



METIERS DE L'INGENIEUR

GENERALISTE : SANTE

RAPPORT

AUTEURS

ALMECIJA César
CAYATTE Emilie
CERIPA Mathilde
COMMUNAL Jean-Pierre Louis
DELARUE Pauline
DUPAU Jean-Edouard
GSTALTER Pierre-Louis
GUILLOT Paul
GUILLUY Baptiste
ISAMBERT Marion
PIERFITTE Auguste
POIRIER Antoine
ROYER DE VERICOURT Matthieu
THALLER Maëlle

ENCADRANTS

ABERGEL Daniel
BASSON Mickaël
BESSIS Alain
KLETZ Frederick
TAXY Guillaume

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
INTRODUCTION	2
PARTIE 1 : Le déroulement de la crise	4
1. La première vague.....	4
2. La deuxième vague	5
PARTIE 2 : La mise en place de solutions d'urgence : la télémédecine à travers l'exemple de Covidom	6
1. Présentation générale et fonctionnement des solutions digitales à la crise.....	6
2. La télémédecine, ses difficultés et les perspectives d'amélioration.....	8
PARTIE 3 : Des problèmes de communication et de coordination malgré de nombreuses solutions innovantes	10
1. Manque de communication et tensions entre les différents acteurs.....	10
2. Des solutions innovantes mais mal implémentées dans le système de santé	11
3. Stratégie de vaccination et communication.....	12
CONCLUSION ET CONTOURS DES MINIS-PROJETS	14
MINI-PROJET N°1 : Stratégie de vaccination	15
MINI-PROJET N°2 : Approche digitale de la gestion des affections et de la réduction des flux d'entrée à l'hôpital	20
MINI-PROJET N°3 : Etude économique	24
CONCLUSION	29
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXES	34

INTRODUCTION

La pandémie de Covid-19, dès le début de l'année 2020, a profondément bouleversé le monde entier, et la France n'y fait pas exception. Avec, à ce jour, près de 2,5 millions de cas en France pour 76,5 millions dans le monde, son système hospitalier, mais aussi l'ensemble de l'organisation de son territoire, ont été affectés par la crise et à plus forte raison lors de la première vague.

Pour bien comprendre les enjeux soulevés par la crise Covid, il faut comprendre le contexte dans lequel est arrivée cette dernière : le système de santé français, sa structure, ses acteurs, son financement et les problèmes auxquels il faisait face auparavant.

La santé représente 11% des dépenses de l'Etat français avec un budget de 208 milliards d'euros. La France est un des pays où la santé est la plus financée par l'Etat par l'intermédiaire de la Sécurité Sociale.

Le patient est mis au centre du système **[1]** par les principes sur lesquels celui-ci repose : liberté de choix pour les patients, d'installation pour les professionnels, égalité d'accès aux soins, information et transparence sur les décisions, responsabilisation croissante des acteurs de soins (volonté que les patients deviennent responsables de leur prise en charge), solidarité nationale et malgré une centralisation historique des décisions, une tendance à la décentralisation (par régions par exemple avec la création des ARS, Agences Régionales de Santé).

Le système de santé français est un système articulant de nombreux acteurs très différents (corps médical, agences sanitaires, acteurs industriels et laboratoires, payeurs, institutions) **[Annexe 1]**. Il y a de plus une séparation très marquée entre les différents domaines de la médecine. On distingue dans l'organisation du système trois domaines bien distincts **[14]** : la médecine de ville (médecins généralistes, dentistes, pharmaciens, etc.), le secteur hospitalier, qui regroupe les hôpitaux publics et les cliniques, et le secteur médico-social, qui comprend notamment les EHPAD (Etablissement Hospitalier pour Personnes Âgées Dépendantes). Alors que les collectivités locales sont chargées d'organiser l'aspect social du système, c'est l'État (par l'intermédiaire des ARS) qui coordonne le sanitaire. Cette scission est juridique, mais aussi apparente dans la pratique. Ainsi, par cette organisation apparaissent dès à présent des enjeux de communication et de coordination entre ces acteurs. Le système de financement actuel (T2A, tarification à l'activité) a pour objectif de renforcer cette coordination puisqu'il ne finance pas spécifiquement un acteur **[13]**. En effet, chaque fois qu'un hôpital reçoit un patient hospitalisé par exemple, c'est l'assurance maladie qui paye un montant fixe, décidé par un arrêté du Ministère de la Santé et celui des Finances, via le mécanisme des GHS, Groupes Homogènes de Séjours, qui correspond souvent au tarif d'un GHM (Groupe Homogène de Malades) **[34]** dans lequel un patient est classé en fonction de sa/ses pathologie(s). L'ensemble des professionnels de santé ayant pris en charge ce patient sera alors rémunéré grâce à ce forfait. Cependant, ce système a ses limites et est fortement critiqué par les personnels de santé.

De plus, l'hôpital est dans un contexte de réduction capacitaire depuis plusieurs années, à la fois à cause de l'évolution et de la modernisation des prises en charge (qui permettent la prise en charge à domicile) et du développement de l'ambulatoire, mais aussi des réductions budgétaires imposées par l'Etat. Ainsi, le nombre de lits d'hospitalisation complète est passé de 415 000 à 395 000 entre 2013 et 2018.

Enfin, l'hôpital public français souffre d'un problème d'attractivité par rapport aux médecins. Ces derniers estiment en effet que leurs rémunérations ne sont pas suffisantes et que le système hospitalier manque de souplesse, dégradant leurs conditions de travail. Ces revendications ont participé au déclenchement de nombreuses manifestations de soignants en 2019, et ont provoqué le départ de nombreux soignants de l'hôpital public vers des cliniques privées (à titre d'exemple, il manque 200 infirmières à la Pitié Salpêtrière).

Ainsi la crise sanitaire arrive dans un contexte où l'hôpital public est en crise depuis plusieurs années de par son système de financement, les conditions de travail qu'il offre, son système de gouvernance (sentiment des services médicaux de ne pas être suffisamment impliqués dans les décisions de la gouvernance de l'hôpital) mais aussi ses difficultés à fidéliser les professionnels de santé. Puis intervient la crise sanitaire. Début mars, l'essentiel de la gestion repose sur les hôpitaux, qui sont rapidement dépassés par la situation (incapacité à accueillir les patients Covid et non Covid). Des solutions d'urgence émergent alors, notamment Covidom, une application de télésurveillance ayant pour but de réduire les flux d'entrée dans les hôpitaux.

C'est dans ce contexte que les médecins Dr Alexandre BLEIBTREU, infectiologue, Service des maladies infectieuses et tropicales, groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière, et Dr Aurélien DINH, infectiologue hôpital Ambroise Paré ont fait appel à nous, élèves-ingénieurs des Mines, pour porter un regard neuf sur la situation et pour, à partir d'une analyse du projet Covidom et son efficacité, étudier la possibilité de prolonger cette approche en dehors d'une situation de crise sanitaire afin si possible d'en déduire un outil exploitable pour d'autres pathologies. Pour répondre à cette question, nous avons bénéficié d'un cycle de conférences des médecins Alexandre BLEIBTREU et Aurélien DINH mais également d'autres acteurs qui jouent chacun un rôle dans la connaissance et la gestion de cette épidémie : des médecins, Dr Michèle LEVI-SOUSSAN, dir. Unité mobile d'accompagnement et de soins palliatifs, hôpital de la Pitié-Salpêtrière Dr Koré MOGNON, Médecin généraliste, coordinateur de maison de santé, mais aussi des professeurs (Josselin LEBEL, MD, PhD, Maître de Conférences des Universités de médecine générale, UFR de Médecine - Université de Paris, Pr. Anne-Geneviève MARCELIN, Faculté de Médecine Sorbonne Université, Laboratoire de Virologie, Hôpital Pitié-Salpêtrière et Institut Pierre Louis d'Epidémiologie et de Santé Publique (IPLESP) et Pr Patrick JOURDAIN, Service de cardiologie Tri-site Bicêtre – Bécélère-P. Brousse, AP-HP. Université Paris Saclay), ainsi que des acteurs du milieu hospitalier (Alexandre FARNAULT, Directeur du déploiement des politiques numériques et des partenariats ARS IdF, Marie-Anne RUDER, dir. Groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière et Eva DANTON, Infirmière de coordination, Service maladies infectieuses, GH Pitié-Salpêtrière) et Nicolas SCHMIDT, ingénieur qui travaille sur la plateforme Covidom.

Après ce cycle regroupant des acteurs au cœur de la gestion française de la pandémie, qui nous ont présenté le fonctionnement du système hospitalier français et les défaillances connues et récentes, mises au jour par cette pandémie, nous avons pu dans un premier temps retracer synthétiquement le déroulement de la crise, puis il a été possible d'identifier des problèmes de fond du système français de soins. Alors différentes problématiques se sont posées : **Comment améliorer ce que propose Covidom et éventuellement l'étendre à d'autres maladies ? Comment intégrer la télémédecine de manière pérenne dans le système de santé ? Comment articuler les différents organismes de santé pour sortir de cette crise ? Comment orienter les solutions ?**

En distinguant les questions sur lesquelles nous pouvions - en tant qu'étudiants ingénieurs - avoir un réel apport et celles qui n'étaient pas de notre ressort, nous avons décidé de donner naissance à trois mini-projets : un premier qui cherche à définir une stratégie de vaccination qui permettrait d'épargner au possible le système de soins tout en esquissant une sortie de crise. Le deuxième projet vise à proposer la maquette d'une plateforme digitale qui chercherait à pérenniser et étendre le système mis en place par Covidom. Le troisième et dernier projet consiste lui à étudier la viabilité économique d'une telle plateforme et de la télémédecine en général.

PARTIE 1 : Le déroulement de la crise

Afin de mieux saisir les problématiques et les enjeux que la crise sanitaire a su mettre en lumière, il faut comprendre son évolution et la façon dont les acteurs du système de santé y ont réagi. C'est ce que nous proposons ici avec un descriptif pas à pas, ayant pour but de faire ressortir les éléments les plus importants.

1. La première vague

L'historique des coronavirus en France permet de comprendre le début difficile de gestion de la crise. Avant le SARS-COV-2, la France a connu, pendant les dix dernières années, un des précédents coronavirus appelé **MERS** : Middle East Respiratory System. Venant des dromadaires, il émerge en 2012 au Moyen Orient, où apparaissent les premiers cas de syndromes respiratoires. L'hôpital la Pitié-Salpêtrière est un ESR (Établissement de Santé de Référence), et c'est donc à cet hôpital qu'on confie la tâche de réagir à des situations médicales exceptionnelles qui nécessitent une expertise. Ainsi, tous les ans, au retour du pèlerinage de La Mecque, l'hôpital fait état de quelques suspicions de cas : pendant un mois, un processus de surveillance se met en place, créant un flux de personnes important à la Pitié-Salpêtrière, et finalement, il n'y a quasiment jamais de cas avéré : en France on recense seulement 2 patients ayant été atteints par ce coronavirus depuis 2012 [1]. Ainsi des procédures très lourdes sont mises en place pour s'occuper de patients qui ne sont finalement pas atteints de la maladie.

La première vague est caractérisée par l'enchaînement brusque d'événements bouleversant le système médical, économique et le quotidien de la population. Même si les premières alertes provenant de Chine commencent entre le 31 décembre et le 15 janvier, l'expérience du MERS, la sous-estimation des performances des systèmes de santé orientaux (en croyant que les pays européens gèreraient mieux la crise avec un meilleur système de soins) et le manque d'informations poussent les différents acteurs médicaux et politiques à tenir un discours rassurant, sans méfiance, presque dans le déni, alors même que l'Italie est touchée [1]. Cette attitude a conduit ensuite, au plus fort de la crise, à de nombreuses **décisions prises en urgence**, à un manque de matériel, de personnel, de lits et même de médicaments. Ainsi, pendant la première vague, 5 000 lits de réanimation supplémentaires ont dû être improvisés pour les malades de la Covid à l'échelle nationale, en plus des lits pérennes déjà pris pour soigner les cas graves [36]. Le 20 janvier apparaît le premier cas officiel en France. Les premiers problèmes rencontrés sont la saturation du SAMU puis celle des urgences. [1] Il est alors nécessaire pour tous les acteurs de santé de penser une réorganisation globale mais aussi au sein de chaque hôpital. On peut ainsi constater de grands **changements d'organisation** [8], accompagnés de la formation de réanimateurs, de bénévoles et d'une mobilisation sans précédent des ressources humaines. Cependant, face au débordement des urgences et des services de réanimation, le confinement général est instauré le 16 mars.

Pour remédier à cette contrainte exercée sur le milieu hospitalier, des solutions d'urgence - autres que le confinement - sont également développées. Ces solutions, s'appuyant sur des structures télé-médicales, permettent un meilleur suivi des patients Covid. C'est ainsi que Covidom, une plateforme de suivi télé-médical sur laquelle nous reviendrons ultérieurement, est créée et utilisée dès le 9 mars à l'hôpital Bichat et à la Pitié-Salpêtrière avant d'être étendue à l'Île-de-France. 50 000 utilisateurs y sont inscrits en un mois.[2]

Outre l'engorgement des urgences, les hôpitaux font face à plusieurs problèmes : le manque de matériel, et **l'incapacité de gérer les patients Covid et non Covid en même temps**, ce qui conduit à de nombreuses déprogrammations d'opérations, parfois de la part des médecins, mais souvent de la part des patients eux-mêmes qui craignent le milieu hospitalier. Il y a aussi le problème des tests : comment tester rapidement les patients tout en conservant une sensibilité correcte ? Au début, par manque de capacité, on ne teste que les malades hospitalisés. Ceci implique que pendant la première vague, seul 0.05% de la population ont été testés positifs alors que l'on estime aujourd'hui que le véritable nombre de cas pendant la première vague était 10 à 20 fois plus important que le nombre de cas officiels [1]. Pour tenter d'améliorer la situation, des cellules de crise entre les différents acteurs de l'hôpital sont mises en place pour prendre des décisions quotidiennes [8]. Certaines cliniques privées viennent par ailleurs en aide aux hôpitaux. Il y a enfin des questions éthiques soulevées par l'interdiction des visites car une politique zéro tolérance est instaurée pour les visites de malades Covid, même en fin de vie.

La première vague s'accompagne d'un bilan lourd, sur le plan médical aussi bien qu'économique.

Ainsi l'hôpital a « perdu » 2 millions de séjours entre mi-mars et fin juin. La baisse des activités n'est pas restreinte à l'hôpital : 39% en médecine, 53% en ambulatoire, 58% en chirurgie hospitalisation complète et jusqu'à 80% en chirurgie ambulatoire. A titre d'exemple, 1 patient sur 2 n'a pas eu sa transplantation cardiaque [13]. Les professionnels de santé établis en ville (médecins généralistes, kinés, ...) – mal équipés en termes de matériel sanitaire – se mobilisent ou choisissent la téléconsultation : le nombre de téléconsultations a été multiplié par 5 pendant la première vague, ce qui représente un progrès pour la télémédecine [8].

Sur le plan économique, les hôpitaux ont eu pendant la première vague 900 millions d'euros de surcoût (test, achat, masque, personnel) [13]. Cette première vague a donc remis en cause le système de financement actuel, qui était d'ores et déjà questionné par de nombreuses instances décisionnelles. A titre d'exemple, la Pitié-Salpêtrière a dépensé une somme correspondant à 1/10 des investissements annuels sur cette première vague (6 millions de dépenses en exploitation et 5 millions d'investissements) [8].

Enfin, une enquête menée par l'OMS dans 105 pays révèle que 90% des pays ont connu des perturbations dans leur systèmes de santé à cause de cette crise. Parmi les domaines les plus fréquemment perturbés, on compte notamment les services de proximité, les services en centres de soins, la vaccination systématique, la planification familiale et la contraception, le traitement des troubles de la santé mentale et le diagnostic et traitement du cancer [10].

2. La deuxième vague

Après une période d'inter crise pendant laquelle les autres médecines ont pu reprendre légèrement, la nouvelle vague commence à émerger. Pourtant, malgré le caractère prévisible de cette vague, même si certaines failles ont été comblées (par exemple la quantité de tests réalisés qui a beaucoup augmenté entre les deux vagues), on voit encore certaines questions traitées dans l'urgence sans tenir compte des leçons de la première vague.

D'après le Dr Anne-Geneviève Marcelin, l'enjeu des tests est encore présent [4]. Il faut d'abord tester correctement, c'est-à-dire mieux former le personnel chargé de réaliser les tests. Il faudrait aussi changer de stratégie : passer de "tester, tracer, isoler" à "tracer, isoler, tester", mais également améliorer les campagnes de dépistage. D'autre part, tous les tests ont leurs faiblesses :

- Le test PCR fonctionne avec un système de cycles d'amplification. Si, au bout d'un certain nombre de cycles, aucune trace de l'ARN du virus n'a été détectée, on considère que le patient testé est négatif. Le résultat est obtenu au bout de quelques jours dans la grande majorité des cas. C'est donc un délai long, qui limite la prise de décision rapide. De plus, le succès du test est fortement soumis à la compétence du testeur. Nombreux sont les cas de patients testés négatifs car le test a été mal réalisé. [4]
- Le test antigénique est aussi fondé sur des cycles d'amplification mais a une sensibilité plus faible, ce qui fait qu'une charge virale peu élevée sera impossible à détecter. Le bilan de ce test est donc mitigé : il permet un résultat rapide (quelques dizaines de minutes) mais ses chances de succès à la détection sont faibles (50% à 70%). [4]
- Le test sérologique permet la détection des anticorps et donc de savoir si la personne a contracté la Covid au cours des derniers mois. Néanmoins, le patient peut être positif mais ne pas avoir développé d'anticorps au moment où il effectue le test. Donc la prise de sang ne permet pas de détecter la présence du virus de manière précoce, à l'inverse des tests PCR ou antigénique. [4]

A la date du 15 novembre, on compte **2 millions de cas positifs en France** depuis le début de la crise [1]. La stratégie face au test a évolué : tout le monde est testé pour casser les chaînes de transmission au plus tôt. A ce titre, le nombre de tests hebdomadaires est passé de quelques dizaines de milliers, à plus d'un million [35]. On a aussi progressé sur les informations disponibles à propos des asymptomatiques (on sait maintenant qu'ils sont contagieux), des temps d'incubation, de l'immunité.

Finalement, les questions qui ressortent au vu des événements des deux vagues sont nombreuses. Comment **éviter la saturation des hôpitaux**, sans pour autant recommander aux malades de renoncer à leur suivi ? Comment **garantir un accès rapide aux soins** dans le cas où la santé d'un patient se dégrade subitement ? Ce dernier enjeu est particulièrement préoccupant pour la Covid, un patient pouvant être stable jusqu'au jour 7 de la contamination, puis se retrouver soudainement en grave danger.

PARTIE 2 : La mise en place de solutions d'urgence : la télémédecine à travers l'exemple de Covidom

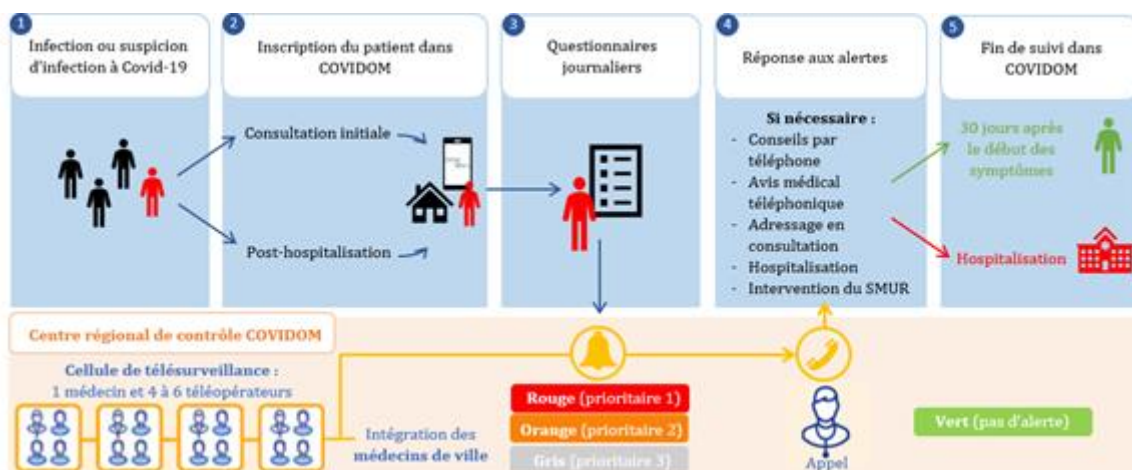
1. Présentation générale et fonctionnement des solutions digitales à la crise

La partie I a mis en lumière l'impossibilité pour le système français de prendre en charge tous les patients atteints de la Covid, l'engorgement des hôpitaux, notamment des services d'urgence et de réanimation et la fulgurance de l'aggravation des symptômes, qui rendait difficile la possibilité de renvoyer les patients chez eux lorsque leurs symptômes étaient bénins. C'est ainsi qu'est née l'idée de **dispositifs de télésurveillance des patients** atteints de la Covid.

Deux solutions ont été développées en Île de France au début de la crise. La première, e-Covid, est un module ajouté à Terre'e-santé, une application de suivi et d'aide pour les médecins et leurs patients, développée depuis plusieurs années par l'ARS. La deuxième, **Covidom**, est une application co-construite par l'APHP et la CNAM. Face au succès modéré d'e-Covid (quelques dizaines d'inscriptions seulement), l'ARS a estimé judicieux d'utiliser plutôt Covidom. Covidom a finalement eu beaucoup plus d'impact que e-Covid grâce à sa plus grande simplicité, et c'est pourquoi nous concentrerons notre analyse sur Covidom.

Pour développer cette solution, l'APHP a fait appel à la société NOUVEAL, entreprise de digitalisation de la santé, qui a dialogué avec les médecins et le corps médical puis a proposé une application en 5 jours. Utilisée dès le 9 mars à Bichat et à la Pitié-Salpêtrière, puis étendue à l'Île-de-France, 50 000 malades ont été inscrits en l'espace d'un mois. A la fin du mois de novembre, 700 000 patients avaient été inscrits en cumulé sur Covidom [2].

