui doivent préserver une confidentialité et une sécurité sans faille des données recueillies et stockées, *plus particulièrement quand on utilise ce stockage dans des bases de données centralisées*. Les discussions multiples qui ont accompagné le projet *StopCovid* ont montré que ce sujet inquiète aussi la société civile qui se mobilise parfois pour exiger des autorités qu'elles adoptent des solutions plus innovantes.

Parmi les solutions qui semblent répondre à ces demandes, on peut citer des travaux basés sur l'utilisation de la technologie de la *blockchain*, qui est une technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée et fonctionnant sans organe central de contrôle. Une *blockchain* peut constituer ainsi une base de données qui contient l'historique de tous les échanges effectués entre ses utilisateurs depuis sa création. Cette base de données est sécurisée et distribuée : elle est partagée par ses différents utilisateurs, et cela sans intermédiaire, ce qui permet à chacun de vérifier la validité de la chaîne.

Des experts en cryptographie et anonymisation des données, appartenant à l'équipe de la PME Unikname, ont choisi d'utiliser leur *blockchain uns.network*, dédiée initialement à la gestion d'identifiants universels, anonymes et inviolables, et développée ensuite pour la solution d'authentification *Unikname Connect*. Ils ont conçu un protocole nommé *Unikname C.A.R.E* (acronyme de *Citizen.Anonymous.Reporting.Epidemic*), censé permettre à chaque citoyen de pouvoir télécharger les résultats de son test Covid-19 sur son *smartphone*, sans jamais devoir dévoiler son identité véritable. Les résultats des tests sont stockés par les laboratoires d'analyses de manière totalement anonyme sur une *blockchain* semi-publique et c'est dans cette même *blockchain* que l'application installée sur le téléphone du citoyen va pouvoir retrouver ses résultats d'analyse *via* son identifiant universel anonyme. « Le patient est le seul à connaître cet identifiant », précise le PDG de Unikname : « C'est uniquement lorsque le citoyen doit volontairement présenter son résultat pour accéder à un lieu ou un service réservé uniquement aux personnes non porteuses du SARS-CoV-2 comme un EHPAD, ou encore lors de l'embarquement pour un vol commercial, que le lien entre le résultat du test et une pièce d'identité est réalisé sur l'écran du *smartphone* grâce à l'application *my.unikname.app*. »

L'application elle-même est fortement sécurisée et la cryptographie empêchera toute personne autre que le propriétaire du téléphone d'accéder à cette donnée, en cas de perte ou de vol du *smartphone*. Cette *blockchain uns.network* a été officiellement lancée par *Unikname* après 24 mois de R&D qui ont porté sur les problématiques de protection des données personnelles, sur des projets pilotes, et ont été réalisés avec plusieurs acteurs parmi lesquels on trouve des banques et des compagnies d'assurances santé.

Parmi les atouts de *Unikname C.A.R.E*, signalons :

- *No Tracking* : l'impossibilité de réaliser un *tracking* des citoyens.
- Transparence anonyme : mise à disposition des données de l'épidémie totalement anonymisées, inviolables et transparente *via la blockchain*.
- *Open Data* : des données à accès libre, et en temps réel, pour la communauté scientifique mais aussi les institutions de santé publique, les professionnels et les citoyens eux-mêmes.
- Scalabilité : une architecture décentralisée qui rend la solution exploitable à l'échelle de l'Europe.
- Adoption facilitée grâce aux laboratoires d'analyses qui vont pouvoir expliquer le mécanisme aux patients au moment du test.
- Démarche citoyenne, où le citoyen apporte sa contribution à toute la société, avec la responsabilité, car c'est lui et lui seul qui possède la clé d'accès au résultat du test, de pouvoir présenter ses résultats à la demande de son médecin ou de l'autorité publique.

Ce protocole pourra être décliné à d'autres tests de contamination et l'utilisateur pourra librement utiliser son *Unikname* en tant qu'identifiant universel anonyme. Il pourra le réutiliser librement pour accéder de manière sécurisée et confidentielle à toute plateforme Internet ou mobile ne demandant pas l'identité de l'internaute. Indépendamment de son intérêt pour le traçage des personnes avec toutes les garanties possible, *Unikname C.A.R.E* est une opportunité quant à l'adoption massive d'une *blockchain* pour une autre application que la crypto-monnaie.

#### d) En Israël, des algorithmes pour contrer le coronavirus

Israël utilise une application destinée à lutter contre le nouveau coronavirus, application lancée par le ministère de l'Éducation, le 29 mars 2020, pour juguler l'épidémie par la technologie. Son utilisation est facile : après avoir été téléchargée, l'application mobile géolocalise l'appel et avertit son auteur qu'il a croisé récemment des personnes infectées par l'épidémie de Covid-19. En Israël, les applications mobiles se multiplient pour vaincre le virus à coups d'algorithmes. L'une des applications mobiles lancées récemment, parmi les plus connues, se nomme *Hamagen* (« Bouclier » en français).

*Hamagen* permet aussi aux usagers d'anticiper leur trajet pour éviter des lieux trop exposés au virus. Comme avec *StopCovid*, la population n'est pas suivie à distance par les autorités ; elle télécharge « volontairement » une application et les données sont stockées « uniquement sur l'appareil de l'utilisateur ». En moins d'une semaine, l'application a dépassé le million de téléchargements et les autorités tentent de vendre le concept à d'autres pays, selon la presse locale.

