



DÉFIS INFORMATIQUES
DU BIG DATA

BIG DATA ET MÉDECINE PERSONNALISÉE

La révolution du "Big Data" imprègne désormais le domaine de la santé pour améliorer la "Médecine Personnalisée"

DEWEZ ROMAIN
PERRIN MATHIEU
TORDJEMAN MATHILDE

20 Décembre 2019
Stéphane Derrode



**BIG DATA ET MÉDECINE
PERSONNALISÉE**

SOMMAIRE

- Page 2** - Qu'est-ce que la médecine personnalisée ?
- Page 3** - La médecine personnalisée : pourquoi ? Pour qui ?
- Page 4** - Synergies Big Data - médecine personnalisée
- Page 5** - Focus sur la médecine génomique
- Page 6** - Entretien avec une biologiste pharmacienne
- Page 7** - Un exemple d'utilisation du Big Data dans la médecine personnalisée
- Page 8** - Les moyens : contribution du Machine Learning
- Page 9** - Modèles de prédiction appliqués à la médecine personnalisée
- Page 10** - Protection des données médicales : enjeu de taille
- Page 11** - Les dérives possibles de cette approche de la médecine
- Page 12** - Bibliographie

QU'EST-CE QUE LA MÉDECINE PERSONNALISÉE ?

La médecine personnalisée est définie par le President's Council of Advisors on Science and Technology des États-Unis, en 2008, de la sorte : "Personalized medicine refers to the tailoring of medical treatment to the individual characteristics of each patient. It does not literally mean the creation of drugs or medical devices that are unique to a patient, but rather the ability to classify individuals into subpopulations that differ in their susceptibility to a particular disease or their response to a specific treatment. Preventive or therapeutic interventions can then be concentrated on those who will benefit, sparing expense and side effects for those who will not." [1]

La médecine personnalisée se présente, entre autre, comme un outil d'aide au choix du médicament, afin d'en finir avec des prescriptions inutiles voire néfastes, qui plus est coûteuses pour le service public. La médecine personnalisée est cependant souvent assimilée à la médecine génomique (voir page 5) car cette dernière est la plus facile à mettre en œuvre actuellement. [2]

On retrouve cette association dans la définition donnée dans le Dossier de Presse du Colloque sur la médecine personnalisée en France, le 8 Décembre 2015 : " La définition de la médecine personnalisée [...] se réfère à la capacité donnée par les outils de la génomique à choisir un traitement pour un malade donné en fonction de ses caractéristiques individuelles." [3]

LA MÉDECINE PERSONNALISÉE : POURQUOI ? POUR QUI ?

Le niveau élevé actuel d'intérêt pour la médecine personnalisée du point de vue des politiques est attribuable non seulement à la promesse d'améliorer les soins aux patients et la prévention des maladies, mais aussi à la possibilité que la médecine personnalisée ait un impact positif sur deux autres tendances importantes : l'augmentation des coûts des soins de santé et la baisse du taux de développement de nouveaux produits médicaux. La capacité de distinguer à l'avance les patients qui bénéficieront d'un traitement donné et ceux qui sont susceptibles de subir des effets indésirables importants pourrait entraîner des économies importantes pour l'ensemble du système de soins de santé. De plus, la capacité de stratifier les patients en fonction de la susceptibilité à la maladie ou de la réponse probable au traitement pourrait également réduire la taille, la durée et le coût des essais cliniques, facilitant ainsi la mise au point de nouveaux traitements, diagnostics et stratégies de prévention.

Décrit par Jean Yves Nau comme : "Un processus inverse, en somme, de celui qui nous a (pratiquement tous) conduit à adopter le prêt-à-porter" [4],

De façon plus récente apparaît la notion de médecine de précision, plus ambitieuse, englobant à la fois le traitement et la prévention de la maladie, à partir de la prise en compte des variétés individuelles au plan génétique, environnemental et des styles de vie de chaque patient. Les termes médecine personnalisée, médecine de précision, médecine stratifiée et médecine P4 sont utilisés de façon interchangeable pour décrire ce concept de regroupement de patients en fonction du risque de maladie ou de la réponse au traitement, au moyen de tests ou de techniques diagnostiques. Le terme " P4 " englobe cette approche personnalisée dans un cadre plus large qui reconnaît également la nature de plus en plus prédictive, préventive, personnalisée et participative de la médecine moderne. [6]