Comment fonctionne concrètement ce dispositif ? Il couple une application, utilisable par le patient et les différents acteurs de la santé, et une plateforme d'appels téléphoniques, composée de cellules qui regroupent un médecin et 4 à 6 téléopérateurs. Un patient peut être pris en charge dès lors qu'il est suspecté, et son suivi s'arrête après son rétablissement ou son hospitalisation (ou après 30 jours si le dossier n'est pas fermé manuellement). Si besoin, il peut être à nouveau suivi, plus tard. L'inscription peut être réalisée par son médecin traitant, à la suite d'une consultation, ou par l'ARS Île de France à la suite d'un test positif dans un centre de dépistage. Une fois le patient intégré dans le système de suivi, il reçoit des questionnaires quotidiens et ses réponses (ou absence de réponse) entraînent, ou non, le déclenchement d'alertes en fonction de l'état de santé détecté. Si une alerte est déclenchée, la cellule de télésurveillance est prévenue et prend en charge le patient, pour le diriger selon les cas vers l'hôpital ou son médecin traitant, ou même appeler les secours. Le médecin traitant peut aussi participer à la prise en charge s'il le souhaite.

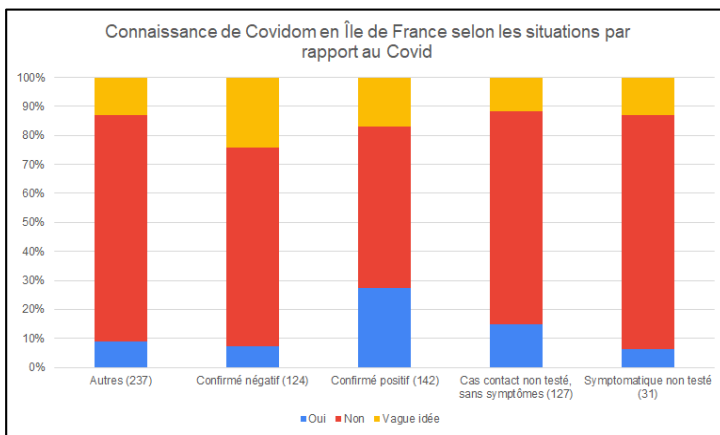
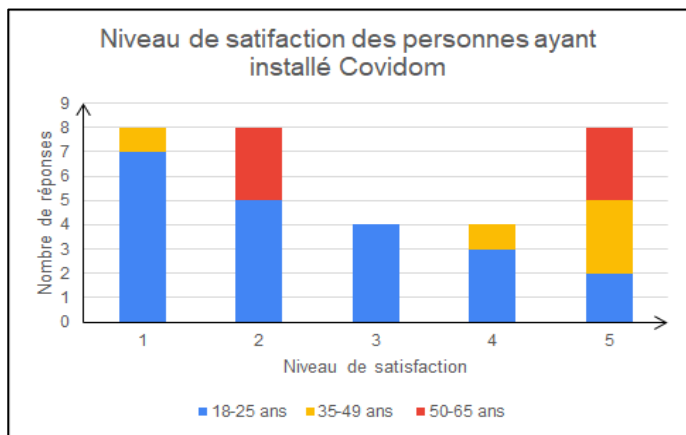
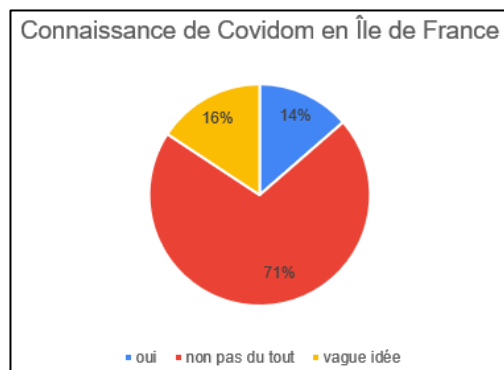
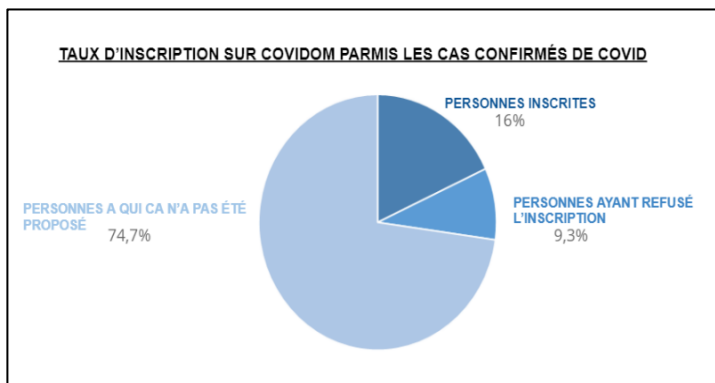


Fonctionnement des alertes sur Covidom

Le but premier de l'application est bien de désengorger les hôpitaux, pas de les remplacer. En transférant le contrôle du patient vers une cellule dédiée et pouvant opérer à distance, la plateforme a considérablement amélioré la situation : une enquête de satisfaction réalisée auprès des patients suivis a en effet dévoilé que

Covidom aurait divisé par deux les potentielles sollicitations des urgences hospitalières [2]. Sa simplicité, son ergonomie, son adaptabilité ont aussi été des points positifs relevés par les utilisateurs [7]. De plus, la réanimation de la Pitié-Salpêtrière aurait été largement dépassée sans l'implémentation en urgence de Covidom [2] : rappelons-le, aucun patient n'a été refusé de la Pitié-Salpêtrière lors de la première vague, ce qui n'est pas le cas des autres établissements dans d'autres "zones rouges" qui n'avaient pas mises en place Covidom [8]. Au fur et à mesure, différents modules s'y sont greffés, comme Coviconact pour recenser et suivre les cas contacts pendant leur semaine, Covisan, pour dépister les familles et proposer de l'aide à l'isolement, ou Covid-O₂ pour suivre les patients oxygénés à domicile après leur séjour à l'hôpital, optimisant ainsi les sorties des hôpitaux.

En complément des enquêtes de satisfaction qui ont été réalisées à propos de Covidom, nous avons réalisé notre propre enquête, afin d'en déterminer plus précisément les limites. Nous avons reçu plus de 1000 réponses qui ne représentent qu'un certain échantillon de la population (une grande partie d'étudiants des Mines et de leurs proches), et ne concernent quasiment pas de personnes à risque (65 sur 1000 se considèrent à risque), mais qui sont tout de même révélatrices.



Résultats du sondage réalisé par nos soins

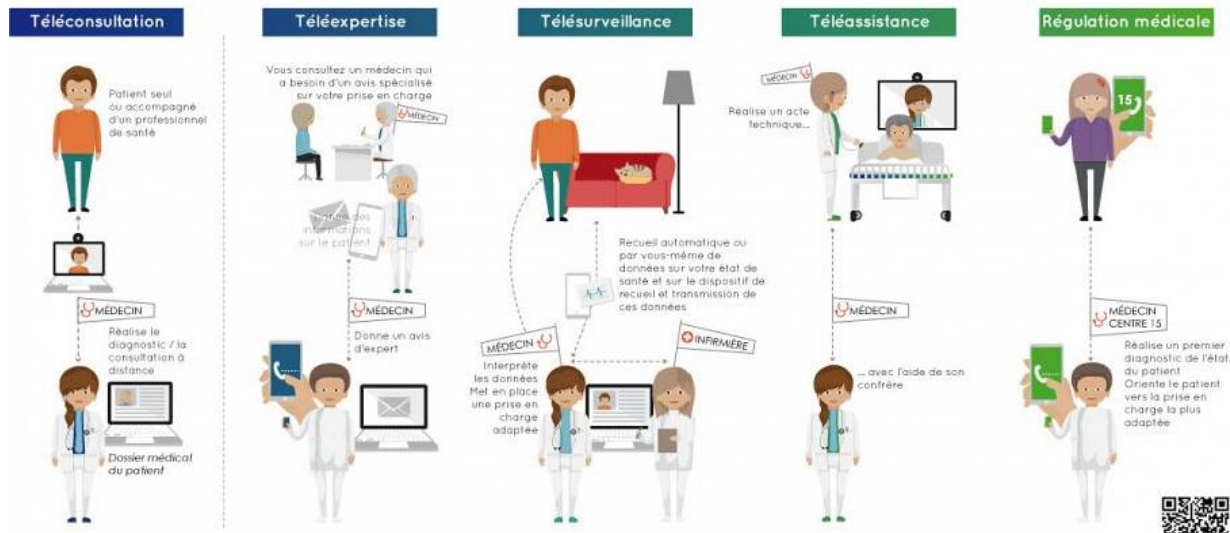
Cette enquête montre un manque criant d'informations concernant l'application Covidom : beaucoup ne la connaissent pas, peu ou mal, et sont donc réticents à l'utiliser, ce qui témoigne d'une mauvaise communication au sujet de cette application. Il faut ainsi distinguer inscription et suivi : le patient n'est pas obligé d'activer son compte, même s'il est inscrit dans les registres de Covidom. La différence est conséquente, car sur plus de 700 000 patients inscrits, seuls 276 000 ont été effectivement suivis par la plateforme (chiffres datant de fin novembre) [2]. Le Dr Aurélien Dinh explique en effet que les patients contactés par l'ARS et à qui on a moins bien expliqué le principe de Covidom ont eu moins tendance à s'inscrire sur l'application qu'après une consultation chez un généraliste [2].

Ainsi, la crise Covid a été marquée par l'émergence de plateformes numériques, d'initiatives locales pour la plupart, qui ont permis de suivre des patients Covid à distance pour désengorger les hôpitaux et relâcher la pression sur le personnel soignant.

2. La télémédecine, ses difficultés et les perspectives d'amélioration

Comme on l'a vu précédemment, la **crise Covid a accéléré brusquement l'utilisation de la télémédecine en France**, notamment pendant la première vague. Tout d'abord, il faut distinguer la télémédecine - l'utilisation de l'électronique et des outils numériques pour aider aux soins ou donner des soins quand il y a de la distance entre les personnes concernées (médecin-médecin ou médecin-patient) - et l'e-santé, qui est basée sur la vente d'objets connectés au patient, ainsi que leur utilisation [7]. Contrairement à cette dernière, qui est financée par le patient et ses envies, la télémédecine est très réglementée et financée par les fonds publics et l'Assurance Maladie. Notons que la télémédecine se distingue de la thérapeutique : elle cherche à restructurer le parcours de santé du patient, et non pas à s'ajouter à ce dernier [7].

Elle se décline en 5 actes bien distincts, définis en 2013, présentés sur ce schéma [7] :



Les 5 Actes de la télésanté (source [7])

Pendant la crise, la télémédecine a notamment été revalorisée aux yeux des praticiens et des hôpitaux [7]. Elle a en effet révélé de nombreux avantages dans un contexte tendu pour l'hôpital public, où les coûts de transport des patients sont de plus en plus importants, notamment relativement au prix de la consultation (85€ de transport pour une consultation à 25€ par exemple) et où on observe une spécialisation de plus en plus pointue des médecins, ce qui les rend moins polyvalents [7].

De nombreuses solutions digitales pour la médecine existent déjà, comme le logiciel Agathe, qui permet aux hôpitaux d'Île de France de suivre l'ensemble des patients hospitalisés, et offre un visuel de ce qu'il se passe au sein de chaque service, permettant de préprogrammer les sorties et de connaître les capacités des services. C'est donc un logiciel qui fonctionne en temps réel. Ce logiciel existait avant l'ère Covid mais a été fortement adapté à la situation, à l'aide notamment de codes couleurs pour repérer les patients Covid [10]. Dans le Grand-Est, les hôpitaux ont mis en place une plateforme similaire sur internet, accessible par tous les hôpitaux de la région. La région a ainsi pu mieux gérer ses malades [10]. Un autre exemple de télémédecine est celui de CardioMems, qui permettait de mesurer chaque battement de cœur et offrait la possibilité au cardiologue d'adapter le traitement : ce service a permis de réduire le nombre d'hospitalisations [7].

Devant un tel potentiel et une telle efficacité, la France a lancé il y a quelques années un programme, ETAPES (Expérimentations de Télémédecine pour l'Amélioration du Parcours en Santé), pour développer la télémédecine [7]. Ce dernier consiste à permettre une même rémunération sur les consultations et les téléconsultations, tester la télésurveillance par les spécialistes sur les patients les plus sévères (ceux qui coûtent le plus cher) ce qui permettrait une estimation des économies permises par cette technologie.

Bien qu'elle apparaisse comme la solution idéale pour gérer des crises comme celle de la Covid, ou même transformer le système de santé en un organisme plus uni et performant, la télémédecine n'est pas à l'abri d'un certain nombre de difficultés, qu'il convient de relever et d'éviter au maximum.

Tout d'abord, la mise en place d'outils numériques s'accompagne souvent d'une automatisation systématique qui prend le pas sur l'être humain. Ainsi les enquêtes de satisfaction liées à Covidom ont relevé le fait que les patients ne se sentent pas assez accompagnés lors du suivi médical : le sentiment d'être suivi par une application plutôt qu'un médecin et celui d'abandon à la fin du programme de 30 jours génère beaucoup de frustration chez les utilisateurs, qui vont jusqu'à appeler les téléopérateurs pour être rassurés [2] : ce constat de manque de suivi psychologique est un problème à résoudre. Les interactions à distance ne permettent pas, du moins pour l'instant, de saisir totalement l'état mental du patient. Il y a également au-delà du suivi psychologique toute la question du suivi post-opératoire. De nombreux patients nécessitent davantage de suivi qu'un simple contrôle journalier des signes vitaux. Cela passe notamment par un service d'infirmières à domicile, de rééducation, etc. Pour l'instant, la télémédecine ne prend pas assez en compte ces aspects [10]. Par ailleurs, l'utilisation de la télémédecine s'appuie sur la collaboration du patient, qui doit être actif [7], c'est-à-dire qu'il faut le former, l'éduquer, afin qu'il ait une bonne compréhension de la plateforme et de son traitement médical.

Un autre défi de la télémédecine est celui de l'accessibilité. Il faut considérer les patients en situation précaire (vie en foyer dans des espaces restreints, migrants, SDF), qui n'ont pas forcément accès à la télémédecine, qui ne peuvent pas être suivis à domicile, mais qu'il est essentiel de prendre en compte [10].

Bien que Covidom soit considéré comme un succès (dans la mesure où l'application a permis d'éviter un grand nombre de visites aux urgences et d'hospitalisations), son utilisation n'a pas fait l'unanimité parmi les acteurs de la santé. Certains médecins de ville se sont sentis trop peu intégrés au fonctionnement de la plateforme [3] [12]. Il semble alors qu'un des enjeux de la télémédecine est aussi d'arriver à partager efficacement la prise en charge du patient.

Enfin, la télémédecine fait face au problème du secret médical et du partage des données. Il est de plus en plus difficile de rétablir une confiance avec les patients vis-à-vis de la sécurité de leurs données : nous avons par exemple remarqué en analysant notre enquête (mentionnée à la section précédente) qu'un certain nombre de patients avaient refusé de s'inscrire sur Covidom par manque d'information sur le devenir de leurs données personnelles. De plus, certains médecins considèrent que, comme on est en "période de guerre", tout est permis alors que ce n'est pas vrai (selon le Dr Gabriel Nisand, de nombreuses lois sur les données ont été transgressées alors qu'il n'y avait pas nécessité [33]). La façon de protéger les données efficacement, tout en permettant la communication, est encore à construire. Le Dr Nisand propose une cellule de protection des données dans chaque établissement. Elle serait chargée de tout surveiller et de tout référencer. En cas de crise, elle analyserait les demandes de partage de données médicales. Ce qui est crucial, c'est surtout de distinguer les cas où l'usage de données nominatives est nécessaire des cas où il ne l'est pas. Dans un tel cadre, le développement d'une télémédecine reposant sur un partage assez libre des données médicales semble compromis. Une solution qui se voudrait centralisatrice de toutes les données, pour améliorer l'efficacité des soins, se heurterait à des problèmes législatifs. C'est encore un autre aspect essentiel à considérer lors du développement de la télémédecine [33].

Il existe de nombreuses autres pistes à explorer pour l'amélioration de la télémédecine, notamment la gestion des alertes qui en est un des plus gros chantiers [2]. En effet, l'alerte implique théoriquement un changement d'attitude médicale, il ne faut donc ni les sous-calibrer (au risque de mettre en danger le patient), ni les surcalibrer (au risque d'épuiser le médecin et d'émousser sa vigilance). Sur Covidom, les médecins ont ainsi explicitement demandé de garder une compréhension sur la raison du déclenchement d'alertes. La télémédecine repose également sur la responsabilisation du patient (remplissage consciencieux des questionnaires par exemple) [7]. De plus, après une alerte, il faut orienter le patient vers la bonne personne ou la bonne institution, et donc associer des services supplémentaires (agenda médical, logiciel de suivi médical, agenda du patient par exemple).

En conclusion, bien que la télémédecine implique une modification de l'organisation des soins qui permet de faciliter le travail des médecins et augmenter le bien-être des patients, il y a de nombreux aspects qu'elle ne prend pas encore en compte. Finalement, lors de la mise en place d'une telle solution, il ne faut pas oublier **la place du patient**, et plus généralement celle de l'humain.

PARTIE 3 : Des problèmes de communication et de coordination malgré de nombreuses solutions innovantes

La partie précédente met l'accent sur le développement de solutions pour répondre aux enjeux soulevés par la crise sanitaire. Néanmoins, cette crise a aussi su rendre visible les limites et les failles préexistantes du système de santé français : un manque de communication et de coordination entre les différents acteurs du domaine et certains conflits d'intérêt qui sous-tendent les interactions.

1. Manque de communication et tensions entre les différents acteurs

La séparation historique entre médecine de ville, secteur hospitalier et secteur médico-social – comme évoquée en introduction – est la cause de nombreux problèmes de coordination et de communication entre ces secteurs :

- Le **manque de dialogue** entre secteur hospitalier et secteur médico-social peut entraîner une mauvaise prise en charge des patients, par exemple pour des patients âgés : le patient est accueilli aux urgences, mais l'hôpital n'a pas à le garder une fois sa prise en charge effectuée, et le fait raccompagner chez lui, même tard dans la nuit, explique Alexandre Farnault [6]. Un contact post-hospitalisation entre l'hôpital et une structure adaptée comme un EPHAD pourrait être une solution pour la suite du suivi.

- Nous avons également vu en II. que la gestion de la crise a déçu de nombreux médecins généralistes, qui se sont sentis délaissés par leurs patients et exclus des applications de suivi comme Covidom. Ils avaient l'impression d'être hors de la boucle de suivi, ce que soulignaient notamment les Dr. Josselin Lebel, médecin généraliste du 18ème arrondissement de Paris [3], et Dr Koré Mognon [12]. En effet, à moins que les patients aient été inscrits par leur médecin généraliste sur la plateforme, ces derniers ne recevaient pas les alertes concernant leurs patients.

La communication serait donc défaillante entre professionnels de santé. Mais elle peut aussi l'être vis-à-vis du patient. Par exemple, certains patients "non-Covid" n'osent pas consulter par peur de contracter des infections nosocomiales, quitte à accumuler des problèmes de santé par la suite [1]. La réticence des patients est liée à un manque de communication à leur égard, à propos de la sécurité et des moyens mis en place chez les médecins de ville notamment. La quantité de patients dans cette situation demeure incertaine d'après Dr Alexandre Bleibtreu, mais il est tout à fait possible qu'elle soit quantifiée plus tard, après la crise (le nombre de cancers détectés est en dessous de la moyenne, par exemple).

De plus, les acteurs du système de santé ne sont pas tous des professionnels de santé. Avec l'ARS d'un côté - constituée pour la plus grande part d'administrateurs qui ne sont pas médicalement qualifiés - et les secteurs ambulatoires et hospitaliers de l'autre, la communication n'est pas seulement difficile, elle est tendue, comme le rappelle Alexandre Farnault [6].

Par exemple, le développement de Covidom - parallèlement au développement de e-Covid, dont la création a été mentionnée précédemment - a été l'illustration des tensions préexistantes entre l'ARS et le secteur hospitalier. Il est compréhensible qu'il y ait concurrence entre les deux solutions : l'enjeu est économique, mais aussi politique [6]. Cependant, ce qui ressort de ce conflit est le manque d'une véritable écoute et d'un vrai dialogue. Il semble que la seule manière de faire entendre raison à l'autre soit de lui montrer concrètement, avec des chiffres, de le mettre face aux résultats. En l'occurrence, c'est de cette façon que Pr Patrick Jourdain décrit la "résolution" du différend entre partisans d'e-Covid et partisans de Covidom. De même, le cardiologue explique que ces conflits compliqueront sûrement le développement d'une application de télé-suivi à plus large échelle que Covidom (à savoir pour d'autres maladies) [7].

Néanmoins, alors qu'il est facile de prendre le bord des médecins, qui semblent plus proches de la situation sanitaire que les "technocrates" de l'ARS, pour reprendre les mots d'Alexandre Farnault [6], force est de constater

que l'organisation du système de santé repose également sur la capacité d'organisation de l'ARS. En effet, c'est bien cette agence qui est chargée d'adopter une vision d'ensemble, afin d'arriver à coordonner tous les acteurs - ce qui nécessite d'identifier avec précision les intérêts de ces mêmes acteurs.

Au-delà des conflits et des enjeux de pouvoir qui régissent l'interaction entre les différents acteurs, il est intéressant de relever que tous s'accordent sur le fait qu'il y a un **réel manque de communication et donc d'organisation**. L'enjeu est double : améliorer la communication, c'est améliorer la coordination mais aussi l'entente entre des acteurs qui ont le même but : construire un système de santé qui réussit à tous.

2. Des solutions innovantes mais mal implémentées dans le système de santé

Dans le tableau du système de santé dépeint jusqu'à présent, les failles et les écueils sont ce qui ressortent le plus. Cependant, la communication et l'organisation ont subi une évolution récente, qui témoigne de l'envie d'innover. Cette évolution est principalement une initiative de l'Etat, au travers des institutions préexistantes.

D'abord, l'organisation du système de santé est de plus en plus tournée vers la localité. Le débat entre les différents acteurs permet de fixer l'action des ARS : le plan régional de santé (PRS) [6].

Plus récemment, la création de nouvelles entités, les **CPTS**, a été l'occasion de renforcer les liens inter-médecins et de mieux coordonner la ville [3]. CPTS signifie Communauté Professionnelle Territoriale de Santé. Cette nouvelle structure vient rompre le fonctionnement d'un secteur ambulatoire cloisonné. En effet, la ville est un secteur où tous les médecins particuliers ont pour habitude de travailler de leur côté (ou presque). Les CPTS, au contraire, cherchent à générer un lien entre ces médecins. Elles proposent de regrouper les praticiens de ville sous une même bannière, organiser des actions communes. Une CPTS regroupe typiquement : des médecins généralistes, d'autres médecins (spécialistes), des IDEL (Infirmiers Diplômés d'Etat Libéraux, des Masseurs-kinésithérapeutes, des pharmacies, des laboratoires. Quand un médecin généraliste a besoin d'un spécialiste, il prend un rendez-vous en interne, explique Dr Josselin Lebel, médecin généraliste membre de la CPTS du 18ème arrondissement de Paris [3]. Les CPTS augmentent donc la rapidité, l'adaptabilité et l'efficacité de l'organisation au sein du secteur ambulatoire, ce qui est particulièrement utile dans une crise sanitaire que celle de la Covid.