Deux autres initiatives méritent d'être signalées :

1) Le ministère de la Défense israélien a donné son appui aux recherches menées par une *start-up*, *Vocalis Health*, qui tente de développer une application permettant aux professionnels de la santé de détecter, au seul son de sa voix, si une personne est susceptible d'avoir été infectée.

2) Une grande question se pose : *comment faire pour gérer les patients à la maison ?* Le virus étant très contagieux il faut minimiser les contacts entre les équipes médicales et les patients. Dans le cas d'une personne dont l'état modéré et stable ne nécessite pas de tels contacts, la haute technologie présente donc un grand intérêt. Le Pr Eyal Leshem, directeur du centre pour la médecine du voyage à l'hôpital Sheba près de

Tel-Aviv, utilise une application mobile qui mesure les signes vitaux des patients (pouls, température, etc.), et les transmet au personnel soignant ; il est même envisageable que seul un robot se charge de les approcher.

e) Face à la Covid-19, les projets de traçage russes sont contestés

Les autorités russes ont très tôt préconisé le recours massif aux outils numériques pour contrôler les déplacements des citoyens et limiter la circulation du virus en s'inspirant des exemples étrangers (Chine, Corée, Singapour). Ces démarches s'inscrivent dans une logique des responsables russes qui, pour parer à une éventuelle tentative occidentale de couper l'Internet russe du reste de la Toile mondiale, souhaitent équiper la Russie d'un réseau souverain. Bien avant le début de l'épidémie, ce processus avait été engagé en consolidant des dispositifs de surveillance déjà en place depuis longtemps (caméras de vidéo-surveillance, agrégation des données de géolocalisation fournies aux autorités par les opérateurs mobiles).

Le maire de Moscou a préconisé un suivi des citoyens étant, ou ayant été, en contact avec des personnes infectées, à partir des données de géolocalisation fournies par les opérateurs et transmises aux autorités locales. Répondant à cet objectif, une application utilisée pour la surveillance des malades, « *monitoring social* », disponible dès le 1<sup>er</sup> avril 2020, a été rapidement critiquée en raison de son faible degré de protection des données personnelles, et abandonnée.

Les ambitions sécuritaires des autorités se heurtent donc aux réalités de leur mise en œuvre, aggravées par le fait que la surveillance numérique et les solutions sanitaires sont déléguées à de nombreux acteurs publics et privés, fédéraux et régionaux, dont les décisions sont souvent contradictoires. La pandémie a permis de démontrer les limites du projet de centralisation des infrastructures d'Internet, obligeant le gouvernement à assouplir certaines mesures régulatrices.

f) Initiatives numériques solidaires

De façon plus positive, des initiatives solidaires se développent sur Internet pour soutenir les personnes les plus démunies et les soignants. Le collectif Makers contre Covid utilise les techniques d'impression 3D pour offrir aux médecins le matériel de protection qui leur manque.

Un *hackathon* en ligne, *Covidhack*, développe un *bot* pour Telegram qui aide à produire une base de données citoyenne permettant aux personnes atteintes par le coronavirus de s'exprimer anonymement et de cartographier leurs symptômes.

### **Actions collectives en faveur de la mise en commun des données de lutte contre la Covid-19**

1. Constituer un ensemble de données accessible au public et lisible par machine

Le grand nombre de cas confirmés de Covid-19 dans le monde a provoqué la publication de données, d'articles, et de différents textes de plus en plus nombreux, rendant très difficile, pour les chercheurs, l'accès aux informations.

Pour répondre à cette situation, la Maison Blanche et ses partenaires ont lancé un défi sur Kaggle, plateforme web organisant des compétitions en science des données. Sur cette plateforme, les entreprises proposent des problèmes en science des données et offrent un prix aux *datalogistes* obtenant les meilleures performances. En accord avec quelques groupes de recherche, la Maison Blanche a annoncé la publication du *Covid-19 Open Research Dataset (CORD-19)* de la littérature scientifique sur Covid-19, SARS-CoV-2 et le groupe Coronavirus.

Cette annonce rejoint un appel urgent aux experts en IA de tous les pays dont l'objectif est clair : « Développer de nouvelles techniques d'exploration de texte et de données qui peuvent aider la communauté scientifique à répondre aux questions scientifiques hautement prioritaires liées à Covid-19 ».

*CORD-19* constitue ainsi un ensemble de données accessible au public et lisible par machine. Il comprend plus de 29 000 articles savants, dont plus de 13 000 avec du texte intégral sur Covid-19, SARS-CoV-2 et les coronavirus associés.

L'ensemble des données Covid-19 a été construit par l'Allen Institute for Artificial Intelligence, la Chan Zuckerberg Initiative, le Georgetown University Center for Security and Emerging Technology, Microsoft Research, la National Library of Medicine – National Institutes of Health et la plateforme Kaggle AI appartenant à Google –, en coordination avec le Bureau de la politique scientifique et technologique de la Maison Blanche.

## 2. Constituer une Plateforme internationale et sécurisée d'offensive coordonnée contre la Covid-19

En avril 2020, un collectif international composé d'une cinquantaine de médecins cliniciens et de chercheurs pluridisciplinaires exerçant dans des hôpitaux universitaires et organismes de recherche en santé, français, italiens, espagnols, autrichiens, russes, israéliens et canadiens, de différentes spécialités-clés dans la lutte contre la Covid-19, s'est constitué. Ces spécialistes, immunologistes, infectiologues, virologues, épidémiologistes, spécialistes des maladies auto-immunes, pharmaciens, etc., qui pensent que la lutte contre la Covid-19 doit être « éclair », rapide, massive, coordonnée et pluridisciplinaire, demandent une plateforme unique et cryptée de télé-présence intégrale.