Médecine P4

Prédictive
Préventive
Personnalisée
Participative

SYNERGIES BIG DATA - MÉDECINE PERSONNALISÉE

L'objectif de la médecine personnalisée, est de tirer parti des techniques les plus récentes de l'informatique, des dispositifs médicaux connectés et des techniques d'analyse afin d'élaborer un plan personnalisé pour un patient donné ou une sous-catégorie particulière. L'intégration des données de vie réelle aux données tirées des essais cliniques randomisés, des dossiers médicaux électroniques et des ensembles de données publiques ouvre de nouvelles perspectives et permet d'envisager l'administration du bon traitement au bon moment, parfois en l'associant à des modifications du régime alimentaire ou du comportement [7].

Or, traiter de telles quantités de données nécessite de développer des algorithmes informatiques puissants. "Ce qui est vrai pour la recherche en Big Data va pénétrer la recherche clinique", déclare Jacques Beckmann, généticien au ISB Institut suisse de bio-informatique. Il explique aussi que l'analyse n'est plus limitée à la seule génomique humaine : il y a aussi les données du «quantified self» (méthode de capture d'informations physiologiques et environnementales par des capteurs portés autour du poignet, par exemple), et même des tweets rapportant des symptômes. Selon lui : "Il existe encore toute une série d'informations à glaner." [8]

“ **CE QUI EST VRAI POUR LA RECHERCHE EN BIG DATA VA PÉNÉTRER LA RECHERCHE CLINIQUE.** ”

Cependant, alors que le séquençage ADN voit son prix chuter drastiquement depuis 10 ans, seulement 1000 dollars pour un génome, les analyses de données coûteront, elles, de plus en plus cher du fait de cette quantité énorme d'informations et des besoins de validation et de standardisation. [9] Pour répondre à ce besoin, il faut réunir ces données sur une plateforme de mégadonnées, explique Javier Jimenez, Vice-Président, Global Head for Real World Evidence and Clinical Outcomes de Sanofi, de sorte que l'apprentissage automatique, la visualisation et les techniques de modélisation analytique et prédictive permettent de recueillir des informations plus précises. [7]

FOCUS SUR LA MÉDECINE GÉNOMIQUE

Une des branches de la médecine personnalisée est la médecine génomique. Cette dernière s'intéresse et étudie le patrimoine génétique des individus afin de prédire l'état de santé d'un individu et de proposer les traitements les plus adaptés au génome du patient. De cette analyse peuvent être déduits de nombreux éléments. On peut détecter par exemple la présence de gène déterminant dans le développement de maladies monogéniques (maladie provoquée par la mutation d'un seul gène) comme c'est le cas de la mucoviscidose par exemple. De plus, la réponse à certains traitements, notamment anticancéreux, étant pour une part due aux différences génétiques individuelles, l'analyse séquencée de l'ADN d'un patient atteint du cancer pourrait permettre de cibler et d'améliorer l'efficacité des traitements. [11]



Consciente des multiples avancées et bénéfiques de la médecine génomique, la France s'est dotée d'un plan "France Médecine Génomique 2025" afin d'être un acteur majeur de cette technologie. Le plan vise notamment à intégrer le séquençage de l'ADN dans la prise en charge des patients. Pour cela, il prévoit de déployer un réseau de douze plateformes de séquençage à haut débit du génome couvrant l'ensemble du territoire. [12]

Le plan "France Médecine Génomique 2025"

Déjà 2 plateformes génomiques françaises à visée diagnostique et de suivi thérapeutique, sur les 12 attendues dans les 5 ans !

ENTRETIEN AVEC UNE BIOLOGISTE PHARMACIENNE



Portrait

Clémence Demerlé est biologiste pharmacienne à l'APHM (Assistance Publique - Hôpitaux de Marseille) et assistance spécialiste du CLCC (Centre de Lutte Contre le Cancer) Institut Paoli-Calmettes de Marseille. C. Demerlé a fait sa thèse sur la recherche de biomarqueurs en immunothérapie pour améliorer les traitements anticancéreux.