Enfin, les dernières années ont aussi été marquées par la création de nombreuses **solutions de dialogue**. A l'origine de cette initiative se trouve l'Etat, qui investit chaque année dans le test d'innovations organisationnelles. Cette politique, appelée "Article 51", permet aux acteurs de proposer des solutions et de contribuer à leur développement. Le fonds d'innovation en santé était de 20 millions d'euros en 2018 [6]. Outre ce plan d'innovation, il existe déjà des idées ambitieuses, encore en cours de développement mais déjà fonctionnelles. Par exemple, Terr-eSanté, au-delà de développer une solution de e-santé censée être intéressante pour le patient comme pour le système de santé, favorise le partage d'informations et le dialogue rapide, facile et sécurisé des médecins à propos du traitement d'un patient.

Il y a donc un réel dynamisme de l'innovation, orchestré depuis plusieurs années par l'ARS notamment. Les idées sont prometteuses et nombreuses. Cela nous amène donc à nous demander pourquoi les solutions proposées n'ont pas résolu les problèmes pour lesquels elles sont conçues. Dans la pratique, en effet, ces solutions ne sont pas (suffisamment) utilisées, développées, voire même pertinentes. Pour le comprendre, il faut adopter le point de vue des praticiens.

Prenons l'exemple du poste d'infirmière de coordination [10]. L'organisation des soins à l'hôpital est répartie entre différents acteurs, avec des postes piliers, qui coordonnent les soins, comme le métier d'infirmière de coordination. Son rôle est d'être l'intermédiaire entre les différentes personnes qui s'occupent de la prise en charge sanitaire, sociale et médico-sociale du patient. En théorie, les solutions organisationnelles mises en place fonctionnent. Mais dans la pratique, le bon déroulement des soins repose énormément sur l'humain et l'interaction entre médecin/infirmier et patient [10]. Problème : il y a eu suppression de certains de ces postes piliers ces dernières années, ce qui semble paradoxal avec le fait qu'on veuille, dans un même temps, améliorer l'organisation du système de santé.

D'une part, les solutions de communication ne sont pas bien utilisées : le service où travaille Eva Danton est doté d'un carnet d'adresse, fait à la main par l'infirmière de coordination [10]. C'est pourtant ce carnet qui

permet de faire le lien entre l'hôpital et la ville, puisqu'il a pour vocation de permettre à l'hôpital de trouver les médecins de ville qui ont suivi le patient, ou de contacter un médecin adapté pour prendre en charge le patient une fois sorti de l'hôpital. De même, Alexandre Farnault évoquait le fait que certains services utilisent encore le fax, et que le comptage des lits n'est pas encore automatisé. [6].

D'autre part, il y a la question du motif : "qu'est-ce qui fait qu'il est dans l'intérêt d'un médecin généraliste de rejoindre une CPTS ? Pourquoi choisirait-il cette solution plutôt que Doctolib, par exemple, qui offre de très bons services également ?" évoque le Dr Josselin Lebel [3]. De toute évidence, les réponses à ces questions ne sont pas immédiates, ce qui ralentit l'implémentation des solutions. En dehors de la compétitivité que se doivent d'adopter les applications et autres médiums proposés, il y a la question du nombre. Trop de solutions cherchent à répondre au même problème, il est donc facile pour un acteur privé d'être perdu face à tous ces choix. La diversité rend difficile l'engagement sur une seule plateforme, et disperser les utilisateurs sur des plateformes de communication différentes ne ferait qu'aggraver le problème de communication.

Ce qu'on constate, c'est qu'il y a deux tendances qui évoluent simultanément :

- On cherche à développer de nouvelles solutions pour faire face au manque d'organisation et de communication. On en développe de nombreuses, trop nombreuses même, comme le montre Alexandre Farnault en listant les solutions de télémédecine développées pendant la crise [6]. C'est l'aspect théorique de l'organisation d'un système de soins qui est pourtant très fortement basé sur le côté humain.
- Les praticiens ne voient pas forcément d'un bon œil ce changement d'organisation, qui ne correspond pas toujours à leur manière de travailler, ce qui rend, dans l'immédiat, la situation plus difficile à gérer [3]. C'est l'aspect pratique, vécu par les praticiens, qui constatent l'importance de l'interaction humaine et directe avec le patient.

Ce qu'il faut, c'est donc parvenir à **centraliser et coordonner les solutions**, afin de fluidifier le fonctionnement du système de santé et de réellement faciliter le dialogue entre les différents acteurs. Pour cela, il semble logique de vouloir centraliser toutes les solutions sur une seule interface. C'est un peu ce que propose TerreSanté. Pourtant, de nombreux médecins de ville sont plutôt réticents à l'usage de cette application, souvent considérée comme trop complexe, souligne Josselin Lebel [3]. C'est bien qu'il y a plusieurs barrières à cette centralisation. Rappelons d'abord les conflits internes du système de santé (ARS et praticiens) : chacun souhaite donner son avis et faire adopter sa solution, pour des raisons de vision du problème. Il ne faut pas non plus oublier que, confier le monopole à une seule entité, c'est aussi lui conférer un pouvoir économique, politique et social très important. Josselin Lebel évoquait par exemple la possibilité de donner le monopole à un acteur privé comme Doctolib [7]. Que penser alors de l'usage de la Big Data, des données des utilisateurs ? Améliorer la communication et faciliter l'échange d'informations repose malheureusement sur la résolution de ce débat complexe. C'est également le cas pour le développement de toutes les solutions de télémédecine.

3. Stratégie de vaccination et communication

Depuis quelques mois, les perspectives de la mise au point d'un vaccin pour protéger la population mondiale contre la Covid semble être à première vue une bonne solution pour lutter contre la pandémie actuelle et sortir de la crise. Mais nous verrons que la communication entre les différents acteurs, et notamment avec les patients, est un grand défi de la stratégie de vaccination.

Depuis le début de la crise, les laboratoires publics comme privés ont travaillé d'arrache-pied à l'élaboration d'un vaccin, comme le relate le journal du CNRS du 10 novembre [15] : il y a à ce jour entre 150 et 200 vaccins en phase clinique ou préclinique, dont onze qui sont actuellement en dernière phase d'essais cliniques. En effet, pour qu'un vaccin puisse être mis sur le marché, il faut qu'il passe par plusieurs phases : tout d'abord, les essais précliniques, c'est-à-dire réalisés sur des espèces animales, doivent être concluants. Puis viennent les essais cliniques, qui se déroulent en trois temps : chaque étape comporte des tests sur de plus en plus de personnes, la dernière phase concerne à ce titre des essais réalisés sur 50 000 personnes et plusieurs années [15]. Typiquement, l'élaboration d'un vaccin prend une dizaine d'années. Or dans le contexte d'urgence sanitaire actuel, la période d'essais est réduite à 1 ou 2 ans, ce qui pose certains problèmes : comment assurer que le vaccin élaboré si rapidement sera efficace et suffisamment sûr pour rassurer l'opinion publique, en partie assez sceptique sur les effets du vaccin ? En effet, selon une étude menée par le professeur Antoine Bristielle pour la Fondation Jean-Jaurès datant du 17 novembre, près d'un Français sur deux ne veut pas ou "plutôt pas" se faire vacciner contre la Covid

[16]. Cependant, il ne faut pas négliger que les vaccins contre le SARS-CoV-2 sont les premiers vaccins à ARN messager, leur durée d'élaboration ne peut donc être comparée à aucun autre vaccin existant.

La mise au point d'un vaccin s'accompagne typiquement d'une phase de vaccination massive de la population, qui vise à réduire l'incidence de la maladie sur la population mondiale. Dès lors, on voit que certaines problématiques sociales apparaissent : certains groupes, par exemple certaines minorités ethniques, ont été affectés de façon disproportionnée par le Covid. Quelles sont les modalités de cette campagne de vaccination, et quelle est la stratégie à adopter, c'est-à-dire quelles catégories de personnes doit-on vacciner en premier, quand doit-on commencer la vaccination, comment articuler les différentes phases de la campagne ? Ces questions, légitimes et non-exhaustives, sont donc très nombreuses.

La Haute Autorité de Santé (HAS) a justement publié en novembre sa première proposition de stratégie vaccinale **[19]**, apportant des réponses à toutes ces interrogations. Les ingénieurs peuvent alors apporter leur pierre à l'édifice, et offrir, par le biais de simulations et de modélisations, une évaluation de la stratégie proposée. Est-elle efficace pour combattre la Covid-19 ? Quels sont les facteurs influençant cette efficacité ? Et comment l'améliorer ? Comment est-elle impactée par la communication et la sensibilisation ?

Pour ce faire, nous nous appuyerons sur les stratégies de vaccination d'autres virus comparables, comme le virus H1N1, notamment pour le choix des lieux de vaccination (vaut-il mieux vacciner en médecine de ville ? dans des centres ? ou faire communiquer les deux ?). L'analyse des stratégies adoptées par le passé peut aider l'ingénieur dans sa démarche, qui s'appuie également sur les outils informatiques à sa disposition. C'est dans cette veine que le mini-projet sur la stratégie de vaccination a été mené à bout.

CONCLUSION ET CONTOURS DES MINIS-PROJETS

Cette réflexion sur l'ensemble des conférences auxquelles nous avons assisté, ainsi que sur les documents issus de nos recherches personnelles, nous ont poussé à dégager les éléments principaux sur lesquels construire nos mini-projets.

Le premier élément qu'il nous paraît essentiel d'aborder est le manque de coordination et de communication entre les différents acteurs du système de santé, qui nuit à l'efficacité de ce dernier, malgré le grand nombre de solutions proposées et le dévouement de ses acteurs. Améliorer cet aspect, c'est améliorer le fonctionnement du système dans sa globalité. Cette amélioration peut notamment se faire par des solutions digitales de télémédecine et d'e-santé. S'ajoutent à ce premier constat les conclusions tirées grâce à la crise de la Covid, telles que :

- L'impact de Covidom sur l'évolution de la crise (50% des personnes inscrites auraient consulté si l'application n'avait pas existé) montre en effet **le rôle que peut jouer une solution de suivi à distance, et de télémédecine en général.**
- L'observation du débordement des services de réanimation lors de la première vague, malgré une grande force d'adaptabilité des hôpitaux. Il faut chercher à **réduire l'impact de la crise sur le système de soins pour les mois à venir, notamment dans un contexte de vaccination, a priori centrale dans la résolution de la crise.**

Ces constats nous ont alors permis de construire 3 mini-projets, censés aider à une amélioration de la situation actuelle telle qu'évoquée précédemment. Ils seront aussi l'occasion de mieux saisir les difficultés et les limites qui accompagnent la proposition de solutions à des problèmes complexes comme celui du système de santé français, dans la mesure où le problème est à la fois social, économique, mais aussi politique.

Le premier des mini-projets aborde la stratégie de vaccination visant à lutter contre l'épidémie. Il se décompose en deux parties :

- Étudier la pertinence de la stratégie de vaccination de la HAS, à travers des modélisations informatiques, permettant notamment une analyse de l'impact sur les lits de réanimation.
- Lutter contre l'hésitation vaccinale, en proposant une campagne de sensibilisation et en fournissant des recommandations, basées sur l'analyse de la stratégie de vaccination contre la grippe H1N1.

Un deuxième mini-projet sera l'occasion de mettre en place des solutions numériques pour répondre à la crise, et ceci selon deux axes :

- Démontrer comment il est possible de mettre en place une interface simple et ergonomique qui facilite la communication et les soins (partage d'informations sur le patient, facilité du suivi à distance). Création d'un site internet dédié - FlowMed - qui permet de faire le lien entre le patient, le médecin traitant et les médecins spécialistes relatifs aux maladies pour lesquelles le patient est suivi.
- Améliorer le traitement des alertes déclenchées par un dispositif de suivi type Covidom, par la mise en place d'un algorithme de machine learning.

Enfin, un dernier mini-projet - consistant en une étude économique - permettra la clarification du financement d'une solution de télésuivi telle que celle proposée par la plateforme FlowMed (mini-projet 2). Elle s'attaquera à l'étude de sa viabilité et de son impact économique pour un déploiement à l'échelle d'une région comme l'Île de France. Cette étude permettra de mettre en avant les difficultés rencontrées pour adapter la solution à de nombreuses maladies, pour lesquelles les traitements sont d'une grande variabilité en termes de durée ou de coût.

MINI-PROJET N°1 : Stratégie de vaccination

1. Introduction

Le 27 Novembre 2020, la **Haute Autorité de Santé (HAS)** a publié une première proposition de stratégie vaccinale pour lutter contre l'épidémie de COVID **[19]**. L'objectif auquel souhaite répondre la HAS grâce à cette dernière est de "réduire les formes graves et les décès ainsi que de maintenir le système de santé en période d'épidémie".

Cependant, il nous a semblé qu'il manquait une prévision de l'impact de cette stratégie vaccinale sur les services hospitaliers. Nous nous proposons donc, à l'aide de modélisations informatiques permettant de simuler la pandémie de COVID-19 au sein de la population française, d'évaluer la pertinence des propositions de la HAS. Il a déjà été souligné que le système de santé, et notamment les services de réanimation, ont été submergés lors des deux vagues survenues pendant l'année 2020 : nous nous centrerons donc sur **l'impact de la vaccination sur l'occupation des lits de réanimation**.

Par ailleurs, les autorités ne se sont pas encore positionnées sur de nombreux paramètres tels que les lieux de vaccination, les coûts engendrés par une telle campagne ou encore comment lutter contre l'hésitation vaccinale. En effet, il semblerait que seulement 12% des français seraient prêts à se faire vacciner immédiatement après la mise en circulation du vaccin (d'après une étude réalisée par IPSOS **[17]**). C'est la raison pour laquelle, à l'aide de l'étude de la précédente campagne vaccinale de la grippe H1N1 **[22]**, nous avons cherché à étudier l'impact de ces différents facteurs sur la réussite de la campagne vaccinale française.

2. Mise en place d'un modèle épidémiologique numérique

a. Pourquoi mettre en place une nouvelle modélisation ? Objectifs et motivations

Il existe des dizaines de modélisations mathématiques pour décrire l'évolution de la Covid-19 : pourquoi en mettre en place une nouvelle, sachant qu'en élaborer une de cette ampleur suppose une grande charge de travail ? N'y aurait-il pas eu un travail plus utile à effectuer dans le cadre de la campagne vaccinale ?

En réalité, aucune des simulations que nous avons trouvées ne nous convenait. En effet, nous en voulions une qui vérifie les conditions suivantes :

- Être **modifiable facilement et à souhait**, pour pouvoir changer les valeurs qui nous semblaient pertinentes, au cas où elles seraient obsolètes au vu des découvertes fréquentes dans le domaine de la Covid-19.
- Donner des valeurs pertinentes sur **l'état des services de réanimation**. Dans l'objectif que nous nous sommes fixés, il était essentiel de pouvoir observer la prévision de cette valeur.
- Il a déjà été souligné que l'âge était un facteur déterminant dans l'admission en service de réanimation. Il nous a donc semblé primordial qu'un tel algorithme prenne en compte la **distribution par âge** de la population française (sans la considérer comme uniforme).

C'est dans cet état d'esprit que nous avons pris la décision de **développer notre propre modèle mathématique et modélisation numérique** pour prévoir l'évolution de la progression du virus dans la population française, et notamment observer l'évolution de l'occupation des lits de réanimation. Ces conditions établies ci-dessus sont donc naturellement devenues notre cahier des charges pour nous guider dans l'élaboration de la modélisation.¹

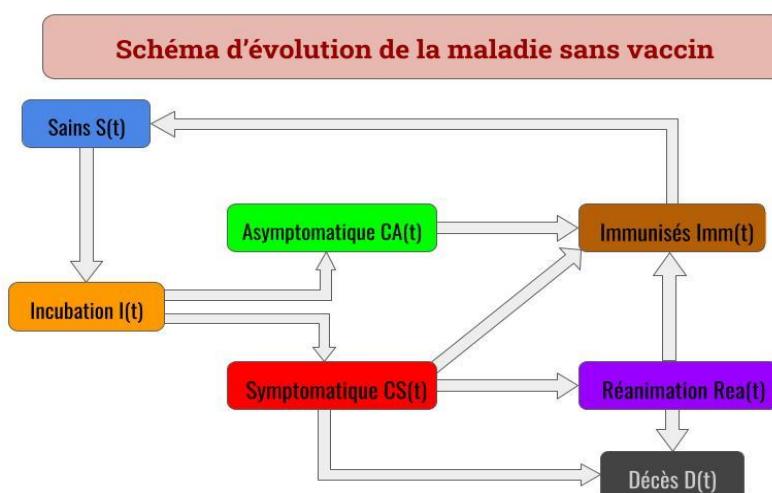
¹ Le code de cette modélisation se trouve en annexe 2i.

b. Les états d'un patient : le cœur de la modélisation pour comptabiliser les réanimations

Il existe différentes méthodes pour suivre mathématiquement une maladie. Cependant, la Covid-19 est une maladie nouvelle, elle possède ses traits caractéristiques propres. Elle nécessite donc un modèle inédit qui puisse saisir ses spécificités. Nous exposons ici le fruit de nos réflexions (détaillées en annexe 3a), qui résultent en **sept états permettant de définir une personne** :

- Personne saine : elle est susceptible d'être contaminée par les personnes **contagieuses**.
- Personne en période d'incubation : elle a été contaminée, mais ne peut contaminer personne pour l'instant.
- Personne contagieuse asymptomatique : elle a terminé sa période d'incubation. Elle devient nécessairement **immunisée** après sa maladie.
- Personne contagieuse symptomatique : elle a terminé sa période d'incubation. Elle peut soit devenir **immunisée** après sa maladie, soit développer des formes graves pouvant l'amener en service de **réanimation**, ou provoquer son **décès** hors d'un service de réanimation.
- Personne en service de réanimation : elle entre dans ce service uniquement si elle était **contagieuse symptomatique**. Elle peut soit survivre à ce traitement et devenir **immunisée**, ou **décéder**.
- Personne immunisée : elle était soit contagieuse **asymptomatique**, soit contagieuse **symptomatique**, soit en service de **réanimation**. Elle peut perdre son immunité au bout d'un certain temps, et devenir **saine**.
- Personne décédée : elle était soit contagieuse **symptomatique**, soit en service de **réanimation**.

Le schéma suivant résume ces états et leurs relations :



Il reste enfin à trouver des paramètres pertinents permettant de relier ces états entre eux. Le détail de ces données, est restitué en annexe 3b. En ce qui concerne la catégorisation par âge, spécifiée dans le cahier des charges, elle est elle aussi détaillée en annexe (annexe 3c).

d. Comment implémenter la stratégie vaccinale ?

Le but de notre simulation est, à terme, de **mettre en place la stratégie vaccinale de la HAS**. Ainsi, il faut d'une part déterminer quelles sont les caractéristiques d'un vaccin à prendre en compte, et d'autre part mettre en place le calendrier de vaccination.

Choix retenus pour caractériser le vaccin : au vu du peu de données disponibles sur les vaccins, nous avons décidé d'implémenter un vaccin « moyen », qui utilise ces trois paramètres :

- Son influence sur **l'envoi en réanimation**.
- Son influence pour **protéger de la maladie**.

- Son influence sur la **durée de la maladie**.².

Mise en place du calendrier de vaccination : il faut prendre en compte la « **vitesse de vaccination** » du système de soins français (détaillée en annexe 3j), elle dépendra notamment du choix retenu pour vacciner la population (centres de vaccinations, médecine ambulatoire, ou les deux). Il faut aussi prendre en compte dans ce calendrier le **jour de début de la campagne** de vaccination.

e. Implémentation numérique et vérification de la pertinence du modèle

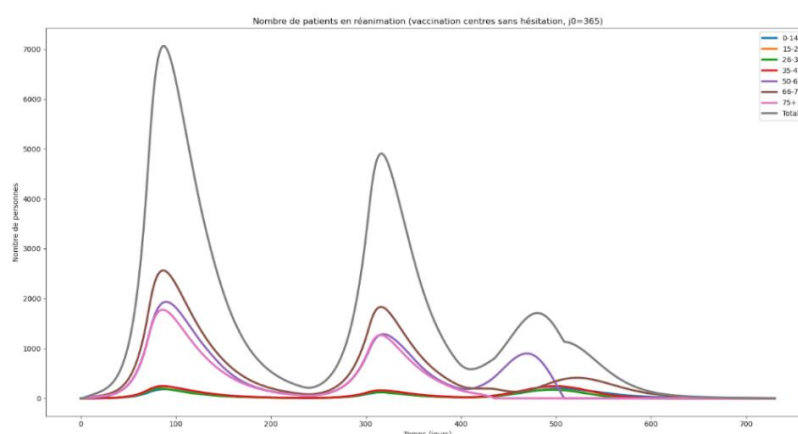
Tous les détails relatifs à cette étape, nécessaire, sont donnés en annexe 3h.

3. Pertinence de la stratégie

a. Revue des propositions formulées par la HAS

D'après le rapport publié par la Haute Autorité de Santé [19], un ordre a été établi concernant la priorisation des populations à vacciner, que l'on retrouve en annexe 5.

En simulant dans notre modèle une vaccination avec la priorisation décrite précédemment, on obtient les courbes suivantes pour la réanimation :



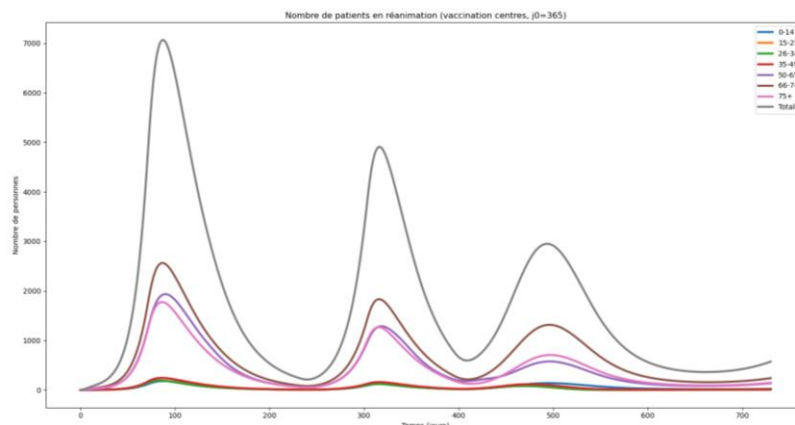
Courbe des réanimations avec vaccination sans hésitation vaccinale, démarrant au 01/01/2021 ; en 2021, gestes barrières en janvier et aucun confinement

On observe donc une baisse du nombre de personnes en réanimation de plus de 50% par rapport à la première vague. De tels résultats sont encourageants car ils permettraient d'éviter de saturer les hôpitaux, et ce sans aucun confinement. Cependant, ce modèle ne tient pas compte de l'hésitation vaccinale.

b. Estimation de l'impact de l'hésitation vaccinale

Pour quantifier l'hésitation vaccinale, en perpétuelle évolution depuis plusieurs années, nous avons réalisé des calculs (détaillés en annexe 3j), pour estimer le taux réel de vaccination par tranches d'âge, afin que notre modèle se rapproche de la réalité. Ils seront considérés comme acquis pour le reste de notre exposé.