Sur cette plateforme les professionnels de santé pourront partager, en temps réel, au niveau international, *via* des visio-conférences, audioconférences et *chat* hautement sécurisés, tout ce qui permet de combattre la Covid-19. Elle doit aussi permettre de travailler en mode « projet télé-collaboratif sécurisé » et garantir une traçabilité totalement anonymisée des patients atteints de la Covid-19, leurs traitements et état de santé, en vue de proposer des solutions de sortie de confinement efficaces mais éthiquement acceptables et conformes au RGPD.

Bâtie autour d'une « *blockchain next gen* » (rapide, frugale, scalable, auditable, ergonomique et à la main des citoyens), la plateforme sollicite le soutien d'investisseurs, mécènes, grands donateurs, conseillers, parrains et ambassadeurs.

### **Les imprimantes 3D aident à lutter contre le virus**

Pour faire face à la pandémie de coronavirus, médecins, infirmiers, aides-soignants, etc., doivent s'occuper d'un nombre de malades beaucoup plus important que d'habitude. Et, pour ne pas tomber malades à leur tour, ils doivent se protéger, mais les équipements manquent.

*Covid 3D : la plate-forme nationale pour fabriquer une visière de protection solidaire*

La plate-forme Covid 3D met en relation des particuliers équipés d'imprimantes 3D avec des entreprises et personnels à la recherche de visières (écrans faciaux en plastique transparent). Ainsi en France ils sont nombreux à fabriquer des visières pour les soignants.

*Fabriquer des pièces détachées d'appareils médicaux*

Les imprimantes 3D peuvent même faire encore mieux. Par exemple : fabriquer des respirateurs, ces machines qui aident les malades de Covid-19 à respirer. Des prototypes sont actuellement testés dans certains hôpitaux. En Italie, un médecin a eu l'idée d'utiliser des masques permettant de voir et de respirer sous l'eau pour aider les malades, en les reliant à des respirateurs, grâce à des adaptateurs spéciaux créés sur des imprimantes 3D. Depuis, ce système a été adopté dans d'autres pays, dont la France.

*Imprimer des médicaments*

Même si cette activité n'est pas réservée au traitement de la Covid-19, rappelons que des réacteurs imprimés en 3D peuvent construire de petites molécules complexes, et donc des médicaments, permettant ainsi une thérapie personnalisée.



L'impression d'antibiotiques en 3D, par exemple, permet d'accélérer le développement de solutions pour lutter contre la résistance bactérienne, qui accompagne parfois les atteintes virales : les microbiologistes pourront en effet imprimer des échantillons d'antibiotiques, ou d'autres médicaments accompagnant des antivirus, pour les soumettre à des tests. Cette technique est bien plus rapide que les techniques traditionnelles.

## Numérique et confinement

Selon Omdia<sup>88</sup>, le trafic Internet mondial a déjà augmenté de 70 % dans les régions confinées du globe, suite à la pandémie de Covid-19 (en mai 2020).

WhatsApp, Facebook et Instagram ont connu une progression de plus de 40 % chez les moins de 35 ans. Et WhatsApp se voit être le grand gagnant. Selon Kantar<sup>89</sup>, l'application a enregistré une hausse de 40 % de son utilisation, avec à l'heure actuelle plus de 2 milliards d'utilisateurs, juste derrière Facebook. L'Espagne a, quant à elle, connu une augmentation de 76 % du temps passé sur cette application.

Depuis le début de la crise, la *SVOD* (*Subscription video on demand*) (en français, VADA, service vidéo à la demande par abonnement) tire également son épingle du jeu. Tandis que certaines plateformes ont repoussé leur lancement à l'international, Netflix a vu une augmentation significative des téléchargements de son application depuis le début du confinement. Avec désormais 167 millions d'utilisateurs au niveau mondial, les téléchargements ont augmenté de 66 % en Italie, de 35 % en Espagne et de 9 % aux États-Unis. Cependant, son action a baissé d'environ 7 % depuis la fin janvier 2020, toute proportion gardée puisque le Nasdaq a également baissé d'environ 20 % sur la même période. Reste désormais à savoir comment cette guerre du contenu va se dérouler sur le marché français, sachant que Disney + a été lancé en France le 7 avril 2020.

En dehors du spectre consumériste, les outils de collaboration et de télétravail croissent fortement. Jusqu'à présent, le gagnant le plus notable est certainement Zoom Video Communications. Sa valorisation boursière est en hausse de près de 60% depuis fin janvier. Microsoft gagne également du terrain avec son application "Teams" qui a augmenté de 37% atteignant ainsi 44 millions d'utilisateurs quotidiens.

L'horizon n'est pas si sombre pour les acteurs de la Tech. L'État a lancé TECH.GOUV 2019-2021, le nouveau programme pour accélérer la transformation numérique du service public, piloté par la DINSIC (Direction interministérielle du numérique et du système d'information et de communication de l'État), avec l'appui de tous les ministères. Axé autour de 6 enjeux prioritaires – simplification, inclusion, attractivité, maîtrise, économies, alliances –, ce programme ambitieux se décline en un plan d'action sur 3 ans. Objectif : faire en sorte que l'État se saisisse des opportunités du numérique pour rapprocher l'administration des citoyens, des entreprises et de ses propres agents, pour mieux les servir.