La recherche en médecine s'est retrouvée de plus en plus confrontée aux problématiques du Big Data lorsque les nouvelles technologies de séquençage de l'ADN sont apparues et ont permis de recueillir une grande quantité d'informations sur le génome des patients ou de cohortes de patients. C. Demerlé travaille sur les nouveaux traitements anticancéreux en immunothérapie. [13]

“

Le médicament bloque un récepteur inhibiteur sur les lymphocytes que la tumeur utilise normalement pour endormir le lymphocyte et éviter d'être éliminée. Ces médicaments sont efficaces pour 30% des patients seulement ... La seule recherche sur l'expression du ligand de ce récepteur ne suffit pas à expliquer pourquoi le traitement est efficace pour un patient et ne l'est pas pour un autre. La réponse est probablement multi-paramétrique, il n'y a pas que l'expression du ligand à regarder, mais d'autres marqueurs autour pour mieux comprendre comment la tumeur endort le système immunitaire, de manière différente selon les patients. C'est en faisant des analyses multi-paramétriques ou "à forte dimensionnalité" qu'on va pouvoir comprendre comment ça marche et proposer des traitements ciblés aux patients pour qu'ils aient la meilleure chance de s'en sortir. Le problème de faire des analyses avec autant de données est le besoin d'algorithmes d'identification de clusters/biomarqueurs mais il y a un risque de sur-apprentissage important : que l'on voit une combinaison de marqueurs sortir sur la cohorte de patient qu'on a testé, alors qu'il n'est pas unique d'où l'importance de travailler sur différentes cohortes pour tester ce qu'on a trouvé. La recherche en immunothérapie pour proposer des traitements anticancéreux adaptés à chaque patient n'est pas encore aboutie mais est en bonne voie. Elle permettra notamment d'augmenter le taux de réussite des traitements, augmenter les chances de rémission des patients et économiser des centaines de milliers d'euros car les immunothérapies sont aujourd'hui très coûteuses.

”

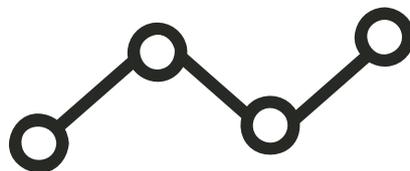
UN EXEMPLE D'UTILISATION DU BIG DATA DANS LA MÉDECINE PERSONNALISÉE

Un exemple d'utilisation du Big Data en médecine personnalisée est la prédiction de l'évolution du rachis lors d'une arthrodèse. L'arthrodèse est l'opération chirurgicale palliative à la scoliose. Elle consiste à redresser et fixer la colonne vertébrale du patient à l'aide de tiges en métal. Cette opération présente usuellement certaines contraintes, comme la nécessité pour le chirurgien de cintrer et découper les tiges manuellement pendant l'opération. En plus de prolonger l'opération, et donc d'augmenter les risques et le prix, cela fragilise les tiges. Grâce aux masses de données d'arthrodèse aujourd'hui collectées, la société Médicrea a développé un modèle de prédiction de la forme de la colonne vertébrale et propose des tiges pré cintrées et prédécoupées industriellement. Ces tiges permettent un gain de temps au bloc ainsi qu'un risque de rupture plus faible et une qualité de vie accrue. [10]



LES MOYENS : CONTRIBUTION DU MACHINE LEARNING

Au delà des analyses statistiques conventionnelles (moyenne, écart type, quartiles...), les moyens dont dispose la médecine personnalisée proviennent majoritairement de la recherche en Machine Learning. Le Machine Learning, est un domaine à l'interface des mathématiques et de l'informatique, qui a pour but d'extraire de la connaissance à partir de données brutes. En partant de jeux de données médicales extensifs, des algorithmes permettent ainsi d'inférer des lois reliant des données d'entrée à des données de sortie. On peut par exemple mesurer des constantes sanguines en entrée et tenter de prédire la probabilité d'occurrence d'une maladie en sortie. Ces algorithmes sont beaucoup plus performants en contexte de Big Data, car la précision est proportionnelle aux volumes des données. En effet, il y a une similarité entre la machine et l'homme : pour être performant, l'algorithme doit d'abord "s'entraîner" sur une multitude d'exemple. Ce n'est que lorsqu'il a suffisamment "appris" que l'on peut commencer à l'utiliser de manière intéressante, le but étant de constituer un modèle dont les prédictions se généralisent bien à des données inconnues, qui n'ont pas été rencontrées durant l'apprentissage.



Une grande variété de problèmes de Machine Learning appliquée à la Médecine personnalisée peut être classée en 2 catégories :



Les problèmes de classification, où il faut apprendre à prédire une variable qualitative (présence de cancer, appartenance à un ou autre type de patient etc.). Ils peuvent être vus comme des problèmes de partitionnement de l'espace, où le but est de trouver les bonnes frontières entre les différentes familles à classifier.