² La justification de ces trois paramètres, ainsi que leurs valeurs, sont données en annexe 3d.



Courbe des réanimations avec une vaccination en centres, démarrant au 01/01/2021, avec l'hésitation vaccinale estimée : en 2021, gestes barrières en janvier et aucun confinement

Nous observons que sans aucune campagne vaccinale pour tenter d'enrayer une hésitation vaccinale très importante, la troisième vague se solderait par un pic de réanimation d'environ 3 000 personnes, presque le double que dans la simulation précédente. Il semble que dans tous les cas la vaccination empêche de submerger les hôpitaux, mais avec un nombre de 3 000 lits occupés dans le second cas, les hôpitaux risquent d'être à nouveau mis en difficulté, proches de leur limite d'accueil.

c. Propositions logistiques

Première proposition, lutter contre l'hésitation vaccinale : pour étudier la logistique d'une campagne de vaccination, il est nécessaire d'estimer d'abord l'hésitation vaccinale, puisque celle-ci va dimensionner la campagne.

Constat : Il est encore difficile d'estimer l'hésitation vaccinale, peu de données sont disponibles.

Données disponibles : d'après les résultats d'un sondage de l'Institut Elabe publié le 18 novembre 2020 [20], "40% des Français déclarent que si dans les prochains mois un vaccin contre la Covid-19 était disponible [...], ils se feraient vacciner", "46% des Français déclarent qu'ils ne se feraient pas vacciner", et 14% des français ne savent pas encore.³ D'après une autre étude, réalisée par IPSOS en octobre [17], seulement 12% des français voudraient se faire vacciner immédiatement après la sortie du vaccin, 38% voudraient se faire vacciner dans les 3 mois après la sortie du vaccin et 54% voudraient se faire vacciner dans l'année qui suit la sortie du vaccin.

Les données de notre propre sondage : dans le but d'obtenir des données sur la vaccination en fonction des tranches d'âge et autres paramètres, nous avons diffusé un sondage⁴. Notons que celui-ci est biaisé par le fait qu'il a notamment été largement diffusé aux élèves des Mines. De plus, certaines catégories sont très peu représentées, leur pertinence n'est donc pas garantie : on utilisera les données avec précaution. Néanmoins, l'utilisation de ce sondage nous a semblé pertinente dans la mesure où il y a très peu de données disponibles sur l'hésitation vaccinale, par tranches d'âge, liée à la Covid. Tous les détails des résultats se trouvent dans l'annexe 2.

Ce sondage comprenait notamment une question sur la volonté de se faire vacciner. Pour toutes les catégories, entre 38.4% et 61.4% des personnes interrogées ne souhaitent pas se faire vacciner, ce qui concorde globalement avec les données disponibles. Nous avons également tenté d'identifier les principales causes de cette hésitation vaccinale ; deux causes ressortent particulièrement : la peur que le vaccin ait été produit trop vite pour être un "bon vaccin" et la peur d'effets secondaires qui n'auraient pas encore été identifiés.

³ Le sondage précise : "En termes d'âge, les 50 ans et plus sont les plus enclins à se faire vacciner (48% oui, 41% non), les 25-49 ans sont les plus réfractaires (32% oui, 53% non)."

⁴ Sondage sous la forme d'un Google Form, 688 réponses.

Quoiqu'il en soit, même si les chiffres que nous avons pu produire ou trouver doivent être maniés avec précaution, on peut tout de même en tirer la conclusion que la capacité à **convaincre les vaccino-sceptiques semble être un enjeu de taille, nécessaire.**

Deuxième proposition, mettre en place une campagne de sensibilisation multimodale : convaincre la population et les professionnels de santé nécessite la mise en place d'une campagne de sensibilisation multimodale. Des études ont mis en avant l'augmentation de la couverture vaccinale contre la grippe chez les médecins (25 à 38%) et infirmiers (11 à 20%) liée à l'utilisation d'une campagne de sensibilisation vaccinale [21].

A partir de recommandations de la HAS publiées début novembre [38], nous proposons qu'une campagne de sensibilisation vaccinale contre le SARS-CoV-2 doive reposer sur 3 axes : informer et communiquer en temps réel, fédérer la population autour de l'importance de la vaccination contre la COVID, impliquer les usagers au sein de la stratégie.

Premièrement, les **actions de communication doivent être coordonnées** afin de rendre plus accessible l'information officielle sur les vaccins, de répondre aux interrogations des Français et de les tenir informés des stratégies adoptées avec transparence. La crise du SARS-CoV-2 n'a pas les mêmes impacts pour tout le monde, ainsi il nous semble essentiel que la stratégie de communication soit ciblée. Il paraît primordial de mettre en place une **campagne de communication sur Internet** et sur les réseaux sociaux afin d'attaquer les théories du complot, faire reconnaître l'expertise scientifique et empêcher l'emballement médiatique. A l'heure actuelle, le lobbying anti-vaccin sur Internet et les réseaux sociaux est bien plus présent et il s'agira d'y remédier. Pour les personnes difficilement atteignables sur Internet, il faudra coopérer avec les médecins généralistes et les infirmiers libéraux.

La stratégie de communication pourra s'orienter autour de **l'importance de se faire vacciner** pour ne pas mettre en danger ses proches afin de fédérer la majeure partie de la population autour d'un objectif commun : la protection des plus fragiles. Les actions de prévention ne devront pas être négligées, il faudra renforcer la communication autour des gestes barrières pour éviter un relâchement.

Enfin, les usagers adhèrent à une campagne nationale de vaccination s'ils se **sentent eux-mêmes acteurs de cette campagne**. Pour cela, il nous semble utile de les concerter, d'écouter leurs idées, leurs demandes, leurs remarques à travers des sondages et des questionnaires. Une consultation mensuelle paraît pertinente. De même, il s'agira d'en faire le principal acteur de leur vaccination. L'accessibilité au vaccin se verra simple (ordonnance, achat si possible, administration) afin que l'utilisateur puisse lui-même acheter un vaccin, prendre un rendez-vous et ensuite être au centre de son suivi et communiquer avec son médecin traitant en cas d'effets secondaires.

Troisième proposition, recommandations sur les lieux pour la vaccination : dans une première approche, en ne prenant en compte que la cadence de vaccination avec différents lieux de vaccination (médecine ambulatoire, centres de vaccination ou les deux combinés) et l'hésitation vaccinale, on observe grâce à nos simulations (cf. annexe 4) que le plus efficace pour soulager les services de réanimation lors de la 3ème vague serait **d'allier vaccination en médecine de ville et en centres**. En plus de cet aspect *purement numérique*, il faut prendre en compte d'autres paramètres, notamment les types de doses et leur conservation, la volonté des médecins d'être impliqués, la disponibilité de centres où vacciner...

Analyse des lieux de vaccination de la campagne de vaccination pour la grippe H1N1 : afin d'analyser les problèmes que l'on pourrait rencontrer concernant les lieux de la vaccination, nous allons notamment nous appuyer sur les lieux de vaccination pour la grippe H1N1 [22] et les problèmes qu'ils ont soulevés. Lors de cette campagne, les médecins de ville ont complètement été exclus, la vaccination se faisait essentiellement dans des centres :

- La vaccination était **gratuite** et donc il était compliqué d'inclure la médecine ambulatoire,
- Cela **limitait la pression** exercée sur les cabinets médicaux, notamment pour les tâches administratives,
- Cela permettait **d'éviter le contact** entre ceux qui allaient se faire vacciner et les malades,
- Le vaccin était sous la forme de **multidose**, ce qui aurait forcé les médecins de ville à réaliser un certain nombre de vaccins par jour pour éviter le gaspillage.

Nécessité d'inclure la médecine de ville : intéressons-nous maintenant aux avantages et inconvénients que présenterait la vaccination par des médecins généralistes. L'analyse de la campagne H1N1 [22], notamment, nous apporte des éléments :

- Seuls, ces centres auraient été insuffisants pour vacciner autant que ce qui était prévu,
- Les médecins de ville, puisqu'ils ont été exclus, n'ont pas pu remplir le rôle essentiel du relai entre la politique de santé et leurs patients.

De plus, le recours à la médecine de ville permettrait un suivi du patient plus simple s'il y a besoin de rappels, ainsi que pour le suivi des éventuels effets secondaires. Le principal inconvénient réside en réalité sur la conservation des vaccins (cf. annexe 5).

Toutes ces raisons font qu'il est **nécessaire pour que cette campagne de vaccination soit efficace, d'allier médecine de ville et utilisation de centres de vaccination qui se complètent dans leurs avantages et leurs défauts.**

MINI-PROJET N°2 : Approche digitale de la gestion des affections et de la réduction des flux d'entrée à l'hôpital

1. Motivation et objectifs de la plateforme

L'idée de la plateforme est née des évocations récurrentes du succès de Covidom (*cf. partie II.1*) et du manque de dialogue entre les différents acteurs de la santé (*cf. début de la partie III.*). Il s'agissait donc de mettre au point une structure qui allie simplicité et efficacité. En effet, les plateformes de télésurveillance, et même plus généralement de télémedecine, ont tendance à pécher par leur complexité (*cf. Terr-eSanté*), qui vient s'ajouter aux nombreuses formalités administratives imposées par le milieu.

C'est là qu'intervient la plateforme FlowMed : basée sur le fonctionnement de Covidom, elle cherche à l'étendre à d'autres pathologies, aiguës dans un premier temps, puis chroniques. L'objectif ? Réussir à réduire au possible le nombre d'hospitalisations évitables, sans toutefois manquer les "vraies" alertes et risquer de mettre en péril la vie des utilisateurs de la plateforme.

Réduire ainsi les flux d'entrée à l'hôpital a plusieurs avantages notables : allègement de la pression sur le service hospitalier, à plus forte raison en période épidémique, diminution des coûts, dans un contexte économique compliqué pour l'hôpital public et réduction du stress des patients.

Dans cette optique, il a alors semblé légitime de s'inspirer du fonctionnement de Covidom pour une plateforme de télésuivi étendue à d'autres affections comme la grippe, notamment lors des épidémies hivernales, le diabète ou encore le SIDA.

Idéalement, pour ce qui est de l'enregistrement sur la plateforme, chaque médecin (généraliste ou spécialisé) serait automatiquement inscrit sur FlowMed. Du côté des patients, ces derniers seraient d'abord enregistrés lors de la visite chez leur généraliste ou chez un spécialiste ; soit avec le concours d'autres systèmes informatiques déjà en place et utilisés à l'image de Doctolib, soit manuellement par le praticien, ce qui n'est pas souhaitable étant donné que la simplicité est un objectif de la plateforme. Le patient n'aura alors plus qu'à activer son compte.

Une fois renseigné, le patient sera suivi de manière personnalisée en fonction de sa (ou ses) pathologie(s) et de son dossier médical (tous renseignés sur la plateforme au moment de l'enregistrement, automatiquement si possible) par un système de questionnaires adaptés et élaborés par des spécialistes. Le médecin généraliste et le spécialiste auront tous deux accès au suivi du patient une fois ce dernier renseigné et pourront consulter les tendances de ses questionnaires et le conseiller. De plus, sur le modèle de Covidom, des alertes orange ou rouge peuvent se déclencher automatiquement et avertir un standard qui contactera l'utilisateur.

Mais c'est là que FlowMed se démarque de Covidom ; le système de questionnaires de Covidom a été mis en place dans l'urgence et souffre de problèmes d'efficacité. La fréquence des questionnaires de FlowMed sera adaptée à l'affection (journalier, voire plus fréquent, si la maladie est aiguë, et sur plusieurs jours si la maladie est chronique), et pourront être remplis automatiquement si l'utilisateur possède des objets connectés, qui sont de plus en plus performants et répandus. Dans ce cas de figure, le patient n'aura même plus à se connecter sur la plateforme.

De plus, Covidom n'a pas été pensé pour traiter des maladies chroniques. C'est pour cela que les questionnaires liés à ces pathologies sont, comme précisé plus tôt, proposés moins fréquemment. Néanmoins, l'objectif étant de réduire les hospitalisations potentiellement évitables, il faut être en mesure de gérer les manifestations aiguës de ces affections chroniques, d'où la mise en place sur la plateforme d'un "appel d'urgence" pour contacter directement le standard à tout moment et surtout une gestion algorithmique des questionnaires pour détecter des ruptures de tendance. Autre différence avec Covidom donc, le traitement des alertes, plus travaillé, et détaillé dans la suite de ce rapport.

Ainsi le fonctionnement de la plateforme FlowMed est une extension et une simplification de celui de Covidom et est détaillé dans un diagramme d'usage joint en annexe, ainsi que dans un cahier des charges élaboré pour aider le mini-projet étude économique.

Néanmoins, il existe des obstacles à la mise en place d'une telle plateforme. Dans un premier temps, d'un point de vue pratique, il est possible que les systèmes de gestion de patientèle refusent de collaborer (Doctolib par exemple). Il faudrait alors enregistrer manuellement patients et médecins, ce qui nuirait à la simplicité d'utilisation. De plus, pour reprendre l'exemple de Covidom, l'ARS a demandé que tous les individus qui vont se faire tester soient inscrits sur la plateforme. Résultat : des centaines de milliers de comptes créés sans être activés. Il faudrait donc limiter le nombre d'inscrits sur la plateforme ou bien plus communiquer autour de FlowMed. Dans un second temps, des problèmes se posent au niveau des usagers : les échecs d'autres plateformes de télémédecine ont rendu les médecins et les patients rétifs à l'apparition de nouvelles structures. Il est aussi également intéressant de noter que certains des patients qui ont utilisé Covidom ont pu se sentir abandonnés et regrettent de ne plus avoir un contact humain direct pour s'occuper de leur santé (cf. II.2) ; un suivi psychologique est donc important dans ce type de plateforme. Finalement, pour ce qui concerne les maladies chroniques, leur traitement requiert une éducation du patient pour qu'il puisse se soigner tout au long de sa vie. Ainsi, les spécialistes de certaines maladies chroniques sont réticents à l'idée d'un télé-suivi de leurs patients, de peur qu'ils ne se reposent sur le système d'alerte plutôt que de se gérer seuls (cf. Mini-projet 3).

2. Profil de patients ciblés : pour quels patients est-ce utile ?

L'objectif de FlowMed est d'apporter une réponse efficace et facile à la prise en main. Pour cela, il a fallu accepter que proposer quelque chose qui conviendrait à tous les types de patients et de pathologies est trop complexe pour être mis en place rapidement.

Comment savoir quelles maladies choisir ? Nous ne sommes pas professionnels de santé, nous n'avons donc pas les connaissances requises pour déterminer si le suivi que nous proposons est adapté à une maladie en particulier. Cependant, les interventions des différents médecins auxquelles nous avons assisté ont fait ressortir plusieurs termes intéressants : maladies chroniques, infectieuses et Sida.

Comme évoqué précédemment, la légitimité des maladies chroniques est discutable, car un traitement pour ce type de maladies repose souvent sur l'éducation des patients, pour qui se reposer trop fortement sur les alertes serait contre-productif (ils ne doivent pas devenir dépendants de la plateforme).

Enfin, l'état du patient est aussi à prendre en compte dans son hypothétique inscription sur la plateforme. Inscrire un patient dans un état trop grave, c'est négliger ses risques de complication et donc surestimer ses chances de survie. A l'inverse, inscrire un patient atteint d'une forme bénigne de la maladie peut le pousser à ne pas répondre aux questionnaires et à délaisser son suivi car il n'y voit pas réellement l'intérêt et n'est pas contrôlé par des entretiens directs avec son médecin.

Il faut donc que le **patient ciblé** soit dans un **état stable** de la maladie (c'est-à-dire qu'il peut être pris en charge à distance), et **motivé** pour répondre de façon régulière aux questions qui lui sont posées. Gardons également en tête que le but de la plateforme est de simplifier la vie à ses utilisateurs. Nous nous sommes donc concentrés sur deux profils types :

- Un patient atteint d'une maladie chronique, dans un état peu grave, et pour qui répondre aux questionnaires évite les déplacements inutiles : il y a un gain de temps pour le patient et le médecin.
- Un patient atteint d'une maladie aiguë, si la situation est adaptée.

L'idée de FlowMed est de mettre en place une **structure adaptée au suivi de maladies diverses**, mais qui soit suffisamment **flexible** pour que ce soit le médecin qui fasse les choix qu'il considère comme nécessaires au bien-être du patient. Pour illustrer des cas précis d'utilisation de la plateforme, nous avons mis en place 3 scénarios :

- Marc, 50 ans, est diabétique depuis peu, son médecin spécialiste est à 1h de chez lui. Il est assez autonome et possède un appareil connecté, mais suivre son état est nécessaire : il s'inscrit sur la plateforme et répond à de rapides questionnaires pour vérifier son état de santé. Il ne se déplace pas chez son spécialiste (Scénario 1)
- Samantha, 35 ans, souffre d'hypertension artérielle. Très prise par son travail, elle n'a pas envie de s'encombrer avec des consultations régulières qui lui prennent du temps. Elle est déjà inscrite sur la

plateforme et se fait tester négatif pour la Covid, après avoir consulté son médecin traitant car elle avait des symptômes. (Scénario 2)

- David a déjà le SIDA et est inscrit sur la plateforme. Il attrape la Covid, se fait tester positif dans un centre de test et est donc suivi pour les 2 maladies. (Scénario 3)

3. Analyse du parcours du patient

Afin de développer une plateforme qui corresponde bien à l'utilisation qu'en fera le patient, nous avons cherché à **cerner les choix qu'il pouvait faire et l'impact de ses choix sur son suivi**. Pour cela, nous avons pris l'exemple d'un système de deux maladies : la Covid et une autre maladie (qui peut être une maladie chronique, infectieuse, le Sida, etc.). Pour représenter les différents états du patients (en termes de suivi et de choix possibles), et être sûr de ne pas manquer de possibilités, nous avons conçu des diagrammes d'état sur le module Simulink de Matlab (disponible en annexe).

Ces diagrammes démontrent la rigueur algorithmique de la prise en charge. Leur lecture n'est pas évidente, mais leur bon fonctionnement garantit que notre raisonnement est cohérent.

4. La pratique du codage du site FlowMed

a. Introduction

Nous avons décidé de nous atteler au codage de la plateforme "FlowMed". Covidom était une application, mais nos capacités informatiques étant limitées, nous avons préféré programmer un site internet. Afin de nous rendre compte au mieux des défis qu'une telle plateforme suscitait, nous avons préféré coder l'intégralité du site nous-mêmes, plutôt que de passer par un intermédiaire. Le résultat de notre travail sera détaillé en annexe, et le code source est disponible [ici](#). Notre principal défi était de simuler **deux axes distincts mais en symbiose : la partie du patient, et celle du praticien**. Sur notre site, le patient a besoin d'être ajouté à la plateforme par son médecin. Ce dernier a accès aux informations de son patient au regard des maladies pour lesquelles il est inscrit.

b. Langages de programmation utilisés

La programmation s'est faite en équipe, avec un ensemble de différents langages, que l'on peut séparer en deux familles. Il y a d'abord ceux utilisés en "frontend" : c'est la partie visuelle du site, la seule que l'utilisateur, médecin ou patient, observe. On utilise pour cela :

- HTML pour l'écriture des pages
- CSS pour donner une forme cohérente au site

L'autre famille est celle du "backend" : c'est le squelette du site, qui génère du lien entre patient et médecin. On utilise alors :

- sqlite3 pour les bases de données
- Python pour automatiser les processus de remplissage et de génération de pages. Permet aussi d'envoyer les mails automatiques aux utilisateurs.

Enfin, pour faire du lien entre le frontend et le backend, on a recours à PHP.

L'usage combiné de ces cinq langages nous permet une plateforme relativement robuste, peu éloignée de ce qui se fait dans le monde de l'entreprise.

c. Sécurité

N'importe quel site internet se doit d'être sécurisé, d'autant plus lorsqu'il contient des informations personnelles. FlowMed n'échappe pas à la règle. Les mots de passe des utilisateurs sont "hachés". Cette méthode, classique en informatique, assure que l'administrateur du site n'a pas accès aux mots de passe. Lors de l'accès d'une personne au site, on peut vérifier que le mot de passe correspond à celui de l'utilisateur, mais il est impossible de le récupérer. Les informations des utilisateurs sont donc protégées.

d. Hébergement du site

Notre site n'étant qu'une maquette, il est hébergé en local. Cela signifie que l'on peut y accéder et le faire fonctionner sur son ordinateur, mais qu'on ne peut y accéder "de l'extérieur". Ce n'est qu'une problématique financière : publier un site n'est pas gratuit. Il nous suffirait de payer l'hébergement du site pour qu'il soit totalement opérationnel.

Dès lors, la pertinence de notre maquette ne souffre pas de l'aspect local : le fonctionnement du site serait **identique** s'il était accessible au public.

e. Critiques et conclusion

Notre maquette n'est évidemment pas un remplaçant, ni même un concurrent sérieux de Covidom. Il nous faudrait des moyens bien plus importants pour assurer le même niveau de fluidité et de sécurité. En revanche, c'est une bonne façon de faire ressortir les problématiques d'une telle plateforme : l'accès des données entre patients et médecins, et la protection de celles-là.

Si notre site n'est pas totalement abouti, les obstacles restants relèvent de problèmes d'échelle et non de problèmes fondamentaux : il nous serait relativement aisé de les résoudre si on avait plus de temps et de moyens.