Même si de nombreux secteurs économiques vivent une période tumultueuse, certaines entreprises du numérique s'en trouvent renforcées. À l'image de Zoom, Microsoft ou encore Slack, Facebook et Apple, de nombreux outils, favorisant la communication, le divertissement et le rapprochement communautaire, observent un sursaut de leur utilisation. Cette période démontre la capacité pour les acteurs de la Tech, anciens comme nouveaux, de continuer à innover et à s'adapter pour servir les besoins et tendances estimés des consommateurs.

---

<sup>88</sup> Omdia est la nouvelle centrale mondiale de recherche technologique, créée en 2019 avec la combinaison des marques de recherche d'Informa Tech (Ovum, Heavy Reading et Tractica) et le portefeuille de recherche technologique acquis IHS Markit. Omdia combine l'expertise de plus de 400 analystes couvrant 150 marchés et des milliers de sociétés de technologie, de médias et de télécommunications, publiant plus de 3 000 rapports de recherche par an, atteignant plus de 14 000 abonnés. Omdia aide les entreprises à faire de meilleurs choix technologiques : économiser de l'argent, gagner du temps et gérer leurs risques technologiques. Pour les fournisseurs de technologies et les fournisseurs de services, Omdia stimule la croissance des résultats nets grâce à une stratégie de marché améliorée, des investissements dans les produits et une efficacité de mise sur le marché.

<sup>89</sup> Kantar est une entreprise basée au Royaume-Uni, filiale dédiée au conseil, aux études de marché et marketing du groupe WPP, fondée en 1993. Elle est constituée d'un réseau de 13 filiales spécialisées, emploie 28 500 personnes dans une centaine de pays dans le monde. En France, l'entreprise est implantée à Puteaux (Hauts-de-Seine) avec Kantar Media, et à Chambourcy (Yvelines) avec Kantar World Panel (ex-Secodip). Elle réalise un chiffre d'affaires d'1 milliard de dollars, ce qui la place au 2<sup>e</sup> rang des entreprises d'études marketing aux États-Unis. Son président actuel est Éric Salama et son siège est situé à Londres. En 2008, TNS, après sa fusion ratée avec GfK, est acquise par WPP et fusionnée avec Kantar en février 2009.

## E.Recommandations relatives à la partie IV

### *Concernant les avantages et les inconvénients des technologies issues du numérique en médecine :*

- On attend des techniques du numérique, et de la soi-disant intelligence artificielle, une extension considérable des capacités d'intégration complexes des innovations technoscientifiques de la médecine.
- Rappelons que nombreux sont ceux qui affirment que la santé est un des champs des plus prometteurs de la « révolution digitale », ce qui, en retour, justifie que l'impact du numérique dans le domaine de la santé est dès à présent très fort.

Dans le contexte d'un foisonnement d'avancées technoscientifiques et techno-médicales, le développement massif des outils numériques et la multiplication des objets connectés sont anticipés comme devant révolutionner notre système de soins, mais cette efficacité a un coût, et un coût croissant. La médecine deviendrait-elle une activité de luxe, la santé elle-même ne serait-elle pas un luxe, au sens financier, et non au sens biologique qu'évoquait Georges Canguilhem (« Être en bonne santé, c'est pouvoir tomber malade et s'en relever. C'est un luxe biologique ») ?

- On peut donc légitimement s'interroger sur la justification d'une invasion du numérique en médecine et en santé : s'agit-il de développer une compétence médicale toujours plus efficace ou de concevoir un système efficient de contrôle et de limitation des dépenses de santé ? Il est probable qu'au-delà des motivations réelles des décideurs du champ politico-économique, ces deux justifications opèrent à un niveau comparable.
- La clinique humaine, elle, représente une expérience intime du corps, une relation de soin dans la durée, intégrant certes, mais aussi dépassant les seules données quantifiables.
- « La télémédecine constitue [...] une voie nouvelle pour faciliter l'accès aux soins ; c'est pourquoi elle a vocation à s'installer comme une pratique régulière en France » indiquait ainsi un communiqué de presse de la Caisse nationale de l'Assurance Maladie en 2018.
- Cependant, il est à noter que :
  - Les quatre types d'actes médicaux principalement impactés par la télémédecine sont : 1) les réponses à des questions simples de santé, 2) le suivi de routine des maladies chroniques, 3) le renouvellement d'ordonnances et 4) le suivi médical en EHPAD.
  - Les quatre champs d'activité principaux de la télémédecine sont 1) les échanges entre médecins et patients (téléconsultation), 2) les échanges de compétence entre professionnels de santé (télé-expertise), 3) la télésurveillance et 4) la téléassistance (soutien entre professionnels de santé).
- Il est peu probable que la télémédecine puisse être une réponse quantitativement satisfaisante à la pénurie de médecins, certes plus marquée dans les zones identifiées comme « déserts médicaux », mais aussi plus générale au moins dans le cas de certaines spécialités (gériatrie, psychiatrie).
- Le numérique est présent dans tous les secteurs en santé, mais il y a au moins deux approches de la médecine qui sont interconnectées : 1) la médecine du diagnostic/pronostic/traitement et 2) celle de la prévention/évaluation du risque. En France, la médecine penche plutôt du côté thérapeutique (« cure ») tout en travaillant sur la prévention, mais de manière ciblée (cardiovasculaire, cancer...), alors que dans les pays nordiques par exemple, c'est plutôt la prévention des maladies qui est mise en avant, en accompagnement des personnes tout au long de leur vie (« care »). Dans ce contexte, le numérique n'est pas utile pour les mêmes finalités.