Les problèmes de régression, où il faut apprendre à prédire une variable quantitative (taux d'une hormone dans le sang, état de surface d'un os après une chirurgie etc.). Ils peuvent être vus comme des problèmes d'approximation de fonction à partir d'un sous ensemble réduit de points connus. [14]

MODÈLES DE PRÉDICTION APPLIQUÉS À LA MÉDECINE PERSONNALISÉE

RÉGRESSION LINÉAIRE

Modèle de régression le plus simple, il établit une relation linéaire du type $\text{sortie} = \text{cte1} * \text{entrée} + \text{cte2}$ entre les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie. Loin d'être le modèle le plus précis, il est néanmoins très robuste (il ne donne quasiment jamais de résultat aberrant) et il nécessite une puissance de calcul ainsi qu'une quantité de données très faibles. [15]

ARBRES DE DÉCISION

Très utilisés en classification, ils consistent en un enchaînement de tests binaires permettant de séparer un jeu de données en plusieurs sous familles. Dans un contexte d'étude sur un traitement du cancer du poumon par exemple, on peut visualiser un arbre de décision de manière très simple en imaginant un jeu de données constitué de l'âge des patients et du fait qu'ils soient fumeurs ou non. On va effectuer en premier un test sur l'âge : le patient a-t-il au moins 20 ans ? Dans un second temps on effectue le deuxième test : le patient fume-t-il ? On vient de créer un arbre de décision permettant de classifier le jeu de données en 4 familles : Les jeunes fumeurs, les jeunes non fumeurs, les adultes fumeurs, et les adultes non fumeurs.

Quelques modèles

Régression linéaire
 Arbres de décision
 Réseaux de neurones

RÉSEAUX DE NEURONES

Ils peuvent être utilisés à des fins de classification ou de régression. Ils sont constitués d'une multitude de neurones informatiques prenant des valeurs en entrée et dont la sortie est une transformation mathématique inspirée de la biologie de la somme pondérée des entrées. On peut modifier l'organisation structurelle des neurones au sein du réseau selon l'application qu'on souhaite en faire : pour la reconnaissance de cancers de la peau, on utilise des réseaux de neurones dits "convolutifs" qui sont spécialisés dans l'analyse de propriétés locales des images, comme les grains de beauté par exemple [16]. En revanche, si l'on souhaite prédire un futur problème cardiaque, on peut utiliser des réseaux de neurones dits "récurrents", qui permettent de mémoriser les événements passés pour mieux prédire le futur. [17]

PROTECTION DES DONNÉES MÉDICALES : ENJEU DE TAILLE

Les problématiques actuelles de protection des données personnelles sont d'autant plus importantes dans le domaine de la médecine personnalisée. Les données médicales sont très précieuses, et les données sur le génome sont encore plus sensibles. En effet "notre ADN est une séquence de plus de trois milliards de paires de «lettres», qui désignent des molécules. Il suffit toutefois d'en connaître une septantaine, placées à des endroits spécifiques, pour pouvoir identifier quelqu'un avec une quasi-certitude". [18] Mis en commun avec d'autres données comme celles issues de Google ou Facebook par exemple, elles donneraient un large spectre d'informations sur des individus. Un accord entre Google et des centaines d'hôpitaux américains a récemment fait controverse. Sous prétexte de mettre au point des nouveaux outils de détection de maladie et prévision de traitements, Google a recueilli un large nombre de dossiers médicaux, assurant que ces données ne serviront qu'à améliorer la recherche médicale et ne seront pas associées à d'autres données qu'ils détiennent. Les dossiers médicaux seront analysés par plus d'une centaine d'employés de Google. Cet accord s'est passé sans l'avis des patients, ce qui pose la question de la propriété des données médicales. A qui appartiennent-elles ? Aux patients ? Aux hôpitaux et laboratoires ? Le principe de "secret médical" est ici largement remis en question. Jusqu'où violer ce principe pour améliorer la recherche et la médecine personnalisée ? [19]

“ NOTRE ADN EST UNE SÉQUENCE DE PLUS DE 3 MILLIARDS DE "LETTRES" [...], IL SUFFIT D'EN CONNAÎTRE UNE SEPTANTAINÉ POUR POUVOIR IDENTIFIER QUELQU'UN AVEC UNE QUASI-CERTITUDE. ”