5. Traitement des alertes

Sur la plateforme Covidom, les patients répondent à 1 à 2 questionnaires par jour. Ces derniers sont traités par un algorithme qui déclenche une alerte orange ou rouge en cas d'apparition de symptômes. Cet algorithme fonctionne donc par un **système de seuil** et provoque des alertes très régulièrement. La conséquence d'une telle décision est que **90% des alertes déclenchées sont des fausses alertes [2]**, c'est-à-dire qui n'ont pas nécessité l'intervention d'un médecin. Par ailleurs, la décision de faire un algorithme comme celui-ci, qui paraît donc peu performant, s'explique par la rapidité du développement de cette application et par la volonté de n'oublier aucun patient grave. Néanmoins, il serait préférable de diminuer ces 90% afin de ne pas faire perdre du temps aux téléopérateurs, temps crucial en pleine crise sanitaire.

Le principal défaut de cet algorithme est que les alertes se déclenchent à la moindre apparition d'un symptôme. En effet, un pic d'apparition n'est pas préoccupant puisqu'il peut s'agir d'une erreur du patient dans la rentrée de ses symptômes sur l'application. Il serait alors plus pertinent de regarder la fréquence d'apparition sur les derniers jours. Si un symptôme persiste cela peut être réellement inquiétant pour l'état de santé du patient. C'est pourquoi, les chercheurs de l'Inria (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) et notamment Jill Jénn Vie que nous avons interrogé, travaillent sur un algorithme qui étudie le **taux d'apparition du même symptôme sur les derniers questionnaires**, ils ont ainsi une **performance de 50%**. Ils ne cherchent pas particulièrement à avoir un algorithme plus efficace pour être certain de ne pas oublier des patients graves.

Notre première idée était de faire un algorithme de machine learning qui apprend à détecter les alertes aux bons moments. Pour cela, nous avons besoin des bases de données des questionnaires de Covidom. Ces dernières sont bien évidemment sécurisées et nous n'avons pas pu y avoir accès. Les chercheurs de l'Inria ont cependant pu nous envoyer une base de données fictives qui suivaient les mêmes tendances que les vraies données. Sur ces données, on recense 30 000 patients qui ont répondu en moyenne à une quinzaine de questionnaires. On peut voir que 678 d'entre eux ont été hospitalisés ou sont décédés en fin de suivi. L'analyse de ces données nous a permis de nous rendre compte du problème suivant : 17% de ces patients dits graves ont déclaré n'avoir eu aucun symptôme dans les 4 derniers questionnaires de leur suivi, donc juste avant leur hospitalisation ou leur décès. Ces 17% sont donc tous des patients qui soit ne savent pas mesurer leurs symptômes soit n'ont pas su bien les rentrer sur l'application. Dans tous les cas, cela pose un **double problème**. Premièrement, il est impossible de faire du machine learning puisque les données sont trop aléatoires, et ensuite, peu importe l'algorithme utilisé, beaucoup de patients graves ne pourront pas être détectés par l'application. Une solution possible serait d'insister sur comment prendre et rentrer ses symptômes à l'aide de tutoriels vidéo.

MINI-PROJET N°3 : Etude économique

1. Objectifs de l'étude

Le but de notre mini-projet est d'étudier la viabilité économique d'une plateforme telle que présentée dans le mini-projet précédent. Nous avons décidé de nous intéresser à la pérennité sur 5 ans d'un tel site, car il serait alors bien établi dans le système de santé tout en étant suffisamment innovant pour garder un réel apport. Afin de quantifier cette viabilité économique, nous nous sommes fixés des objectifs assez ambitieux en termes de nombre de patients d'Île de France suivis sur la plateforme pour différentes maladies choisies en exemple, et nous avons ensuite calculé les dépenses et les gains du site pour l'Assurance Maladie. Cette approche nous permet d'étudier l'impact économique d'un déploiement à grande échelle sur une région. Nous déterminerons par la suite si un déploiement à plus petite échelle est envisageable, en faisant varier nos objectifs de patients inscrits sur le site [Annexe 8].

2. Réalisation de l'étude

a. Principe de l'étude

Pour réaliser cette étude, nous avons implémenté un algorithme dont le principe est simple. Nous créons une classe Maladie, dans laquelle nous pouvons mettre toutes les données utiles, que nous détaillerons ensuite. Puis nous calculons les coûts engendrés par l'utilisation du site : d'une part le coût "fixe", qui représente le coût de construction du site et d'autre part les coûts "variables", qui dépendent du nombre de patients suivis sur le site et des maladies pour lesquelles ils sont suivis, c'est-à-dire l'ensemble des salaires des téléopérateurs et des médecins travaillant sur la plateforme d'appels et le coût d'entretien du site. De la même manière, nous calculons les gains, toujours "variables", qui représentent, pour chaque maladie, le coût des hospitalisations évitées grâce à la détection des symptômes du patient et sa prise en charge en amont permettant d'éviter l'aggravation de la maladie ou le fait que le patient se rende aux urgences alors qu'il n'en a pas besoin. Pour chaque année de fonctionnement de la plateforme (entre l'année 1 et l'année 5), l'algorithme calcule ces coûts et gains variables puis ajoute aux coûts variables le coût fixe et enfin calcule la différence entre les gains totaux et les coûts totaux pour obtenir le bénéfice net de l'Assurance Maladie à utiliser ce site.

Nous avons également implémenté des fonctions qui permettent de visualiser graphiquement, pour chaque maladie, à partir de combien de personnes incluses sur la plateforme, celle-ci devient rentable.

L'avantage de cet algorithme est qu'il peut vérifier si le site est rentable pour l'Assurance Maladie quelles que soient les maladies prises en compte par le site, quel que soit l'effectif des patients suivis, à partir du moment où l'on possède les données adéquates.

b. Hypothèses simplificatrices et obtention des données générales

Pour obtenir les données générales de construction et d'entretien du site analysé, nous avons contacté plusieurs entreprises de création de sites internet, de stratégie digitale et de référencement qui nous ont donné des fourchettes de prix. Ainsi, au vu de la complexité du site, avec plusieurs modules de comportements différents, l'agence Adveris a estimé le coût de développement entre 50 000 et 75 000 €, et nous avons donc pris l'estimation haute dans notre modèle. D'autre part, concernant les frais de maintenance, nous avons retenu un forfait annuel comportant 5 heures de maintenance par mois, pour un coût de 2 400 € par an, proposé par l'entreprise Webvitrine. En choisissant des agences spécialisées et un entretien régulier du site, nous nous assurons ainsi d'un fonctionnement optimal.

D'autre part, nous devons déterminer le nombre de téléopérateurs nécessaires pour prendre en charge les appels des patients. Pour en savoir plus sur les téléopérateurs et les conditions de travail dans les plateformes téléphoniques de Covidom, nous avons contacté Joseph Perrin, en charge de la cellule non médicale de Covidom, qui nous a fourni les données dont nous avons besoin. Actuellement, les téléopérateurs sont payés au SMIC et nous avons choisi de rehausser leurs salaires dans notre modèle afin de donner une meilleure attractivité au métier et ainsi pouvoir avoir des personnes plus compétentes et plus efficaces.

c. Choix des maladies « exemples » et obtention des autres données utiles

Pour chaque maladie que nous souhaitons inclure dans le suivi par télésurveillance, nous devons estimer ou calculer un certain nombre de données. Tout d'abord, il nous a fallu faire la différence entre maladies chroniques et maladies aiguës. Si pour les premières, les patients inclus sur la plateforme sont les personnes atteintes de la maladie, il s'agit plutôt de populations à risque que nous souhaitons suivre dans le cas de maladies aiguës. Il fallait ainsi déterminer, selon le cas, le nombre total de patients atteints de la maladie en Île de France ou le nombre total de personnes à risque vis-à-vis de la maladie, toujours en Île de France. Ensuite, nous devons déterminer le nombre d'hospitalisations potentiellement évitables, définies comme les "recours hospitaliers pour lesquels une prise en charge « optimale » et anticipée aurait pu se traduire par une absence d'hospitalisation" selon le guide méthodologique de calcul de l'indicateur HPE [39]. Puis nous devons trouver le coût moyen d'une hospitalisation pour la maladie en question, mais également la durée d'incidence de la maladie (6 mois pour des maladies saisonnières comme la grippe par exemple).

Nous devons d'autre part fixer les objectifs de prise en charge des patients en Île de France. L'objectif global et très ambitieux était d'atteindre un taux de personnes suivies de 80% pour chaque maladie aiguë choisie en exemple. Pour cela, nous avons arbitrairement décidé d'inscrire la moitié des patients à risque ou atteints par la maladie la première année, puis d'ajouter 10% de nouveaux patients sur le site chaque année. Pour les maladies chroniques, les objectifs de prise en charge ne peuvent pas être de la même ampleur que pour les maladies aiguës. En effet, le malade chronique, face à sa maladie qui est une préoccupation de chaque instant pendant toute sa vie, doit apprendre à prendre en charge sa maladie et la gérer en autonomie. C'est le principe d'**éducation thérapeutique**, développé notamment par le diabétologue et professeur émérite Pr Grimaldi, qui a pu nous expliquer les bases de sa théorie. Plutôt que de considérer les maladies chroniques comme une succession d'événements aigus dans la vie du patient, et les inclure dans le processus type Covidom au même titre que les maladies aiguës, nous avons donc choisi d'**adapter le site aux problématiques propres à la chronicité** : il serait destiné aux personnes qui découvrent leur maladie ou qui sont dans une période de leur vie où ils ne leur est pas possible d'effectuer seul le suivi de la maladie, ou encore dans le cas du SIDA par exemple, il serait utile pour éviter aux médecins de perdre de vue leurs patients. Dans cette perspective, les objectifs de nombre de patients seront beaucoup moins ambitieux et le site ne sera pas source de revenus au sens monétaire du terme mais contribuera à une amélioration de la qualité de vie des malades et à une meilleure continuité de soins notamment dans le cas du VIH.

Enfin, nous avons choisi un paramètre que nous avons appelé "rendement" qui représente le pourcentage d'hospitalisations évitables qui vont être évitées en réalité, et qui est donc inférieur à 1. Nous avons donc arbitrairement choisi un "rendement" de 50%, car nous n'avons pas de données permettant de l'évaluer.

○ Le diabète

Nous nous sommes intéressés à la prise en charge à distance du diabète car c'est une maladie chronique très répandue, avec de nombreux cas supplémentaires chaque année, par conséquent de nombreuses personnes qui doivent apprendre à vivre avec leur maladie. Nous nous fixons comme objectif un début avec 10% des patients diabétiques en Île de France et une croissance de 2,7% par an, qui correspond au pourcentage de nouveau malades chaque année.

Le diabète est une maladie chronique caractérisée par la présence d'un excès de sucre dans le sang. Il expose à un risque aggravé de maladies et décès d'origine cardio-neurovasculaire. Le contrôle de la glycémie (taux de sucre dans le sang) vise à éviter ou retarder les complications. Il repose sur un accompagnement et un traitement adapté afin d'obtenir le meilleur contrôle possible du taux de sucre sanguin, tout en limitant le risque de survenue d'effets secondaires, particulièrement les hypoglycémies. Le diabète et sa prise en charge ont un impact important pour le patient : il doit adopter et maintenir des habitudes de vie saines, entrer dans un suivi médical régulier, adapter ses traitements et savoir gérer les risques de la maladie et de son traitement.

Dans l'algorithme, nous avons pris des chiffres qui datent presque tous de 2015 pour plus de cohérence. Une de nos hypothèses, assez forte, est que l'ancienneté de ces chiffres n'impacte pas trop l'ordre de grandeur des coûts et dépenses. En 2015, 541 412 patients étaient atteints du diabète en Île de France selon Santé Publique France [40]. Nous avons calculé le nombre d'hospitalisations dues au diabète en multipliant le nombre de diabétiques en France en 2015 par le pourcentage de diabétique ayant eu une hospitalisation en 2008 [41], et nous en avons déduit le coût moyen d'une hospitalisation due au diabète en divisant le coût total des hospitalisations dues au diabète pour l'Assurance Maladie [42] par le nombre d'hospitalisations précédemment calculé. Le nombre d'hospitalisations potentiellement évitables en Île de France est celui relevé par l'ATIH (Agence Technique de

l'Information sur l'Hospitalisation) [39]. Pour déterminer combien de téléopérateurs étaient nécessaires au bon fonctionnement de la plateforme, nous avons utilisé des données sur Covidom fournies par les conférenciers et un téléopérateur et nous en avons extrapolé les chiffres pour le diabète. Sur Covidom, un bon téléopérateur peut gérer une cinquantaine d'appels par jour, et chaque patient est appelé en moyenne une fois tous les 20 jours [2]. Par ailleurs, le suivi d'une maladie chronique ne nécessite pas 2 questionnaires par jour mais plutôt un questionnaire tous les 2 jours afin d'éviter de surcharger le patient. Ainsi, le suivi du diabète ne nécessite qu'un quart des téléopérateurs nécessaires pour le suivi du Covid.

○ **La grippe**

L'étude de la grippe nous a parue judicieuse car c'est une maladie aiguë, qui touche chaque année la même population à risque source, et qui cause de nombreuses morts [25]. Le site permettrait un meilleur suivi de cette maladie et ainsi de prévenir l'engorgement des urgences et la hausse de mortalité en septembre.

Dans l'algorithme, nous avons fixé un objectif de prise en charge de 50% de la population de plus de 65 ans en Île de France, ce qui représente 1 785 169 personnes d'après l'INSEE, et ce avec un objectif de croissance de 15% par an. L'objectif étant de désengorger les urgences, nous nous sommes focalisés sur le gain en termes de passages aux urgences évitables. Or, d'après le rapport de Santé Publique France sur l'épidémie grippale de 2018-2019 [25], 84% des passages aux urgences n'ont pas conduit à une hospitalisation, donc auraient pu potentiellement être remplacés par une visite chez un médecin traitant. En effet, les personnes âgées ont beaucoup plus tendance à aller aux urgences qu'à consulter en médecine de ville, d'où l'impact que pourrait avoir un site comme nous l'imaginons dans la gestion d'une épidémie de grippe. L'une de nos hypothèses fortes est que le nombre de passages aux urgences et d'hospitalisations dus à la grippe est proportionnel à la population. La population francilienne représente 19% de la population française, et on pourrait ainsi, dans le meilleur des cas, éviter 10 431 passages aux urgences. Le coût moyen d'un passage aux urgences est de 227 € [43]. Le taux de téléopérateurs nécessaires est du même ordre de grandeur que pour Covidom, mais divisé par un facteur 2 car on ne proposerait des questionnaires qu'une seule fois par jour.

○ **La déshydratation**

Nous avons étudié la déshydratation car c'est une maladie aiguë et saisonnière, pendant estival de la grippe. La population à risque est la même que pour la grippe, ce qui va permettre d'assurer un **suivi continu** des patients entre l'hiver et l'été. De plus, la déshydratation présente un intérêt certain pour la télé-suivi car les symptômes ne sont pas évidents à déceler (perte d'appétit, fatigue inhabituelle, somnolence inhabituelle ou petite fièvre [44]). Ces symptômes sont facilement évaluables à l'aide d'un questionnaire, qui permettrait d'éviter de nombreuses hospitalisations et décès.

Nous avons donc décidé d'inclure sur le site une large proportion des personnes de plus de 65 ans en Île de France dont nous avons trouvé le nombre grâce au site de l'INSEE ; a priori, les mêmes personnes que pour la grippe. Les données que nous avons récoltées datent toutes de 2017. La durée de cette maladie est fixée à 6 mois. Nous avons chiffré les hospitalisations potentiellement évitables en Île de France grâce au site scansante.fr [39], et estimé le coût d'une hospitalisation pour une personne âgée grâce au site Auxivia. En consultant les rapports de surveillance sanitaire de la canicule de Santé Publique France, nous avons réalisé qu'au plus fort de la crise, le nombre maximal de passage aux urgences était de 110 personnes par jour [45]. Si l'on considère que toutes ces personnes étaient suivies par le site et avec une efficacité de 40 appels par jour par téléopérateur, 50 téléopérateurs pour l'ensemble de l'Île de France sont largement suffisants pour assurer le suivi de la déshydratation, en prenant en compte les fausses alertes. Cependant, en considérant que certaines des personnes âgées suivies n'ont pas ou peu d'accès à Internet, nous serions peut-être conduits à considérer plus de téléopérateurs (cf. Limites de notre modèle).

○ **L'angine de poitrine**

Selon l'Assurance Maladie, l'angine de poitrine (ADP), ou angor, désigne une douleur thoracique qui apparaît généralement pendant un effort ou un stress [46]. Elle survient le plus souvent chez des patients qui présentent une insuffisance coronarienne. Son apparition est favorisée par les facteurs de risque cardiovasculaire. En effet, dans 90 % des cas, l'angine de poitrine est due à l'athérosclérose qui diminue le calibre des artères coronaires, ce qui diminue l'irrigation du cœur [47]. L'intérêt pratique du suivi à distance de cette maladie est que nous connaissons la population à risque et que les symptômes sont facilement observables mais nécessitent des examens complémentaires qui peuvent être réalisés chez un médecin traitant plutôt qu'aux urgences.

Nous n'avons pas eu accès au nombre de personnes atteintes d'ADP ni au nombre de personnes à risque en Île de France. Nous avons donc, dans une hypothèse forte, estimé en comparant des taux divers trouvés sur Internet que le nombre de patients potentiellement à suivre était environ 5 fois supérieur au nombre d'hospitalisations [49]. De plus, nous avons considéré que le nombre d'hospitalisations était proportionnel à la population, ceci afin d'obtenir le nombre d'hospitalisation dues à l'ADP en Île de France à partir du nombre d'hospitalisations dues à l'ADP sur l'ensemble du territoire français. Quant au coût d'une hospitalisation, nous avons 2 données GHM : une hospitalisation pour angine de poitrine sans complications et morbidité associées, CMA, (fréquente) coûte 2257,86 € et une hospitalisation pour angine de poitrine avec CMA (plus rare) coûte 3463,18 € [48]. Nous avons donc estimé que le prix de 2 500 € par hospitalisation était un bon barycentre, bien que peut-être un peu sous-estimé. Néanmoins, le coût d'une hospitalisation n'étant pris en compte que dans les bénéfiques, il valait mieux pour l'étude de la pérennité prendre une estimation basse plutôt que haute. Le taux d'hospitalisations potentiellement évitables est tiré du site scansante.fr [49].

○ Récapitulatif des données

Maladie	Nombre de patients	Coût d'une hospitalisation	Nombre d'hospitalisations évitables	Durée	Genre	Téléopérateurs
Diabète	541 412	8 010 €	1 269	1 an	Chronique	1/4000
ADP	34 035	2 500 €	2 584	1 an	Aiguë	1/2000
Déshydratation	1 785 169	6 000 €	4 596	6 mois	Aiguë	50
Grippe	1 785 169	227 €	641	6 mois	Aiguë	1/2000

Tableau récapitulatif des données utiles pour chaque maladie utilisée dans l'algorithme

3. Nos résultats

Avec notre modèle, nous avons obtenu sur 5 ans un coût de 260 millions d'euros pour un gain de 56 millions d'euros, soit un bénéfice net de 30 millions d'euros pour l'Assurance Maladie. Cette solution impliquerait de suivre 3,5 millions de patients. Le site est donc viable économiquement pour l'Assurance Maladie.

Maladie	Coût	Gain	Bénéfice net	Patients inclus
Diabète	426 300 €	134 100 €	- 292 200	618 557
ADP	1 732 000 €	9 860 000 €	8 128 000 €	54 813
Déshydratation	2 504 000 €	42 900 000 €	39 580 000 €	1 437 516
Grippe	21 660 000 €	3 980 000 €	- 17 680 000 €	1 437 516

Tableau récapitulatif du résultat de l'algorithme pour le suivi de chacune des maladies exemples

Les résultats sont tout à fait cohérents avec nos attentes, sauf pour la grippe. En effet, la grippe étant assez similaire à la Covid, on pouvait s'attendre à ce que le site soit rentable pour son suivi, ce qui n'est pas le cas, sans doute à cause de la surestimation du nombre de téléopérateurs nécessaires. Ce nombre peut être réduit si l'on diminue les fausses alertes, qui représentent 90% des alertes dans le cas de Covidom, en informant mieux le public quant à l'utilisation de l'application. Cependant, le site permet d'éviter 15 920 passages aux urgences, donc répond à l'un des objectifs premiers de désengorgement des urgences, sans compter les décès évités, non comptabilisés. Comme attendu, le télé-suivi du diabète représente une dépense pour l'Assurance Maladie, mais qui est compensée par les gains des autres maladies.

4. Les limites de notre modèle

Notre modèle n'est pas parfait, notamment parce que beaucoup de données ont dû être extrapolées ou approximées, et que celles que nous avons utilisées n'étaient pas forcément cohérentes en termes de temps (utilisation dans un même calcul de données de 2015 et 2008 par exemple) ou trop anciennes pour qu'on puisse considérer qu'elles seraient exactement les mêmes aujourd'hui. Cependant, il est raisonnable de penser que les résultats seraient du même ordre de grandeur avec des données mises à jour, et que la même méthode donnerait des résultats utilisables si elle était appliquée à des données plus adéquates.

D'autre part, il est difficile d'estimer réellement le taux d'hospitalisations évitées. Dans les analyses qui nous ont servi à trouver le nombre d'HPE (Hospitalisation Potentiellement Évitable), l'auteur mentionne la fragilité de l'analyse de par la dépendance au territoire choisi, aux conditions sociales et aux caractéristiques du système de soin [39]. En effet, comment estimer les HPE qui pourraient être concrètement évitées par l'utilisation de la plateforme ? Est-ce la même population qui va utiliser la plateforme et qui fait partie de ces HPE ? Il y a alors de nombreux facteurs à prendre en compte, déjà révélées par l'expérience de Covidom : l'âge, la précarité, le refus de donner ses données ou d'être connecté...

Enfin, nous n'avons pas pu, dans les limites de temps imposées pour cette étude, approfondir la question de l'accessibilité aux ressources numériques. En effet, les populations suivies sur la plateforme, principalement des personnes âgées ou avec peu de revenus, sont celles qui subissent le plus de discrimination numérique. Il faudra donc songer à

5. Perspectives d'amélioration

Par manque de temps, nous n'avons pas quantifié le nombre de morts évitées grâce au site (sur des maladies comme la grippe notamment), ni le gain en qualité de vie (pour les maladies chroniques), qui peut être évalué grâce à l'indicateur QALYs ou un autre [26]. Dans une perspective d'amélioration du modèle, on pourrait prendre en compte ces chiffres dans le résultat du modèle, afin de se rappeler que cette étude concerne un milieu médical dans lequel les dépenses sont nécessaires, et que le but final de toutes les recherches en santé, c'est d'améliorer la qualité des soins fournis aux patients lorsqu'ils en ont besoin.