- La collecte de données numériques ou numérisables et l'utilisation d'objets connectés servent la conception d'un corps réduit aux seuls éléments que l'on peut mesurer, dont on dispose dans une temporalité qui est celle d'une relative immédiateté et qui revêt donc une forme d'abstraction. La clinique humaine, elle, représente une expérience intime du corps, une relation de soin dans la durée, intégrant certes, mais surtout dépassant les seules données quantifiables.

***En termes de précaution, sur un plan général :***

- Gardons à l'esprit ce propos dû à Cynthia Fleury : « Plus on crée des machines, plus il faut renforcer la formation des hommes et « finaliser » la technique, afin que celle-ci maintienne l'homme dans son humanisme ».

***Concernant les usages de l'intelligence artificielle en vue du diagnostic, en termes de déontologie et d'éthique***

Cet usage pose des questions éthiques non seulement sur les modalités elles-mêmes d'application du savoir médical, mais également sur les responsabilités juridiques endossées respectivement par le médecin et la machine, notamment dans l'éventualité d'un diagnostic erroné ou d'un traitement inadéquat. Le questionnement porte sur le respect de la déontologie, pour ne pas dire de la *morale*, inhérent à l'acte médical, au regard notamment du contenu du serment d'Hippocrate en France. Va-t-on devoir débiter une réflexion éthique/machine et établir des règles déontologiques propres à l'IA, indépendamment de celles attachées à la personne professionnelle... humaine ?

Afin de garantir une certaine indépendance au niveau européen sur ces questions, remarquons que le plan coordonné concernant l'IA « fabriquée en Europe » expose en détail les actions qui démarreront en 2019 ou 2020 et prépare le terrain pour les actions à mener dans les années à venir. Les décisions prises sont les suivantes :

- 1) Maximiser les investissements par l'intermédiaire de partenariats.
- 2) Créer des espaces européens des données.
- 3) Favoriser le talent, les compétences et l'apprentissage tout au long de la vie.
- 4) Développer une IA éthique et digne de confiance.

Concernant l'impression 3D et ses usages médicaux, en termes de prévention, les recommandations du CPP sont les suivantes :

- Prendre en compte les questions éthiques et sociales (problème de la brevetabilité du vivant notamment) que pose le développement de la bio-impression.
- Prendre des mesures pour limiter les effets toxiques dus aux composés organiques volatils (COV) et certains des produits de décomposition thermique émis lors de l'extrusion des thermoplastiques ainsi que des nanoparticules résultant de la volatilisation du filament de polymère.

Un plan d'action efficace consistera à mettre en place un groupe international multidisciplinaire chargé de travailler sur le cadre politique, qui se penchera sur les impacts « durs » et « mous » de la bio-impression 3D, les défis éthiques associés, les mesures juridiques telles que des contrôles efficaces pour prévenir les utilisations abusives, ainsi que les aspects sociaux englobant les différences culturelles et religieuses qui sont à la base du succès de cette technologie.

**Finalement, en médecine,** peut-être plus que dans d'autres secteurs d'activité, il apparaît que le remplacement des hommes par des robots, prôné par les investisseurs, n'est très probablement que fantasme :

avant que ne se développe un monde virtuel dans lequel l'homme sera devenu obsolète, il aura fallu atteindre l'impossible, donc en abandonner l'idée<sup>90</sup>.

---

<sup>90</sup> Casilli A. A., En attendant les robots. Enquête sur le travail du clic, Seuil, 2019.

# Postface

Le CPP s'est efforcé, *dans une logique de prévention et de précaution*, d'identifier les risques qui peuvent être associés tant à la construction /élaboration qu'à l'utilisation des objets du numérique. Il a recherché leurs répercussions sur l'environnement considéré au sens très large, autant que dans sa déclinaison en termes de santé publique. Ce faisant, le Comité a mené une réflexion, tout au long de ce rapport, sur la signification réelle des avancées techniques qui sous-tendent la mise en place d'un environnement numérique généralisé, et le sens qu'elle revêt au regard des risques auxquels ces avancées exposent la personne humaine à l'échelle individuelle comme collective.

Cela nous rappelle la mise en garde de Norbert Wiener (in *Cybernetics and society*, 1954) : « There is one quality more important than know-how and we cannot accuse the United States of any undue amount of it. This is know-what by which we determine not only how to accomplish our purposes, but what our purposes are to be ». Cette recherche du sens de nos actions (« know what ») est, ou plutôt devrait être à la base de tout questionnement éthique et le CPP est naturellement associé à cette démarche.

Cette préoccupation du Comité rejoint, recoupe même, l'indispensable réflexion éthique qui doit dorénavant être intégrée à toute estimation de « progrès » dans l'inclusion du numérique à la pratique médicale. « Plus on crée des machines, plus il faut renforcer la formation des hommes et « finaliser » la technique, afin que celle-ci maintienne l'homme dans son humanisme » comme nous l'avons répété avec Cynthia Fleury.