En 2016, un hôpital de Los Angeles s'est fait hacker son système informatique comprenant notamment les dossiers médicaux des patients. Le blocage affectait aussi les scanners et le travail de laboratoire. L'hôpital a dû payer une rançon de 17 000 dollars en bitcoins pour pouvoir reprendre le contrôle du système informatique. Ces attaques "ransomware" mettent en lumière la fragilité des banques de données médicales. [20] La sécurité des banques de données médicales est donc un problème crucial aujourd'hui. Le CNIL (Commission Nationale de l'Informatique et de Libertés), organisme français visant notamment à la protection des données personnelles est conscient de l'enjeu des données de santé. "Les données de santé sont des données à caractère personnel particulières car considérées comme sensibles. Elles font à ce titre l'objet d'une protection particulière par les textes (règlement européen sur la protection des données personnelles, loi Informatique et Libertés, code de la santé publique, etc.) afin de garantir le respect de la vie privée des personnes." [21]

LES DÉRIVES POSSIBLES DE CETTE APPROCHE DE LA MÉDECINE

L'eugénisme

L'eugénisme peut être désigné comme l'ensemble des méthodes et pratiques visant à améliorer le patrimoine génétique de l'espèce humaine. [24]

La médecine 4P, et notamment sa composante prédictive a un caractère dual. D'un côté, prédire l'avenir d'un bébé à sa naissance sur son risque de diabète ou de cancer pose un problème difficile de sciences humaines.

C'est la possibilité d'une dérive vers l'eugénisme. Mais de l'autre côté, prédire qu'une tumeur va être sensible à telle chimiothérapie comme on le fait pour les antibiotiques, ou prédire la toxicité d'un médicament par la pharmacogénétique sera un apport considérable. En tant que facteur accélérant des performances, l'utilisation du Big Data, se doit de répondre aux mêmes débats et interrogations éthiques sur d'éventuelles dérives, et, pourquoi pas, définir un cadre juridique et/ou moral dans lequel elles seraient prévenues.

CONCURRENCE OU COLLABORATION HOMME-MACHINE ?

A l'heure où les performances des algorithmes en analyse d'images médicales commencent à dépasser celle des humains [22] et où les machines sont capables de passer certains examens nationaux en médecine [23], il est légitime de se demander si le médecin et la machine sont amenés à être des concurrents ou bien des alliés. Dans ce contexte, il est bienvenu de rappeler qu'aujourd'hui, le problème de la généralisabilité des modèles est toujours un sujet de recherche. Ainsi, un algorithme très performant pour reconnaître un certain type de maladie pourrait devenir complètement inopérant en cas de mutation .