En expérimentant la plateforme, on pourra avoir un retour d'expérience et ainsi adapter le nombre de téléopérateurs nécessaires ou le rendement par exemple, en ensuite modifier le modèle économique afin de vérifier qu'il reste rentable. On pourrait imaginer un site qui soit au départ financé par le programme ETAPES, dont les subventions sont au maximum de 3 ans [37]. Ensuite, si l'efficacité et la rentabilité du site sont prouvées, l'Assurance Maladie pourra prendre le relais du financement, afin que **le site et le suivi proposés restent entièrement gratuits pour le patient**, conformément aux valeurs du système français de santé.

CONCLUSION

La crise sanitaire du SARS-CoV-2 a mis sous les projecteurs le système de santé français. Fort de cette mise en lumière des problèmes mais aussi des succès de la gestion de la crise, les docteurs Alexandre Bleibtreu et Aurélien Dinh nous ont demandé de nous intéresser au rôle des ingénieurs dans la mise en place d'une stratégie de sortie de crise et dans l'amélioration du télé-suivi des patients atteints de maladies chroniques.

Les conférences auxquelles nous avons pu assister nous ont permis de mener une analyse précise, en nous faisant comprendre les enjeux majeurs de la gestion de la crise : la capacité à tester (beaucoup, rapidement et correctement), la disposition à s'organiser efficacement, la nécessité de tirer des leçons du passé, le besoin d'amélioration de la communication entre les différents acteurs, la prise en compte des patients "non-Covid" ainsi que le désengorgement de l'hôpital. En particulier, l'étude de Covidom a été un vecteur important de cette réflexion : en plus de nous éclairer sur les points venant d'être cités, elle nous a permis de comprendre le rôle du patient, parfois peu ou mal informé.

Afin d'envisager une sortie de crise, la mise en place d'une vaccination efficace nous a paru nécessaire. En prenant en compte les facteurs déterminants des lieux de vaccination et de l'hésitation vaccinale, nous avons simulé informatiquement les résultats et les impacts de la campagne de vaccination proposée par la HAS, avant même que celle-ci commence. Ces résultats ont révélé qu'il est absolument nécessaire que la médecine ambulatoire et les centres collaborent pour répondre efficacement à l'enjeu, et que lutter contre l'hésitation vaccinale n'est pas un aspect à négliger : c'est dans ce sens que nous avons émis un certain nombre de recommandations à destination d'une future campagne de sensibilisation autour de la vaccination.

Deuxièmement, fort du succès de l'application Covidom, nous nous sommes intéressés au développement d'une plateforme de suivi télé-médical avec pour objectifs la simplification du dialogue entre les différents acteurs médicaux, l'amélioration du suivi du patient et la centralisation de ses données médicales en vue de réduire le nombre d'hospitalisations évitables. Nous avons donc déterminé les profils types de patients concernés par la plateforme, analysé leur parcours, identifié des problèmes liés au traitement des alertes, auxquels nous avons proposé des solutions, pour enfin coder un site internet. Ainsi, nous avons pu identifier les problématiques majeures posées par une telle plateforme télé-médicale et répondre aux objectifs que nous nous étions fixés, tout en offrant des pistes de réflexions pour une mise en place à plus grande échelle.

Nous avons aussi étudié l'impact économique du développement d'une telle solution, à travers des calculs précis des coûts engendrés par la plateforme téléphonique et le développement du site, et les gains engendrés par les hospitalisations évitées grâce à ce suivi. Nous avons ainsi démontré qu'elle serait économiquement bénéfique pour l'Assurance Maladie, principalement pour le suivi de maladies aiguës. Mais cette solution pourrait judicieusement s'appliquer à des patients atteints de maladies chroniques qui peuvent avoir du mal à gérer leur maladie ; bien qu'à perte pour l'Assurance Maladie, ce suivi pourrait être compensé financièrement par les gains réalisés sur le suivi des maladies aiguës, mais surtout être bénéfique pour le patient en termes de gain de qualité de vie.

Enfin, de façon plus générale, nous avons découvert à l'issue de ces trois semaines en quoi l'ingénieur généraliste peut apporter des solutions à un problème complexe et spécifique du domaine de la santé. Premièrement, c'est son point de vue extérieur au monde de la santé qui permet à l'ingénieur généraliste d'apporter un regard nouveau et désintéressé sur un domaine spécialisé et porteur de nombreux enjeux. Deuxièmement, le format du projet offre à l'ingénieur généraliste la possibilité de faire appel à ses capacités de résolution d'un problème donné et mal connu au préalable. En effet, nous avons été formés à appréhender, analyser et étudier en détail de nombreux sujets en un laps de temps réduit. Malgré la méconnaissance initiale du sujet spécialisé, une première phase de conférences nous a permis, en tant qu'étudiants ingénieurs généralistes, d'évaluer rapidement, précisément et efficacement les enjeux et les problèmes liés au domaine de la santé soumis à une crise sans précédent. Une seconde phase d'analyse et de recherches de solutions a mis en lumière un troisième atout de l'ingénieur généraliste : la capacité à mettre en place rapidement une organisation et un travail d'équipe cohérents et efficaces.

Dès les premières conférences, les docteurs Alexandre Bleibtreu et Aurélien Dinh ont dit être à la recherche d'un « point de vue d'ingénieur ». En effet, notre formation scientifique nous offre un panel de compétences et une rigueur permettant une analyse rationnelle et systématique du sujet, et une identification précise des parties prenantes, des problèmes et des causes. Le souci de précision et d'exactitude qui nous a été enseigné nous permet d'envisager logiquement le problème donné, tout en comprenant que certaines données sont incomplètes et en prenant en compte les incertitudes dans notre raisonnement. Ceci nous mène à envisager des évolutions, des réorganisations, de nouvelles solutions. Enfin, il nous semble qu'une autre compétence que nous avons su mobiliser dans ce projet est la capacité à envisager mais surtout la mise en place des solutions, c'est-à-dire étudier la possibilité de leur implémentation en faisant intervenir de nombreux paramètres tels que la disponibilité des acteurs, leurs intérêts respectifs, la viabilité économique des projets ou encore l'ergonomie des solutions proposées. Nous avons compris qu'une formation d'ingénieur généraliste nous donne des clefs pour pouvoir envisager de manière globale un domaine complexe et inconnu, afin éventuellement d'apporter une aide - nous l'espérons fortement - à des experts de ce domaine.

Nos solutions, telles qu'elles ont été proposées, sont spécifiques à la crise sanitaire du SARS-CoV-2 mais s'inscrivent dans une réelle volonté d'améliorer significativement le système de santé français. Davantage que des solutions au problème présent, elles constituent des pistes de réflexion pour la gestion de crises futures et la prise en charge de patients atteints de maladies chroniques.

Nous tenons, par la présente, à remercier tous nos conférenciers pour leur apport précieux, au même titre que nos encadrants (Daniel ABERGEL, Frédéric KLETZ, Alain BESSIS et Mickaël BASSON) qui nous ont aidés au cours de ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

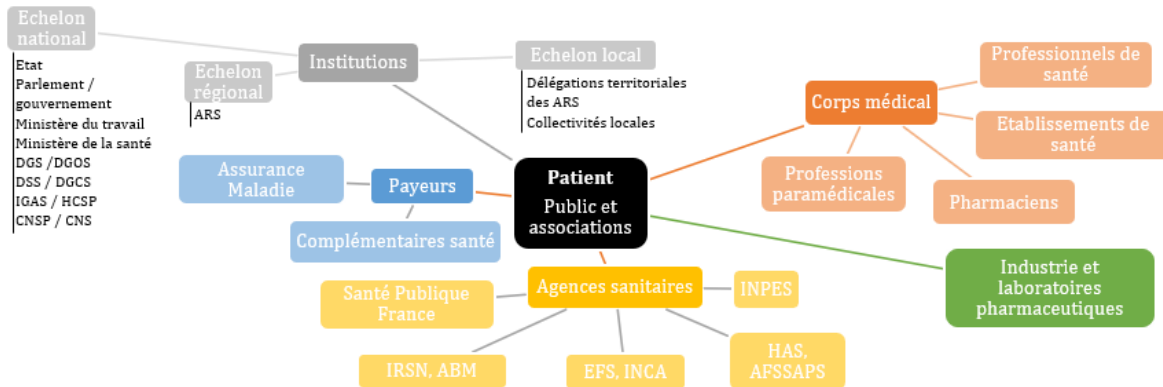
- [1] Dr Alexandre Bleibtreu, « Pandémie à SARS-CoV-2, comment avons-nous tenu face à la première vague. Comment ferons-nous face aux suivantes ? », 16 novembre 2020, Paris
- [2] Dr Aurélien Dinh, « Covidom, retour d'expérience et perspectives », 17 novembre 2020, Paris
- [3] Pr Josselin Lebel, « Organisation des soins primaires dans le contexte de la crise sanitaire », 17 novembre 2020, Paris
- [4] Pr Anne-Geneviève Marcelin, « Le virus SARS-CoV-2 », 18 novembre 2020, Paris
- [5] Dr Michèle Levy-Soussan, « Tri, priorisation, abandon : allocation de ressources rares et juste soin », 18 novembre 2020, Paris
- [6] Alexandre Farnault, « Dynamiques organisationnelles, partenariales et financières d'un projet de télé-suivi en santé : regard d'un régulateur », 19 novembre 2020, Paris
- [7] Pr Patrick Jourdain, « Du neuf avec du vieux ? Télémédecine vers un basculement de paradigme », 19 novembre 2020, Paris-Saclay
- [8] Marie-Anne Ruder, « La Covid 19 : entre gestion de crise et résilience... - l'exemple d'un établissement de santé de référence », 20 novembre 2020, Paris
- [9] Daniel Levy-Bruhl, « La Covid-19 sous l'angle du rapport épidémiologique Santé Publique France », 20 novembre 2020, Paris
- [10] Eva Danton, « La Covid-19 dans le parcours de soin du patient », 23 novembre 2020, Paris
- [11] Nicolas Schimdt, « Développement d'une application de télésuivi : historique de Covidom », 23 novembre 2020, Paris
- [12] Dr Koré Mognon, « La médecine de ville pendant la crise Covid », 24 novembre 2020, Paris
- [13] Frédérick Kletz, « Approche économique du système de santé français », 24 novembre 2020, Paris
- [14] « Système de santé, médico-social et social ». Ministère des Solidarités et de la Santé, 10 novembre 2017, disponible sur <https://solidarites-sante.gouv.fr/systeme-de-sante-et-medico-social/systeme-de-sante-et-medico-social/article/systeme-de-sante-medico-social-et-social>
- [15] Cailloce L. « Quel vaccin contre le Covid-19 ? » CNRS Le journal, 10 novembre 2020. Disponible sur <https://lejournel.cnrs.fr/articles/quel-vaccin-contre-le-covid-19>.
- [16] Radio France. « Vaccin contre le Covid-19 : les Français ont besoin de "transparence" et de "pédagogie" selon une enquête de la fondation Jean-Jaurès ». Franceinfo, 3 décembre 2020, https://www.francetvinfo.fr/sante/maladie/coronavirus/vaccin/vaccin-contre-le-covid-19-les-francais-ont-besoin-de-transparence-et-de-pedagogie-selon-une-enquete-de-la-fondation-jean-jaures_4205541.html
- [17] Boyon, Nicolas. « COVID-19 Vaccination Intent Is Decreasing Globally ». Ipsos, Octobre 2020, disponible sur <https://www.ipsos.com/en/global-attitudes-covid-19-vaccine-october-2020>.
- [18] Bayette C. / CNRS, Modélisation d'une épidémie, partie 1. Disponible sur <http://images.math.cnrs.fr/Modelisation-d-une-epidemie-partie-1.html>
- [19] Laura Zanetti, « Stratégie de vaccination contre le Sars-Cov-2 - Recommandations préliminaires sur la stratégie de priorisation des populations à vacciner ». Haute Autorité de Santé, disponible sur https://www.has-sante.fr/jcms/p_3221338/fr/strategie-de-vaccination-contre-le-sars-cov-2-recommandations-preliminaires-sur-la-strategie-de-priorisation-des-populations-a-vacciner.
- [20] « Covid-19 : seuls 4 Français sur 10 envisagent de se faire vacciner ». ELABE, 18 novembre 2020, <https://elabe.fr/vaccin-covid-19/>.
- [21] Narbey D, Barreto C, Caillat-Vallet E, Baud O, Savey A. "Couverture vaccinale et impact des campagnes de sensibilisation à la vaccination antigrippale chez les professionnels de santé". DOI: [10.25329/hy_xxvii_3-3](https://doi.org/10.25329/hy_xxvii_3-3)
- [22] Sénat (M. Alain MILON, Sénateur). « Rapport d'information fait au nom de la commission des affaires sociales (1) sur l'étude de la Cour des comptes relative l'utilisation des fonds mobilisés pour la lutte contre la pandémie grippale A (H1N1) ». Rapport n°270.
- [23] Kemp, A. (2020). « AZD1222 vaccine met primary endpoint in preventing COVID-19 ». Disponible sur <https://www.astrazeneca.com/media-centre/press-releases/2020/azd1222h1r.html#>

- [24] Moderna (2020), « COVID-19 vaccine (mRNA-1273) ». 16 novembre 2020.
https://www.modernatx.com/sites/default/files/content_documents/mRNA-1273-Update-11-16-20-Final.pdf
- [25] Christine Campese et Equipes de surveillance de la grippe (Santé Publique France). *SURVEILLANCE DE LA GRIPPE EN FRANCE, SAISON 2018-2019*. juillet 2019.
- [26] Buron, Catherine, et al. « L'indicateur QALYs à la lumière de la théorie de l'utilité espérée multi-attribut explicitement décomposée ». *Économie & prévision*, vol. 129, n° 3, 1997, p. 55-71. www.persee.fr, doi :10.3406/ecop.1997.5864.
- [27] Lefebvre, F. (2020) « Lancement de l'Alliance européenne pour le vaccin contre la Covid-19 » (communiqué de presse). Ministère des solidarités et de la santé.
- [28] Jeyanathan M. et al. « Immunological Considerations for COVID-19 Vaccine Strategies ». *Nature Reviews Immunology*, vol. 20, no 10, octobre 2020, p. 615-32. doi:10.1038/s41577-020-00434-6.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7472682/>
- [29] Kaur, Preet S., et Gupta V. « COVID-19 Vaccine: A Comprehensive Status Report ». *Virus Research*, vol. 288, octobre 2020, p. 198114. doi : 10.1016/j.virusres.2020.198114.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7423510/>
- [30] ICNAR ; (2020). « ICNAR report on COVID-19 in critical care : England, Wales and northern Ireland ».
- [31] Le Vu S. / Santé Publique France (2020), Part des formes asymptomatiques et transmission du Sars-Cov-2 en phase pré-symptomatique. Disponible sur <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-et-infections-respiratoires/infection-a-coronavirus/documents/synthese-rapide-des-connaissances/part-des-formes-asymptomatiques-et-transmission-du-sars-cov-2-en-phase-pre-symptomatique-synthese-rapide-covid-19>
- [32] Comprendre la Covid-19, Gouvernement (2020). Disponible sur <https://www.gouvernement.fr/info-coronavirus/comprendre-la-covid-19>.
- [33] Dr Gabriel Nisand, « Que reste-t-il de la sécurité et de la confidentialité des données nominatives en période de crise sanitaire ? », Séminaire National des Hospitaliers, 19 novembre 2020, Paris.
- [34] Ministère des Solidarités et de la Santé. « Groupe homogène de séjours (GHS) ». 17 novembre 2020, <https://solidarites-sante.gouv.fr/professionnels/gerer-un-etablissement-de-sante-medico-social/financement/financement-des-etablissements-de-sante-10795/financement-des-etablissements-de-sante-glossaire/article/groupe-homogene-de-sejours-ghs>.
- [35] Santé Publique France, Point épidémiologique hebdomadaire du 15 octobre 2020
- [36] Capucine Moulas avec AFP, « Coronavirus : combien y a-t-il de lits de réanimation dans les hôpitaux français ? ». Disponible sur <https://www.ladepeche.fr/2020/10/08/coronavirus-combien-y-a-t-il-de-lits-de-reanimation-dans-les-hopitaux-francais-9125989.php>.
- [37] Krychowski, Charlotte, et Robert Picard. *Business models en e-santé : modèle d'émergence et cas d'application*. 2020.
- [38] Haute Autorité de Santé (HAS), « Les enjeux de la stratégie vaccinale contre la Covid-19 ». Disponible sur https://www.has-sante.fr/jcms/p_3216097/fr/les-enjeux-de-la-strategie-vaccinale-contre-la-covid-19
- [39] Agnès Solomniac, et al. *Les hospitalisations potentiellement évitables (HPE)*. Guide méthodologique de calcul de l'indicateur HPE et présentation des principaux résultats, Direction générale de l'offre des soins & ATIH.
- [40] Laurence Mandereau-Bruno et Sandrine Fosse-Edorh. « Prévalence du diabète traité pharmacologiquement (tous types) en France en 2015. Disparités territoriales et socio-économiques ». *Journée Mondiale du Diabète 2017, Santé Publique France*, août 2017.
- [41] Ricci, Pauline, et al. « Dynamique des dépenses hospitalières des personnes traitées pour diabète, en France (2007-2008) ». *Pratiques et Organisation des Soins*, vol. Vol. 41, n° 4, 2010, p. 293-301.
- [42] Améliorer la qualité du système de santé et maîtriser les dépenses - Propositions de l'Assurance Maladie pour 2018, Juillet 2017, Rapport au ministre chargé de la Sécurité sociale et au Parlement sur l'évolution des charges et produits de l'Assurance Maladie au titre de 2018 (loi du 13 août 2004)
- [43] *Les urgences hospitalières, miroir des dysfonctionnements de notre système de santé*.
<https://www.senat.fr/rap/r16-685/r16-6857.html#:~:text=%C2%B7%20La%20caisse%20nationale%20d'assurance,en%20moyenne50>.
 Consulté le 22 novembre 2020.

- [44] *Déshydratation*. <https://www.ameli.fr/assure/sante/urgence/pathologies/deshydratation>. Consulté le 18 novembre 2020.
- [45] Annie-Claude Paty. *Canicule et santé, Bilan Régional été 2017, Région Île-de-France*. Santé Publique France, 2017.
- [46] *Comprendre l'angine de poitrine*. <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/angine-poitrine/comprendre-angine-poitrine>. Consulté le 18 novembre 2020.
- [47] C. Jean. « Angine de poitrine ». Santé sur le net. Disponible sur <https://www.sante-sur-le-net.com/maladies/cardiologie/angine-de-poitrine/>
- [48] ATIH. "Tarif des prestations d'hospitalisation". GHS 1660-1661. Disponible sur : <https://www.atih.sante.fr/sites/default/files/public/content/1212/annexe1tarifs3.pdf>
- [49] *ScanSante*. <https://www.scansante.fr/applications/statistiques-activite-MCO-par-diagnostique-et-actes>.

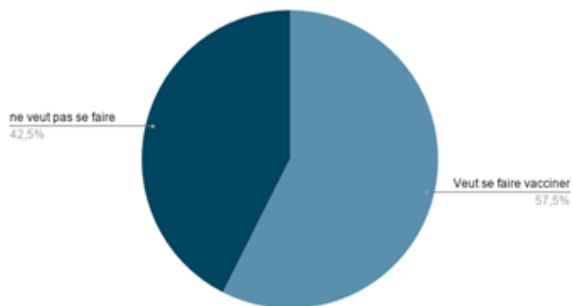
ANNEXES

Annexe 1 : Organisation du système de santé

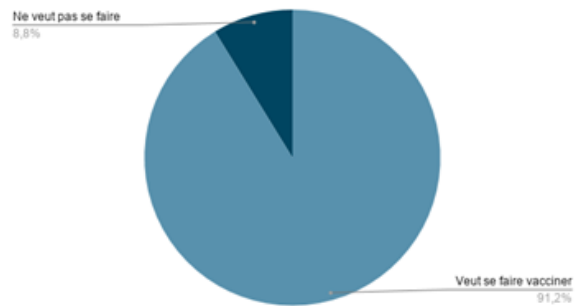


Annexe 2 : Résultats du sondage à propos de la vaccination

Hésitation vaccinale chez les 18-25 ans (362 réponses)

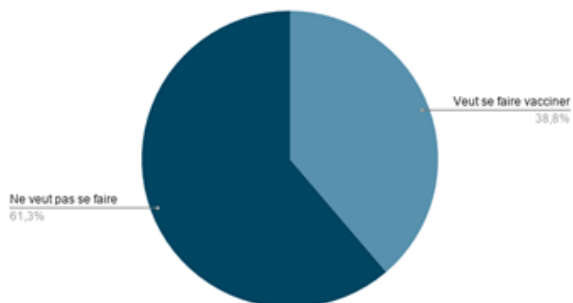


Hésitation vaccinale chez les 26-34 ans (30 réponses)

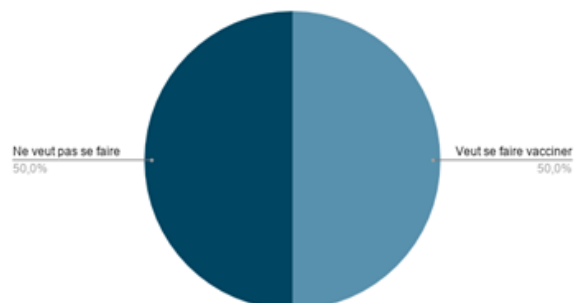


→ ces valeurs sont très différentes des autres mais ne sont le résultat que de 30 réponses, on peut donc se permettre de les ignorer

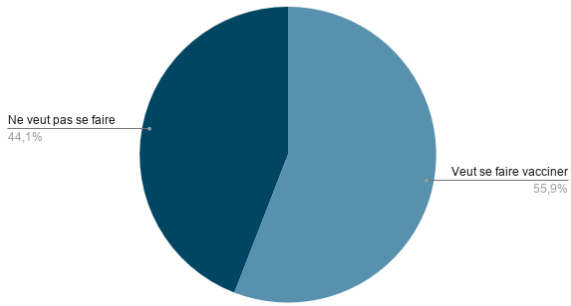
Hésitation vaccinale chez les 35-49 ans (80 réponses)



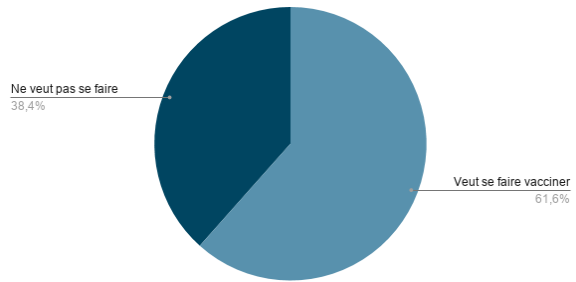
Hésitation vaccinale chez les 50-65 ans (148 réponses)



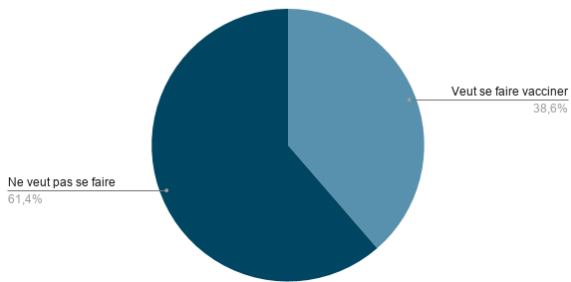
Hésitation vaccinale chez les plus de 65 ans (68 réponses)



Hésitation vaccinale chez les personnes qui se considèrent à risque (111 réponses)

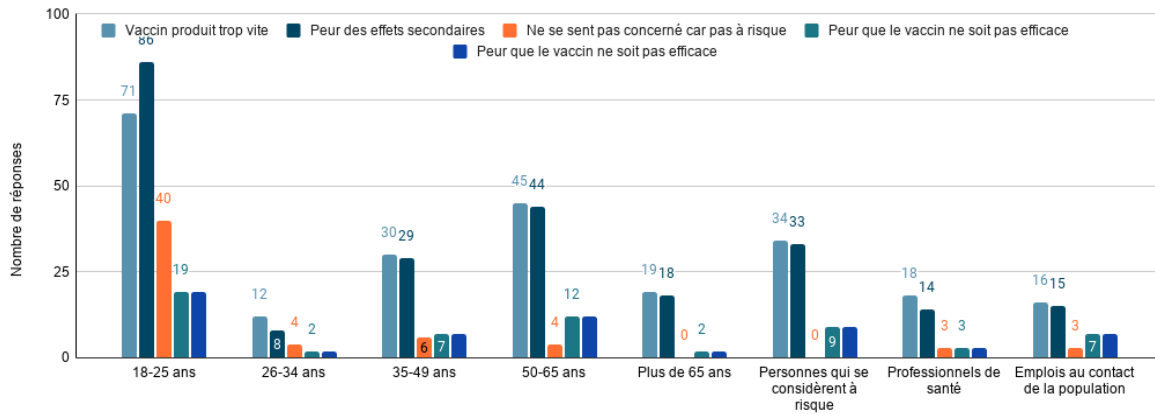


Hésitation vaccinale - emplois proches de la population (44 réponses)



*emplois proches de la population = restaurateurs, commerçants, aides à domicile, enseignants, chauffeurs de bus, de taxi etc.