D'une manière presque paradoxale, le comité-pilote spécifiquement dédié à l'Éthique du numérique émanant du CCNE et de la CERNA (Commission de réflexion sur l'Éthique de la Recherche en science et technologies du Numérique d'Allistene<sup>91</sup>) ne pose pas les questions en termes de « pourquoi ? », dans son rapport du mois de novembre 2018. Il assène à vrai dire plus qu'il ne discute : « Le rythme rapide de diffusion du numérique au sein de notre système de santé est un fait majeur, irréversible et appelé à prendre à l'avenir encore plus d'importance dans la réponse aux défis de santé publique. Les éléments disponibles montrent à quel point le numérique est une source d'avancées majeures pour le renforcement de la qualité et de l'efficacité de notre système de santé. Les gains susceptibles d'être obtenus dans le domaine de l'enseignement et de la recherche sont également considérables. La mobilisation de ce potentiel n'en est qu'à son commencement. L'ampleur prévisible du déploiement de ces technologies appelle au renforcement de son accompagnement par une analyse en continu des enjeux éthiques associés à ces technologies et à leurs évolutions futures ».

En conséquence, le CCNE, dans son avis n° 129, se contente d'acter l'invasion estimée quasi inéluctable du numérique en santé publique, et de montrer à quel point il est une source d'avancées pour le renforcement de la qualité et de l'efficacité de notre système de santé. Se priver du numérique pourrait finalement relever d'un comportement non-éthique.

Cependant, des mutations profondes vont s'opérer dans les métiers, les rôles, les fonctions et les responsabilités des acteurs du système de santé. Nous devons donc anticiper cette évolution en termes d'évaluation et de sûreté. Les conséquences sur la formation et le comportement de tous les acteurs seront multiples. Elles sont illustrées par le propos du philosophe Jean-Michel Besnier qui prophétisait, en 2016 :

« Cet artiste de la médecine va disparaître, au profit de « l'ingénieur » gestionnaire de signaux, le *data scientist* – l'analyste des données –, qui relève les mesures prises par les bracelets électroniques, les implants, les biocapteurs. Le diagnostic ne sera bientôt plus établi sur la base d'une explication du symptôme, mais en fonction de la corrélation de ce symptôme avec les statistiques livrées par les données ».<sup>92</sup>

---

<sup>91</sup> <https://hal.inria.fr/ALLISTENE-CERNA>

<sup>92</sup> [https://www.lexpress.fr/actualite/sciences/jean-michel-besnier-reconcilier-les-humains-avec-leur-vulnerabilite\\_1819764.html#vhdPLDXk6mAvO5IC.03](https://www.lexpress.fr/actualite/sciences/jean-michel-besnier-reconcilier-les-humains-avec-leur-vulnerabilite_1819764.html#vhdPLDXk6mAvO5IC.03)

Existe-t-il là un risque de déshumaniser la médecine ? Les états-généraux de la bioéthique de 2018 avaient fait ressortir une grande question, qui semble dépasser la seule problématique de la nécessité de contenir les dépenses de santé, celle de *la place du citoyen dans le système de soins*.

Encore une fois, la prévention est absente de cette réflexion. C'est pourtant un domaine majeur de la santé, de la santé publique en particulier et de la médecine de demain. *Mieux vaut prévenir que guérir*<sup>93</sup>. Cet exercice de soin, essentiel, n'est toujours pas enseigné comme il devrait l'être au cours des études médicales, ni en formation continue, ultérieurement. C'est d'autant plus dommageable que les outils numériques mis maintenant à notre disposition pourraient rendre la prévention d'une grande efficacité, au sens de l'association entre d'une part l'efficacité théorique, avec des modèles et algorithmes adaptés, et, d'autre part, les applications pratiques, avec un coût moindre en termes de *pretium doloris* et de dépenses de santé.

Y a-t-il un danger à considérer la santé et la médecine comme des objets industriels désincarnés soumis aux lois de la réparation mécanique, du marché et de l'obsolescence programmée ? Le CPP s'efforcera toujours, comme il l'a fait jusqu'à présent, de considérer la santé comme étant un bien commun à l'ensemble du vivant, devant par conséquent être préservé et « traité » comme tel, à l'aune notamment des enseignements du code de Nuremberg.

Conformément à son rôle et sa mission, le CPP ne s'est pas limité à un sujet tel que « Numérique et Santé », mais a tenté de resituer les enjeux de santé publique au sein d'un environnement numérique en expansion, et d'analyser en quoi les différentes composantes de cet environnement numérique influençaient, voire impactaient la santé, prise au sens global de la définition de l'OMS de 1946.

L'aspiration au bien-être que celle-ci sous-tend impose désormais une vision globale de la santé (« *One Health* ») dont l'environnement représente une composante majeure.

La question devient alors : existe-t-il dans la numérisation *in extenso* un risque de déshumaniser l'humain ?

---

<sup>93</sup> Juffé M. (coordonnateur), Bertella-Geffroy M.O., Bourrelrier P.H., Fessler J.M., Grimfeld A., Huglo C., Levi Y., Simon A., *Prévenir vaut mieux que guérir. La prévention précoce à tous âges*, Economica, 2017.



# Annexe

## Les applications médicales potentielles de l'impression 3D

L'impression 3D est une technique additive de fabrication qui permet la préparation d'objets par dépôts successifs de couches de matière. Il s'agit du même principe de base que celui des imprimantes 2D utilisées pour l'écriture ou le dessin, mais qui permet un empilement de matière au lieu de se limiter à une impression de surface.

Pour mettre en œuvre cette technologie :

- Il faut disposer d'un fichier informatique représentant l'objet en 3 dimensions, décomposé en tranches.
- On envoie ces informations à une imprimante 3D, à un ou plusieurs compartiments.
- On utilise fréquemment comme matériau des fils plastiques, mais aussi des poudres, des résines liquides, des encres, de métaux, des cires et du verre ; ces matériaux sont en constante évolution pour améliorer la finesse de l'impression, mieux restituer les couleurs, augmenter la gamme de tailles et la vitesse d'impression. L'application en pratique médicale amène à utiliser des matériaux issus du vivant.