À LA FOIS LE DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES TECHNIQUES MÉDICALES COMME LE SÉQUENÇAGE DE L'ADN ET L'AMÉLIORATION DES ALGORITHMES DE PRÉDICTION ONT RÉVOLUTIONNÉ L'APPROCHE DE LA MÉDECINE TRADITIONNELLE. GRÂCE À LA MULTITUDE DE DONNÉES, TANT EN VOLUME QU'EN VARIÉTÉ, COLLECTÉES SUR UN INDIVIDU, IL EST DÉSORMAIS POSSIBLE DE DÉTECTER EFFICACEMENT DES MALADIES, PRÉDIRE L'ÉVOLUTION DE CES DERNIÈRES OU MÊME CHOISIR LE TRAITEMENT QUI CONVIENT LE MIEUX AU PATIENT. TOUTEFOIS, LA MÉDECINE PERSONNALISÉE, LORSQU'ELLE RENCONTRE LE BIG DATA EST CONFRONTÉE AUX MÊMES PROBLÉMATIQUES QUE CE DERNIER, NOTAMMENT EN TERME DE SÉCURITÉ DES DONNÉES. UNE ÉTHIQUE, CONCERNANT AUTANT LA RÉUTILISATION DES DONNÉES MÉDICALES QUE LE BUT PLUS GÉNÉRAL DE LA MÉDECINE PERSONNALISÉE EST À CONSTRUIRE AFIN D'ÉVITER DE TOMBER DANS LE PIÈGE DE L'OPTIMISATION DE L'ÊTRE HUMAIN.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Priorities for personalized medicine, President's Council of Advisors on Science and Technology, September 2008 : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwiF9_el6aDmAhXOxoUKHXCBbcQFjABegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fbigdatawg.nist.gov%2FPCAST_Personalized_Medicine_Priorities.pdf&usg=AOvVaw3uU47NqnVCRfuKLZEdr9M0
- [2] Médecine personnalisée, définition Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9decine_personnalis%C3%A9e.
- [3] Dossier de Presse du Colloque sur la médecine personnalisée en France, 8 Décembre 2015 : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwixorHK56DmAhVJSxoKHQA-BMwQFjAEegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.genopole.fr%2FIMG%2Fpdf%2F20151208_dp_mp.pdf&usg=AOvVaw1c6zQQEOGBpSs5sjchEUAH
- [4] Jean-Yves Nau, De quoi la «médecine personnalisée» est-elle véritablement le nom ?, Rev Med Suisse 2015; volume 11. 1868-1869
- [5] *Me* medicine could undermine public health measures, 11 sept 2013, Donna Dickenson, The New Scientist : <https://www.newscientist.com/article/mg21929340-200-me-medicine-could-undermine-public-health-measures/>
- [6] Stratified, personalised or P4 medicine: a new direction for placing the patient at the centre of healthcare and health education (Technical report). Academy of Medical Sciences. May 2015. Retrieved 6 January 2016: www.acmedsci.ac.uk/download.php?f=file&i=32644
- [7] Le Big Data au service de solutions de santé personnalisées ?, Sanofi, 19 Décembre 2018 : <https://www.sanofi.com/fr/science-et-innovation/le-big-data-au-service-de-solutions-de-sante-personnalisees>
- [8] Aurélie COULON, A l'ère de la médecine du Big Data, Le Temps, 3 Avril 2014 : <https://www.letemps.ch/sciences/lere-medecine-big-data>
- [9] The Cost of Sequencing a Human Genome, National Human Genome Research Institute : <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Sequencing-Human-Genome-cost>
- [10] Site internet de Medicea : <https://www.medicea.com/unid-asi/>
- [11] CEA, Découvrir et comprendre : l'essentiel sur l'ADN et la médecine génomique personnalisée : <http://www.cea.fr/comprendre/Pages/sante-sciences-du-vivant/essentiel-sur-adn-et-medecine-genomique-personnalisee.aspx>
- [12] Ministère des Solidarités et de la Santé, Plan médecine France génomique 2025 : <https://solidarites-sante.gouv.fr/systeme-de-sante-et-medico-social/recherche-et-innovation/france-genomique>
- [13] Propos de Clémence Demerlé, docteure en pharmacologie, recueilli le 15/12/19 par Mathilde Tordjeman.
- [14] Apprentissage supervisé, définition wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage_supervis%C3%A9
- [15] Régression linéaire, définition wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Régression_linéaire
- [16] Deep learning outperformed 136 of 157 dermatologists in a head-to-head dermoscopic melanoma image classification task article : [https://www.ejancer.com/article/S0959-8049\(19\)30221-7/fulltext](https://www.ejancer.com/article/S0959-8049(19)30221-7/fulltext)
- [17] Using recurrent neural network models for early detection of heart failure onset article : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5391725/>
- [18] Le Temps, casse-tête du cryptage de l'ADN : <https://www.letemps.ch/sciences/cassetete-cryptage-ladn>
- [19] Article du Monde, accord entre Google et plus de 150 hôpitaux aux USA : https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/11/12/l-accord-controverse-de-google-avec-plus-de-cent-cinquante-hopitaux-aux-etats-unis_6018878_3234.html
- [20] Article du Parisien, un hôpital verse une rançon à des hackers qui le pirataient : <http://www.leparisien.fr/faits-divers/los-angeles-un-hopital-verse-une-rancon-a-des-hackers-qui-le-pirataient-18-02-2016-5557129.php>
- [21] La CNIL, les données de santé : <https://www.cnil.fr/fr/sante>
- [22] Health imagine article, Deep learning beats radiologists at fibrotic lung disease classification : <https://www.healthimaging.com/topics/artificial-intelligence/deep-learning-beats-radiologists-fibrotic-lung-disease>
- [23] Pourquoi docteur article, l'IA va-t-elle rendre les médecins obsolètes ? <https://www.pourquoidocteur.fr/Articles/Question-d-actu/27379-L-intelligence-artificielle-va-t-elle-rendre-medecins-obsoletes>
- [24] Eugénisme, définition wikipédia : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Eug%C3%A9nisme>