Causes de l'hésitation vaccinale



Annexe 3 : Précisions sur la simulation numérique

a. Réflexions pour établir la base de la simulation numérique, sous forme d'états

Le modèle sur lequel nous nous sommes basés repose sur la modélisation **SIR** (*Susceptible, Infected, Removed*) [18]. Dans celle-ci, une personne peut être dans un des trois états suivants :

- **Personne saine** : elle est susceptible d'être contaminée par les personnes **infectées**
- **Personne infectée** : elle peut contaminer une personne **saine**, et devient **immunisée** ou **morte** au bout d'un certain temps
- **Personne immunisée ou morte** : elle n'a aucune influence sur l'évolution de l'épidémie

Bien que ce modèle, simple, puisse être utilisé pour certaines maladies, il n'est pas adapté pour suivre l'évolution de la Covid-19. En effet :

- Il ne prend pas en compte les **patients en réanimation**. Or, il est essentiel dans l'optique retenue de pouvoir prendre en compte ce facteur, afin d'observer son évolution et mesurer l'efficacité d'un éventuel vaccin.
- Il ne prend pas en compte la subtilité **symptomatique / asymptomatique**, qui est caractéristique du Covid-19 : un asymptomatique devient nécessairement immunisé, alors qu'un symptomatique peut développer des formes graves pouvant l'amener à entrer dans un service de réanimation, voire décéder. D'autres extensions du modèle (SEIR notamment [18]) prennent en compte cette subtilité : nous nous sommes inspirés de son fonctionnement pour ce point.
- Il ne prend pas en compte le **temps d'incubation**. Celui-ci, non négligeable, induit un temps de réponse de la population infectée d'environ 4 jours.
- Il ne prend pas en compte la **perte d'immunité**. Bien que celle-ci ne soit pas encore formellement démontrée dans les publications scientifiques, elle est de plus en plus soupçonnée par les spécialistes de la maladie. A nouveau, d'autres extensions du modèle (SEIRS ici [18]) prennent en compte cette subtilité, et nous nous en sommes inspirés.

C'est dans ces considérations que nous avons retenu non plus trois, mais sept états différents, détaillés dans le rapport.

b. Les données utilisées pour relier les états entre eux

Chaque état est relié aux autres par des **proportions** et des **temps caractéristiques**. Par exemple :

- Il existe un temps caractéristique d'incubation, avant de devenir contagieux (symptomatique ou asymptomatique)
- Il existe une proportion de contagieux qui sont symptomatiques, parmi l'ensemble des contagieux (symptomatiques et asymptomatiques).

Ainsi, on définit les valeurs suivantes, permettant de mettre en relation tous les états entre eux. Lorsqu'une valeur est variable, son évolution est détaillée ensuite :

Nom	Définition	Valeur et commentaires
N	Population française	67 000 000. On ne prend pas en compte les naissances ni les décès naturels
β	Nombre de personnes contaminées par personne contaminée par jour	Variable (estimations des auteurs)
b	Inverse du temps caractéristique d'incubation (en jours)	1 / 4 [32]

c	Proportion des personnes ayant incubé la maladie qui développent une forme asymptomatique	0,243 [31] (variable pour une personne vaccinée)
d	Inverse du temps caractéristique de la durée de l'état de contagion (symptomatique ou asymptomatique)	1 / 14 (estimation des auteurs sur base des conférences) (variable pour une personne vaccinée)
e	Proportion de personnes contagieuses symptomatiques allant en réanimation	Variable en fonction de l'âge et du vaccin
f	Inverse du temps caractéristique nécessaire à une personne symptomatique pour développer une forme grave, dans le cas échéant	1 / 8.5 (estimation des auteurs sur base des conférences)
g	Proportion de personnes en service de réanimation qui décèdent	Variable en fonction de l'âge
h	Proportion de personnes contagieuses symptomatiques qui meurent chez elles	0,052% (estimation des auteurs)
i	Inverse du temps caractéristique du temps passé en réanimation, dans le cas d'un décès	1/9.5 [30]
j	Inverse du temps caractéristique passé en réanimation, dans le cas de la survie	1/12 [30]
k	Inverse du temps caractéristique de perte d'immunité	1/180, et 1/360 si vaccin (estimation des auteurs)
l	Proportion d'immunisés qui perdent leur immunité	100%, et 50% si vaccin (estimation des auteurs)

Détail de ces chiffres (le cas échéant) :

- β : cette valeur varie selon la tranche d'âge (à titre d'exemple, une personne âgée se sachant à risque rencontre moins de personnes qu'un étudiant en résidence). Ainsi, nous avons retenu de modéliser ce chiffre sous forme de matrice symétrique, correspondant à la valeur de β en fonction des catégories de personnes qui interagissent. Le tableau ci-après donne les valeurs retenues pour **R0** (nombre de personnes infectées par une personne contagieuse, tout au long de sa période de contagion) sous l'hypothèse qu'il **n'y ait pas de confinement ni de gestes barrières**. Pour passer de R0 à β , il suffit de diviser par la durée moyenne de contagion (14 jours). Par exemple, la case (3, 2) indique que le nombre moyen de personnes de la catégorie 3 (26-34) contaminées par une personne contagieuse de la catégorie 2 (15-25) est de 7, tout au long de la période de contagion. En cas de gestes barrières, on multiplie ce chiffre par **0.3**. Dans le cas d'un confinement, on se référera au deuxième tableau.

R0 (sans confinement)	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7
------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Cat. 1	4	1.7	2.2	2.2	1.8	1.7	1.7
Cat. 2	1.7	7.3	7	4.8	2.5	1.7	1.7
Cat. 3	2.2	7	7.3	4.8	2.5	1.7	1.7
Cat. 4	2.2	4.8	4.8	2.5	2.2	1	1.7
Cat. 5	1.8	2.5	2.5	2.2	2	1.9	1.9
Cat. 6	1.7	1.7	1.7	1	1.9	1	1
Cat. 7	1.7	1.7	1.7	1	1.9	1	1

R0 (confinement)	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7
Cat. 1	1.2	0.6	1	1	0.8	0.4	0.4
Cat. 2	0.6	2	1.4	1.4	1.2	0.4	0.4
Cat. 3	1	1.4	1.4	1.4	1.2	0.4	0.4
Cat. 4	1	1.4	1.4	0.8	0.8	0.4	0.4
Cat. 5	0.8	1.2	1.2	0.8	0.8	0.4	0.4
Cat. 6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9
Cat. 7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9

- **c** : si la personne est vaccinée, cette valeur se voit affectée la valeurs $1-c_v$, où c_v est la proportion de personnes vaccinées en incubation développant des symptômes (détaillé dans la section “COMMENT IMPLÉMENTER UNE STRATÉGIE VACCINALE ?”)
- **d** : si la personne est vaccinée, cette valeur est divisée d'un facteur 100 (détaillé dans la même section)
- **e** : cette donnée est très difficilement estimable. En effet, bien que l'on sache parfaitement l'occupation des lits de réanimation, on ne connaît pas avec certitude l'évolution des personnes symptomatiques. Le tableau ci-après récapitule les valeurs estimées par les auteurs sur base de données de l'ICNARC [30]. A première vue, il peut paraître contre-intuitif que la proportion de personnes acceptées en réanimation soit plus faible pour la catégorie 7 que pour la catégorie 6, mais cela est justifié par le fait déjà mentionné que plus une personne est âgée, moins elle supporte la réanimation : les médecins hospitaliers prennent en compte ce facteur au moment d'accepter ou non un patient en réanimation.

Catégorie d'âge	Non-vaccinée	Vaccinée (division par 100)
Catégories 1 à 4 (0 à 49 ans)	0,02 %	0,0002 %
Catégorie 5 (50 à 65 ans)	0,2 %	0,002 %
Catégorie 6 (66 à 74 ans)	0,7 %	0,007 %
Catégorie 7 (plus de 75 ans)	0,6 %	0,006 %

- **g** : voici les chiffres retenus, basées sur les données de l'ICNARC [30] et sur les estimations des auteurs :

Catégorie d'âge	Valeur de g
Catégories 1 à 5 (0 à 65 ans)	5 %
Catégorie 6 (66 à 74 ans)	20 %
Catégorie 7 (plus de 75 ans)	40 %

c. Comment catégoriser la population par âge ?

Nous l'avons indiqué dans le rapport : une de nos demandes était de pouvoir séparer la population française par âge, et d'affecter à chaque tranche des valeurs spécifiques. Pour cela, nous avons retenu la distribution suivante (les pourcentages sont issus des données de l'INSEE) :

Catégorie	Âge	Rapport à la population totale (%)
1	0-14	17,8%
2	15-25	11,8%
3	26-34	11,5%
4	35-49	19,1%
5	50-65	19,2%
6	66-74	11,2%
7	75+	9,4%

d. La justification du choix des paramètres du vaccin, et de leurs valeurs

Le choix fait dans le rapport est justifié, car il permet de prendre en compte respectivement ces trois aspects fondamentaux d'un vaccin :

- La **protection face aux formes graves** de la maladie (fondamental, vu l'objectif fixé)
- La **protection face à la maladie symptomatique** (ce que l'on attend « classiquement » d'un vaccin)
- La **protection face à la contagion asymptomatique** du virus : cet aspect est plus subtil. En effet, les entreprises pharmaceutiques produisant les vaccins contre la Covid-19 n'annoncent toujours pas si une personne vaccinée protégée contre la maladie continuerait tout de même à transmettre la maladie (voir [24] par exemple). En modifiant la durée de la maladie dans le cas contagieux asymptomatique (division par un facteur d'ordre 100), on simule le fait qu'une grande partie de la population non symptomatique passe directement à l'état sain (ne développe pas la maladie et ne contamine personne) et qu'une petite partie soit contagieuse asymptomatique (ne développe pas la maladie, mais contamine quand même)⁵.

Nous détaillons à présent le raisonnement effectué pour trouver les valeurs.

La première valeur concerne **l'envoi en réanimation**. Formellement, c'est le facteur par lequel est multiplié la proportion de personnes symptomatiques non-vaccinées envoyées en service de réanimation pour obtenir la proportion de personnes symptomatiques vaccinées envoyées en service de réanimation. Etant donné que le peu d'informations sur le sujet sont surprenantes (le laboratoire Moderna annonce par exemple qu'aucun patient vacciné ne termine en réanimation [24]), on choisit la valeur raisonnable mais arbitraire de **0,01**.

⁵ On remarque l'emploi des termes peu précis « une grande partie » et « une petite partie ». Cela témoigne du peu d'informations dont nous avons pu disposer pour élaborer notre modèle. Cependant, le choix fait penche clairement pour une transmission asymptomatique faible. Une étude sur l'influence de ce paramètre est située dans la section suivante.

La deuxième valeur concerne son influence pour protéger de la maladie. Formellement, c'est la proportion de personnes vaccinées qui incubent le virus et qui deviennent contagieuses symptomatiques. On retiendra la valeur **0,042**. Voici le détail du calcul (effectué avec les données du vaccin Moderna [24]) :

Soit x la valeur cherchée, V l'évènement "être vacciné", S l'évènement "être symptomatique" et I l'évènement "incuber le virus". On a alors $x = \frac{P(V \cap S)}{P(V \cap I)} = \frac{P(S|V)}{P(I|V)}$.

Or, par la formule des probabilités totales, $P(S|V) = \frac{P(S) - P(S|V^c)P(V^c)}{P(V)}$ donc :

$$x = \frac{P(S) - P(S|V^c)(1-P(V))}{P(V \cap I)}$$

Or, d'après les données de Moderna (et le fait qu'environ 75% des infectés non-vaccinés soient symptomatiques) :

$$P(S) = 95/30\ 000$$

$$P(S|V^c) = 90/15\ 000$$

$$P(V) = 0,5$$

$$P(V \cap I) = P(V)P(I) = 0,5 \cdot \frac{1}{0,75} \cdot \frac{90}{15\ 000}$$

(En effet, il y a indépendance entre être vacciné et être infecté ; de plus, dans le cas non-vacciné, on sait passer du nombre de symptomatiques au nombre d'infectés (facteur 0,75))

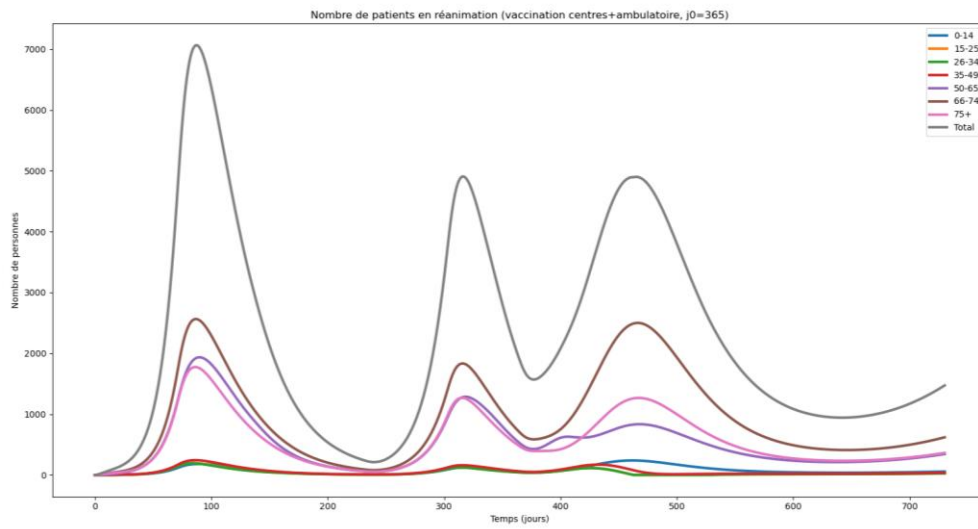
On trouve donc finalement :

$$x = 4,2\%$$

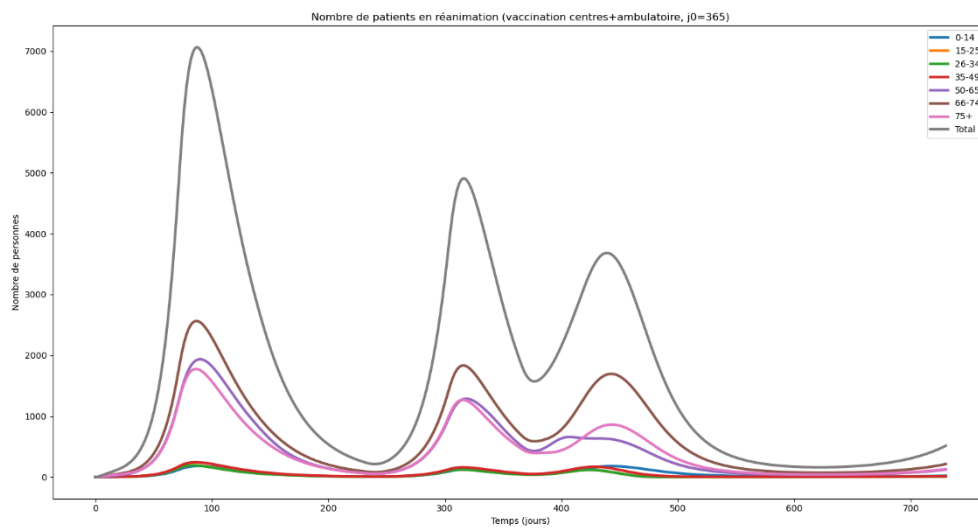
La troisième valeur concerne son influence sur la durée de la maladie, dans le cas contagieux asymptomatique (formellement, temps pendant lequel un contagieux asymptomatique est dans cet état). On retiendra la valeur **0.01** (voir partie correspondante du rapport pour explications).

e. Influence de la variation du temps caractéristique de contagion asymptomatique pour des personnes vaccinées

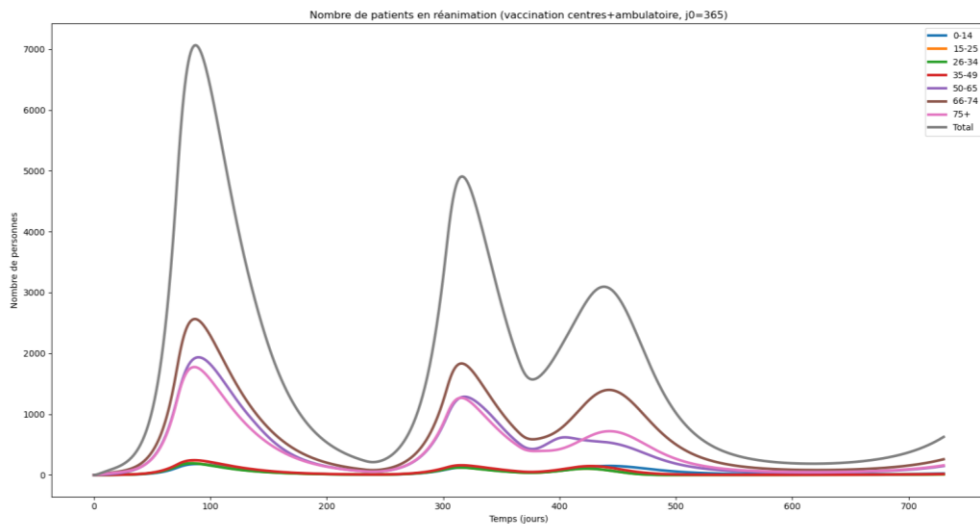
Cette section vise à étudier l'influence qu'a la variation du paramètre correspondant au **temps caractéristique de la contagion asymptomatique**, dans le cadre d'une **personne vaccinée**. On a choisi de représenter quatre valeurs différentes, tout en laissant les autres paramètres constants. Pour illustrer les variations, on a choisi une vaccination avec centres et médecine ambulatoire, démarrant au 1/1/2021. Aucun confinement ni geste barrière n'est pris en compte pour l'année 2021. On observe l'influence sur l'occupation des lits de réanimation pendant l'année 2021, notamment sur la "troisième vague".



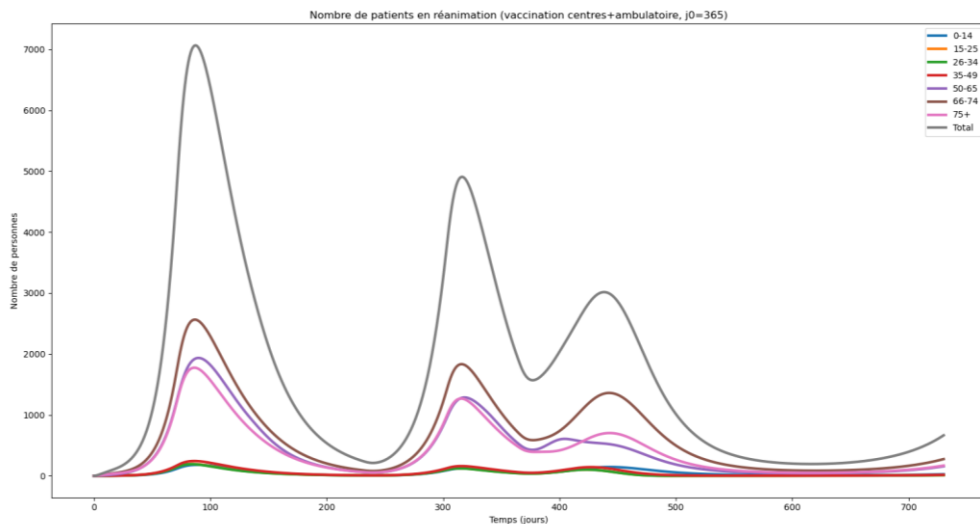
Courbe de réanimations pour la valeur $d=1/14$ pour une personne vaccinée (correspond à une valeur inchangée qu'il y ait vaccination ou non)



Courbe de réanimations pour la valeur $d=1$ pour une personne vaccinée



Courbe de réanimations pour la valeur $d=1/0.1$ pour une personne vaccinée (valeur choisie)



Courbe de réanimations pour la valeur $d=1/0.01$ pour une personne vaccinée

Nous remarquons que, par rapport à la valeur retenue $d=1/0.1$, les changements ne sont pas significatifs pour $d = 1/0.01$.