**Les techniques d'impression** sont nombreuses :

- Stéréo-lithographie.
- Dépôt par extrusion à partir d'un fil plastique fondu, ABS ou PLA.
- Frittage par laser.
- Production d'une interface liquide en continu à partir d'une résine liquide polymérisée sous UV et en contrôlant la teneur en oxygène.
- Un procédé (société Carbon3D, USA) met en œuvre l'impression en continu d'une résine maintenue liquide, ce qui permet de réinjecter celle-ci sans qu'il soit nécessaire d'attendre comme dans les procédés couche par couche.
- Fusion (métaux, plastiques, céramiques, poudres) sélective par laser.
- **Éco-conception** : plusieurs *start-ups* développent des imprimantes utilisant des extrudeuses, capables de broyer des déchets afin de recycler des plastiques (PET, PP, et PS) provenant d'emballages alimentaires, bouteilles, vaisselles et matériaux pour automobiles ; un logiciel adapté aux cas traités complète les moyens nécessaires.

**Les applications** sont de plus en plus importantes et dans différents domaines, allant d'objets de grande taille (maisons, ailes d'avions...) à des reproductions d'organes et de nourriture. Quelques exemples :

L'impression 3D en médecine, ou **bioprinting**, joue un rôle de plus en plus grand dans des domaines aussi variés que la fabrication d'implants, de prothèses et d'organes. Dans ce dernier cas, il s'agit de procédés qui permettent d'imprimer des tissus organiques par dépôt de cellules vivantes sur des supports ; ainsi la société Organovo de San Diego en Californie, pionnière depuis 2007 dans le domaine, a pu imprimer des morceaux de poumon, de rein et créer un foie humain reconstitué et fonctionnel. Les quelques exemples supplémentaires ci-après montrent l'immense potentiel de cette technique.



- **Impression d'une oreille humaine artificielle**, avec un gel composé de collagène et de cellules vivantes ; l'oreille est fonctionnelle, puisque l'utilisation des cellules propres au receveur la rend bio-compatible, ce qui est alors une garantie de non-rejet. L'impression 3D se fait en 24 heures environ, l'injection du gel en 30 minutes et il se solidifie enfin en 15 minutes ; reste alors à mettre l'oreille artificielle en culture quelques jours pour que les cellules fabriquent du cartilage.
- **Greffes osseuses**, par la réalisation d'un os artificiel parfait, rapidement et sur-mesure grâce à un matériau composé de 90 % de poudre d'hydroxyapatite et de 10 % d'un élastomère bio-compatible (polycaprolactone). Cette technique permet la réalisation d'une mandibule humaine en moins de 3heures.
- **Grefe de peau**, puisque l'impression de tissus humains est devenue possible grâce à l'emploi de lasers qui permettent d'atteindre une grande précision et de reproduire la complexité des tissus. Une start-up française implantée près de Bordeaux, la société Poietis, a créé des greffons de peau à partir de cellules de patients (peau saine ou pathologique). Ces greffes sont destinées à être utilisées en recherche pharmaceutique ou pour réaliser des tests en cosmétique ; l'usage pour des fins médicales sera vraisemblablement possible dans quelques années.
- **Guérison des plaies**. Grâce à une bio-imprimante 3D en combinaison avec un système d'imagerie médicale, des scientifiques américains ont été capables de reconstituer de la peau directement dans la plaie des blessés en imprimant de l'épiderme couche par couche sur les blessures de modèles animaux (souris et cochons). Pour cela, ils ont isolé des cellules de la peau, des fibroblastes et des kératinocytes, à partir d'une biopsie d'un tissu sain. Mélangées à un hydrogel et placées dans une imprimante 3D, l'appareil scanne la plaie, transmet les données à un logiciel et l'imprimante dépose les cellules dans la blessure, reproduisant la structure de la peau en couches. En 2 semaines la cicatrisation est obtenue. Cette technologie, qui peut être utilisée à l'endroit même où se trouve le blessé, pourrait être utilisée pour les grands brûlés, l'ulcère diabétique et les personnes ayant des plaies importantes.
- **Impression de cellules et injection de molécules dans le milieu intracellulaire**. Une observation intéressante concerne les cellules qui, une fois imprimées et déposées, gardent un trou ouvert dans leur membrane plusieurs heures avant de se refermer ! Il devient possible dès lors de leur injecter des molécules, même de grande taille, et donc d'envisager, par exemple, des transferts de gènes à l'intérieur des cellules.
- **Impression 3D de tissu cardiaque humain**. Des chercheurs de l'université d'Harvard, aux États-Unis, ont imprimé en 3D du tissu cardiaque humain intégrant une puce associée à des capteurs. Ces scientifiques comparent ce système « *organ on a chip* » (organe sur une puce) au « *system on a chip* », de l'informatique, qui caractérise une puce intégrant à la fois la mémoire vive, le processeur et les périphériques. C'est à l'aide d'un matériau constitué d'un polymère imprimé avec 6 encres différentes que ces chercheurs ont pu réaliser l'équivalent d'un réseau de canaux sanguins et de cellules. La puce intégrée dans le tissu va servir à simuler la pression des poumons sur le cœur, mais aussi simuler les dysfonctionnements, tandis que les capteurs mesurent les résultats en continu.
- **Cœur entier imprimé en 3D avec des cellules humaines**. Avec un hydrogel produit avec des cellules humaines, une équipe de Tel Aviv a réussi à imprimer un cœur, de la taille d'une cerise, intégralement, avec tous ses vaisseaux sanguins. Cet exploit, qui offre une réponse au problème des rejets des greffes cardiaques, nécessite encore de pouvoir réaliser la multiplication d'un nombre suffisant de cellules cardiaques dans le réacteur pour pouvoir obtenir suffisamment de tissus nécessaires à la transplantation d'un objet de taille humaine. Enfin, seule la mise au point d'un processus de maturation, au cours duquel les cellules du

cœur imprimé pourront se synchroniser et provoquer des pulsations, permettra à l'organe de fonctionner.

**Les progrès en matière de vascularisation peuvent être étendus à la création d'autres organes miniatures.** La société Organovo a pu imprimer ainsi des morceaux de poumon, de muscles cardiaques, mais aussi un morceau de rein et un foie humain (resté en fonction 40 jours). Ce morceau de foie, de 3mm<sup>2</sup> sur 0,5 mm d'épaisseur, a produit des enzymes, des protéines et du cholestérol, production qui a permis de multiplier par 8 sa durée de vie.

**Impression « sur-mesure » d'une cornée en 3D.** Une équipe de scientifiques de l'Université de Newcastle a réussi à imprimer une cornée en 3D, à partir d'un mélange de cellules de cornée, d'alginate et de protéines de collagène, utilisé comme encre. Après avoir scanné l'œil du patient, l'imprimante fonctionne en décrivant des cercles concentriques conduisant, en 10 minutes, à la formation d'une cornée dont 90% des cellules étaient vivantes 24 heures après l'impression et 83 % après une semaine.

### **Impression 4D**

Les chercheurs de Newcastle ont introduit une nouvelle dimension dans l'utilisation de la technologie de l'impression 3D appliquée à l'obtention d'une cornée. Rappelons que la différence avec ce qui précède va concerner les propriétés supplémentaires que vont posséder les **objets 4D**. Ces propriétés sont liées à la capacité de l'objet à se modifier lui-même en réponse à un stimulus (température, courant électrique, lumière, pH,...).

- **Impression 4D d'une cornée sur-mesure pour l'œil d'un patient.** La cornée prend automatiquement la forme autour de l'œil après avoir été imprimée. Pour cela il faut utiliser un gel fait de collagène et de cellules souches encapsulées. Le gel est mis en place sous la forme de deux cercles concentriques de composition différente : l'un conserve le matériau tel que décrit ici, tandis que dans l'autre on ajoute des peptides amphiphiles capables de s'auto-assembler. Ces derniers sont activés par un sérum fœtal bovin : la différence de contraction des deux anneaux se traduit par une forme incurvée qui permet « la reproduction presque parfaite d'une cornée humaine ».
- **Généralisation de l'impression 4D à d'autres organes.** La plupart des organes imprimés en 3D sont longs à produire ou peu modulables. L'impression 4D corrige ces défauts, par exemple :
  - L'implantation d'un tissu ne nécessitera plus de pratiquer une large incision : « il suffira d'introduire par un petit orifice un organe qui adoptera sa forme définitive et fonctionnelle une fois à l'intérieur du corps » (Che Connon, de l'université de Newcastle, coauteur de l'étude).
  - En modifiant un paramètre dans le gel on obtiendra directement un organe sur-mesure, ce qui permettra d'éviter d'avoir à imprimer chacun selon un modèle différent, d'où un gain de temps et la possibilité d'atteindre une production semi-industrielle.

### **Impression 3D de bactéries dans des matériaux complexes fonctionnels**

Par la combinaison des métabolismes naturels variés des bactéries et la possibilité que l'impression 3D offre en conception de forme, des matériaux fonctionnels, vivants, ont pu être créés, capables de dégrader des polluants et de produire de la cellulose bactérienne médicalement adaptée.

Pour réaliser ces matériaux, des bactéries sont intégrées dans une encre 3D biocompatible et fonctionnalisée. Leur assemblage de bas en haut conduit à des compositions spatialement spécifiques ainsi qu'à des géométries et des propriétés nouvelles. Ces matériaux ont des applications :

- En biotechnologie (dégradation du phénol en biomasse).
- Biomédicales, par la formation *in situ* de couches de cellulose bactérienne sur des surfaces non planes.

### **Tatouages vivants imprimés en 3D**

Sur le même principe, un patch a été imprimé en 3D avec une encre à base d'hydrogel et de nutriments contenant des bactéries génétiquement modifiées et programmées pour répondre à des stimulus. Ce patch a la forme d'un arbre dont les branches comportent des cellules sensibles, chacune, à un composé donné. Appliquée sur la peau, la branche développe une réaction quand elle est exposée à ce composé, en l'espèce : le développement de protéines fluorescentes.

### **Impression 3D de copies de médicaments**

À l'aide d'un logiciel/base de données (une IA appelée Chematica), des copies de médicaments peuvent être synthétisées. Cette IA utilise un ordinateur à conception contrôlée, des algorithmes et une base de données constituée de 250 années d'informations sur les composés organiques pour prévoir et fournir des voies de synthèse aux molécules retenues. Appliqué à la synthèse d'un relaxant musculaire, le baclofène, réalisé dans un réacteur en polypropylène à compartiments multiples, le produit est obtenu après une séquence de 3 réactions, 2 extractions liq/liq et un set d'évaporation et de filtration pour obtenir à la fin du chlorhydrate de baclofène, cristallisé, blanc.