Ils sont légèrement significatifs pour $d = 1/1$ (le pic de réanimations atteint 3500 personnes pendant la troisième vague au lieu de 3000) et pour $d = 1/14$ (le pic atteint 5000 personnes au lieu de 3000).

Cependant, cette dernière valeur extrême suppose que chaque individu vacciné ne développant pas de forme symptomatique soit un contagieux asymptomatique de la maladie pendant 14 jours ; c'est-à-dire que cela suppose que le vaccin ne protège pas du tout contre la contamination. Il est raisonnable de supposer que ce n'est pas le cas dans la réalité.

De même, la valeur $d = 1/1$ suppose qu'une grande partie transmet le virus, sans pour autant être contagieux pendant 14 jours : les personnes asymptomatiques contaminent en moyenne pendant 1 jour). Là encore, c'est une supposition que l'on peut raisonnablement écarter.

On retiendra donc la valeur de $d = 1/0.1$. Celle-ci suppose qu'une partie de la population vaccinée asymptomatique ne contamine personne (contagieuse pendant zéro jours). Néanmoins, il est bon de garder en mémoire qu'il s'agit d'un scénario raisonnablement optimiste. S'il venait ne se réalisait pas, cela supposerait une légère augmentation de l'occupation des lits de réanimation.

f. Formalisation mathématique des états retenus

o Sans stratégie vaccinale

Les équations différentielles obtenues dans le cas où la stratégie vaccinale n'est pas prise en compte sont relativement simples. Traduisant les relations mises en lumière ci-dessus, elles s'écrivent, **pour chaque catégorie d'âge** :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta \cdot [CS(t) + CA(t)] \cdot \frac{S(t)}{N} + k \cdot l \cdot Imm(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = +\beta \cdot [CS(t) + CA(t)] \cdot \frac{S(t)}{N} - b \cdot I(t) \\ \frac{dCA(t)}{dt} = +c \cdot b \cdot I(t) - d \cdot CA(t) \\ \frac{dCS(t)}{dt} = +(1-c) \cdot b \cdot I(t) - (e+h) \cdot f \cdot CS(t) - (1-e-h) \cdot d \cdot CS(t) \\ \frac{dRea(t)}{dt} = +e \cdot f \cdot CS(t) - g \cdot i \cdot Rea(t) - (1-g) \cdot j \cdot Rea(t) \\ \frac{dImm(t)}{dt} = +d \cdot CA(t) + (1-e-h) \cdot d \cdot CS(t) + (1-g) \cdot j \cdot Rea(t) - k \cdot l \cdot Imm(t) \\ \frac{dD(t)}{dt} = +h \cdot f \cdot CS(t) + g \cdot i \cdot Rea(t) \end{array} \right.$$

Les valeurs utilisées dans ces équations correspondent à celles détaillées dans l'annexe correspondante. On réduit ensuite ce système à l'ordre 1 :

$$\frac{dX}{dt} = F(t, X), \text{ avec } X = \begin{pmatrix} S(t) \\ I(t) \\ CS(t) \\ CA(t) \\ Rea(t) \\ Imm(t) \\ D(t) \end{pmatrix}$$

où:

- $S(t)$ représente le nombre d'individus sains

- $I(t)$ représente le nombre d'individus en incubation

- $CA(t)$ représente le nombre d'individus contaminés asymptomatiques

- $CS(t)$ représente le nombre d'individus contaminés symptomatiques

- $Rea(t)$ représente le nombre d'individus en réanimation

- $Imm(t)$ représente le nombre d'individus immunisés

- $D(t)$ représente le nombre d'individus décédés

Le vieillissement de la population étant négligé, les sept équations d'une catégorie d'âge donnée sont indépendantes de celles d'une autre catégorie. Ainsi, il suffit de multiplier ce nombre d'équations par le nombre de catégories d'âges (7) pour obtenir le système complet (qui contient donc **49 équations différentielles**).

○ Avec stratégie vaccinale

En première approximation, on retiendra uniquement que, dans notre modélisation, la mise en place d'un vaccin suppose de **doubler le nombre de catégories** (chaque catégorie d'âge est ou non vaccinée). Il y en a donc désormais 14. Cela implique qu'il y ait finalement **98 équations différentielles** à résoudre. Vacciner quelqu'un revient alors à le déplacer :

- De l'état « sain » de la catégorie non-vaccinée correspondant à son âge
- A l'état « sain » de la catégorie vaccinée correspondant à son âge⁶

Pour implémenter le fait qu'un vacciné perde son immunité, il suffit de :

- Le déplacer de l'état « immunisé » de la catégorie vaccinée correspondant à son âge
- A l'état « sain » de la catégorie non-vaccinée correspondant à son âge

Ainsi, les seules équations impactées sont les 14 équations différentielles régissant le nombre de personnes saines. Elles le sont par ailleurs toutes de la même manière.

g. Méthode utilisée pour prendre en compte les gestes barrières et le confinement

Pour prendre en compte ces mesures gouvernementales, nous avons supposé qu'elles n'avaient d'influence que sur le facteur β (nombre de personnes contaminées par personne contagieuse par jour). On se référera à l'annexe 2b sur les valeurs retenues pour connaître la valeur de ce paramètre, lorsqu'il n'y a aucune réglementation particulière, ou lorsqu'il y a un confinement.

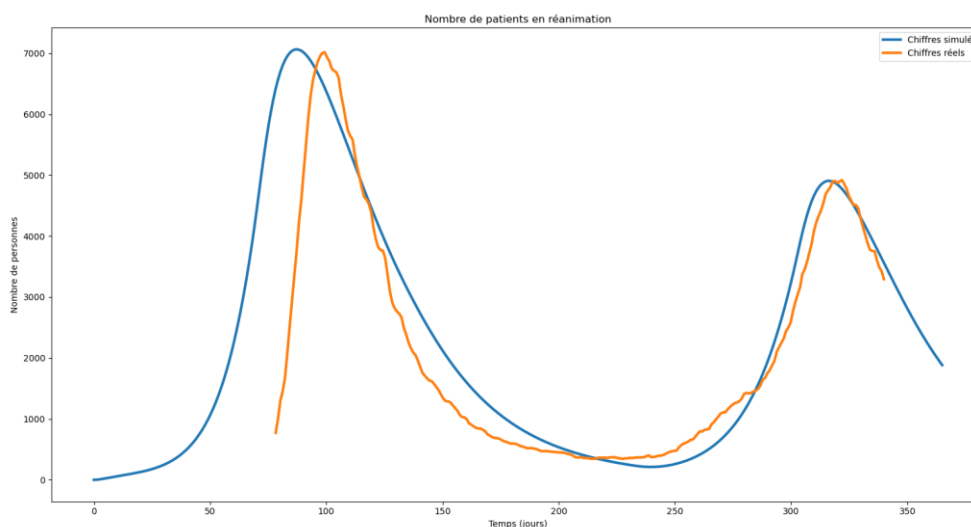
⁶ Cela suppose d'avoir une provision suffisante en personnes saines non-vaccinées. Il n'y a aucune vérification faite dans l'algorithme sur ce point. On considère néanmoins que la quantité de personnes vaccinées a été réfléchi à l'avance, afin de ne pas vacciner plus de personnes qu'il n'y a dans sa catégorie correspondante. Cependant, il se peut que même si la provision soit *théoriquement* suffisante dans la catégorie correspondante, il n'y en ait pas assez dans l'état « sain » (et qu'elles soient dans l'état « immunisé »); cependant, la réponse du système étant *relativement* rapide, un nombre négatif de personnes saines serait rapidement compensé par la perte d'immunité des immunisés.

Pour ce qui est des gestes barrières, nous avons supposé qu'ils multipliaient par 1/3 le facteur β habituel. Peu d'informations précises et documentées sont connues sur l'influence des gestes barrières sur β , mais le choix de cette valeur concordait avec l'expérience sur l'année 2020.

h. Implémentation numérique et vérification de la pertinence du modèle

La formalisation mathématique de cette modélisation est située en annexe. Pour résoudre les équations trouvées, on décide d'utiliser le langage Python, ainsi que la fonction `odeint` du module `scipy.integrate` (permettant de résoudre des systèmes ordinaires tels que celui-ci). Le code développé se situe lui aussi en annexe.

Avant d'utiliser notre modèle pour prévoir l'efficacité de la stratégie de vaccination, il est nécessaire de **vérifier qu'il permet d'anticiper correctement des expériences vérifiées**. Ici, l'expérience correspond à ce qui s'est réellement passé durant l'année 2020, en prenant en compte les deux confinements ainsi que les gestes barrières (plus ou moins efficaces selon des périodes).⁷ Concrètement, on vérifie le seul paramètre connu avec certitude : l'occupation des lits en réanimation au cours du temps.⁸



Comparaison des courbes modélisée et réelle des patients en réanimation sur l'année 2020

En l'occurrence, nous remarquons que globalement, les résultats concordent (mêmes amplitudes de vagues, même ordre de grandeur pendant l'été, croissance similaire).

Dorénavant, nous ferons l'hypothèse que la modélisation et les valeurs retenues seront encore pertinentes dans les prochains mois. De cette manière, **le modèle peut donc être légitimement utilisé pour prévoir l'évolution de la situation en France**.

i. Le code de la modélisation

Voici le code de la modélisation retenu. Il y a trois classes : une principale qui résout les équations différentielles, une concernant les patients, et une concernant le vaccin.

La classe principale :

```
import numpy as np
from scipy.integrate import odeint
import matplotlib.pyplot as plt
```

⁷ On détaille en annexe 2g la méthode utilisée pour prendre en compte un confinement et des gestes barrières.

⁸ En effet, l'évolution réelle des personnes saines, en incubation, etc. ne peut être estimée que très approximativement : ce ne sont donc pas des critères cohérents pour vérifier l'exactitude du modèle. Par ailleurs, le nombre de lits occupés en réanimation sera le critère utilisé dans tout ce rapport pour vérifier la correspondance de l'expérience et de la simulation.

```

import Individu
import vaccin

"""
MIG SANTE - Décembre 2020
Mini Projet Vaccination
Simulation de la vaccination du Covid

Auteurs : Jean-Pierre-Louis Communal, Mathilde Ceripa, Maëlle Thaller, Antoine Poirier & César Almecija

Voir rapport pour avoir d'éventuels détails
"""

"""
Constantes de la simulation :
- N : population totale
- Temps : en jour, de la simulation
- infectes_dep : nombre d'infectés au départ, par catégorie d'âge

- etats possibles : nombre d'états
- noms_etats : nom des états choisis

- nb_categories : nombre de catégories d'âge (il y a donc en réalité deux fois ce nombre de catégories, en comptant les vaccinés)
- noms_categories : les noms pour les nb_categories*2 catégories totales
- prcentage_categories : pourcentages de la population totale pour chacune des nb_categories*2 catégories, à t=0.
- objets_categories : les objets de type Individu correspondant à chacune des nb_categories*2 catégories
- noms_categories_regroupees : les noms des nb_categories d'âges (regroupement vaccinées/non-vaccinés)

- strategie_vaccinale : indique la stratégie choisie, parmi :
  0 : aucune vaccination
  1 : vaccination HAS, centres+ambulatoire
  2 : vaccination HAS, ambulatoire
  3 : vaccination HAS, centres
  4 : vaccination HAS, centres, sans hésitation
- noms_strategies : table des noms des stratégies vaccinales
- j0 : jour d'arrivée des vaccins
- seconde_vac : temps avant seconde vaccination
- fin_etape1_amb et al. : temps avant la fin de l'étape 1 de la stratégie de la HAS, en utilisant uniquement la médecine ambulatoire

- vaccins : liste des vaccins disponibles (actuellement un seul vaccin "moyen")

- vaccinables_par_jour et al. : vaccinables par jour selon le mode de vaccination choisi
"""

N = 66000000
temps = 365*2
infectes_dep = 10000

patient_rea_reel = [771, 1002, 1297, 1453, 1674, 2080, 2516, 2935, 3351, 3758, 4236, 4592, 5056, 5496, 5940, 6305, 6556, 6723, 6859, 6948, 7004, 7019, 6937, 6875, 6752, 6714, 6690, 6599, 6331, 6139, 5922, 5733, 5644, 5584, 5334, 5127, 4967, 4785, 4641, 4598, 4526, 4392, 4128, 3947, 3819, 3770, 3762, 3639, 3375, 3095, 2911, 2820, 2764, 2728, 2666, 2496, 2385, 2256, 2162, 2091, 2047, 1958, 1854, 1754, 1708, 1664, 1628, 1618, 1572, 1519, 1467, 1395, 1328, 1293, 1287, 1270, 1221, 1179, 1133, 1065, 1030, 1024, 995, 926, 904, 875, 851, 843, 841, 818, 792, 744, 724, 699, 687, 687, 673, 654, 630, 623, 606, 594, 594, 591, 574, 554, 545, 533, 517, 521, 521, 511, 503, 486, 471, 470, 473, 467, 465, 457, 456, 452, 450, 448, 442, 430, 420, 411, 385, 368, 367, 374, 361, 356, 357, 347, 344, 345, 360, 364, 360, 366, 359, 366, 368, 372, 367, 355, 351, 344, 353, 353, 361, 357, 362, 368, 367, 368, 371, 387, 401, 375, 373, 381, 394, 396, 403, 418, 440, 458, 467, 476, 480, 531, 568, 593, 608, 628, 655, 662, 705, 752, 796, 793, 820, 827, 834, 912, 944, 995, 1041, 1092, 1105, 1112, 1158, 1198, 1232, 1259, 1270, 1289, 1335, 1409, 1426, 1416, 1427, 1448, 1465, 1492, 1548, 1642, 1673, 1750, 1800, 1877, 1948, 2099, 2177, 2248, 2319, 2441, 2500, 2584, 2770, 2918, 3045, 3156, 3377, 3452, 3578, 3730, 3878, 4089, 4230, 4331, 4421, 4539, 4690, 4750, 4803, 4899, 4903, 4871, 4896, 4919, 4854, 4775, 4653, 4582, 4509, 4509, 4454, 4289, 4148, 4018, 3883, 3777, 3756, 3751, 3605, 3488, 3425, 3293]

```



```

nb_etats = 7
noms_etats = ["Sains", "Incubations", "Contagieux Asympt.", "Contagieux Sympt.", "Reanimations", "Immunisés",
"Décès"]

nb_categories = 7*2
noms_categories = ["0-14 non vaccinés", "15-25 non vaccinés", "26-34 non vaccinés", "35-
49 non vaccinés", "50-65 non vaccinés", "66-74 non vaccinés", "75+ non vaccinés",
"0-14 vaccinés", "15-25 vaccinés", "26-34 vaccinés", "35-49 vaccinés", "50-65 vaccinés", "66-
74 vaccinés", "75+ vaccinés"]
prctage_categories = np.array([17.8, 11.8, 11.5, 19.1, 19.2, 11.2, 9.4, 0, 0, 0, 0, 0, 0])/100
objets_categories = []
noms_categories_regroupees = ["0-14", "15-25", "26-34", "35-49", "50-65", "66-74", "75+"]

strategie_vaccinale = 4
j0 = 365
noms_strategies = ["aucune vaccination, j0=" + str(j0), "vaccination centres+ambulatoire, j0=" + str(j0), "va
ccination ambulatoire, j0=" + str(j0), "vaccination centres, j0=" + str(j0), "vaccination centres sans hésita
tion, j0=" + str(j0)]
seconde_vac = 0

fin_etape1_amb = 38
fin_etape2_amb = 81
fin_etape3_amb = 205

fin_etape1_centres = 28
fin_etape2_centres = 60
fin_etape3_centres = 153

fin_etape1_tout = 16
fin_etape2_tout = 35
fin_etape3_tout = 88

fin_etape1_nohes_centres = 69
fin_etape2_nohes_centres = 134
fin_etape3_nohes_centres = 321

vaccins = []

vaccinables_par_jour_ambulatoire = 150000
vaccinables_par_jour_centres = 200000
vaccinables_par_jour_tot = vaccinables_par_jour_ambulatoire + vaccinables_par_jour_centres

def etatVaccination(t):
    """
    Nombre de personnes vaccinées par jour, si provision

    Retourne un tableau de taille nb_categories qui contient, pour chaque catégorie de population, le nombre
de personnes vaccinées par jour

    Basé sur la constante strategie_vaccinale :
    0 : aucune vaccination
    1 : vaccination HAS, centres+ambulatoire
    2 : vaccination HAS, ambulatoire
    3 : vaccination HAS, centres
    4 : vaccination HAS, centres, sans hésitation

    Rappel de la stratégie de la HAS (simplification avec uniquement les tranches d'âge, sans prendre en comp
te les à risque, personnels, etc.):
    - Etape 1 = On vaccine en premier les catégories de population 5 & 6 (65+)
    - Etape 2 = On vaccine ensuite la catégorie 4 (50-65)
    - Etape 3 = On vaccine enfin 1, 2 & 3 (15+)

    On considère que le jour de lancement de la stratégie de vaccination correspond à j0 + seconde_vac, ie le
temps mis avant que les secondes
vaccinations ne soient distribuées (ralentit donc le processus)
    """

```

```

tableau_vaccination = np.zeros( (nb_categories,) )

if strategie_vaccinale == 0:
    return tableau_vaccination

jour_lancement = j0 + seconde_vac

fin_etape1 = 0
fin_etape2 = 0
fin_etape3 = 0
vaccinables_par_jour = 0

if strategie_vaccinale == 1:
    fin_etape1 = fin_etape1_tout
    fin_etape2 = fin_etape2_tout
    fin_etape3 = fin_etape3_tout
    vaccinables_par_jour = vaccinables_par_jour_tot

if strategie_vaccinale == 2:
    fin_etape1 = fin_etape1_amb
    fin_etape2 = fin_etape2_amb
    fin_etape3 = fin_etape3_amb
    vaccinables_par_jour = vaccinables_par_jour_ambulatoire

if strategie_vaccinale == 3:
    fin_etape1 = fin_etape1_centres
    fin_etape2 = fin_etape2_centres
    fin_etape3 = fin_etape3_centres
    vaccinables_par_jour = vaccinables_par_jour_centres

if strategie_vaccinale == 4:
    fin_etape1 = fin_etape1_nohes_centres
    fin_etape2 = fin_etape2_nohes_centres
    fin_etape3 = fin_etape3_nohes_centres
    vaccinables_par_jour = vaccinables_par_jour_centres

if 0 <= t < jour_lancement:
    # Pas encore de vaccin
    return tableau_vaccination

if jour_lancement <= t < jour_lancement + fin_etape1:
    # Vaccin, étape 1
    tableau_vaccination[5] = vaccinables_par_jour * 0.46
    tableau_vaccination[6] = vaccinables_par_jour * 0.54
    return tableau_vaccination
elif jour_lancement + fin_etape1 <= t < jour_lancement + fin_etape2:
    # Vaccin étape 2
    tableau_vaccination[4] = vaccinables_par_jour
    return tableau_vaccination
elif jour_lancement + fin_etape2 <= t < jour_lancement + fin_etape3:
    # Vaccin étape 3
    tableau_vaccination[1] = vaccinables_par_jour * 0.3
    tableau_vaccination[2] = vaccinables_par_jour * 0.29
    tableau_vaccination[3] = vaccinables_par_jour * 0.41
    return tableau_vaccination

return tableau_vaccination

def etatReglementation(t):
    """
    Donne l'état de la réglementation au temps t
    0 si aucune réglementation
    1 si confinement
    2 si gestes barrieres
    """

    if 0 <= t < 70:

```

```

        return 0
    elif 70 <= t < 132:
        return 1
    elif 132 <= t < 232:
        return 2
    elif 232 <= t < 302:
        return 0
    elif 302 <= t < 335:
        return 1
    elif 335 <= t < 395:
        return 2

    return 0

def initialiserObjets():
    """
    Instancie les objets Individu (nb_categories*2) et Vaccin (un seul) dont la simulation a besoin
    """
    vaccins.append(vaccin.Vaccin())

    for age in range(nb_categories//2):
        objets_categories.append(Individu.Individu(age, None))

    for age in range(nb_categories//2, nb_categories):
        objets_categories.append(Individu.Individu(age, vaccins[0]))

def conditionsInitiales():
    """
    Conditions initiales, assez arbitraires
    """
    ci = np.zeros( (nb_categories * nb_etats) )

    for categorie in range(nb_categories//2):
        ci[categorie*nb_etats] = N*prctage_categories[categorie] - infectes_dep
        ci[categorie*nb_etats + 1] = infectes_dep

    return ci

def fonction(x, t):
    """
    Fonction utilisée pour la résolution, permettant de calculer dx/dt en fonction de x et t
    où :
        0      1      2      3      4      5      6      7
    x = (s(t), i(t), ca(t), cs(t), rea(t), imm(t), dead(t)), vaccine(t)

    et ceci nb_categories*2 fois
    """

    resultat = np.zeros( (nb_etats * nb_categories,) )

    #On calcule le nombre de personnes vivantes à l'instant t
    alive = np.sum(x)
    for categorie in range(nb_categories):
        alive -= x[categorie * nb_etats + 6]

    for categorie in range(nb_categories):
        #On récupère les infos de l'individu dont il est question dans cette catégorie
        individu = objets_categories[categorie]
        individu.confinement = etatReglementation(t)
        petit_beta = individu.beta()

```

```

beta = np.empty( (nb_categories, nb_categories) )
beta[:nb_categories//2,:nb_categories//2] = petit_beta
beta[nb_categories//2,:nb_categories//2] = petit_beta
beta[:nb_categories//2,nb_categories//2:] = petit_beta
beta[nb_categories//2,nb_categories//2:] = petit_beta

#Les données à l'instant t
s = x[nb_etats * categorie + 0]
inf = x[nb_etats * categorie + 1]
ca = x[nb_etats * categorie + 2]
cs = x[nb_etats * categorie + 3]
rea = x[nb_etats * categorie + 4]
imm = x[nb_etats * categorie + 5]

# En vue de calculer la variation des futurs infectés,
# on veut une matrice colonne de nb_categories lignes, qui à chaque ligne a ca + cs de la catégorie e
n question
contamines = np.zeros((nb_categories,))
for categorie2 in range(nb_categories):
    contamines[categorie2] = x[nb_etats * categorie2+ 2] + x[nb_etats * categorie2+ 3]

# Combien de personnes faut-il vacciner par jour à t ?
a_vacciner = etatVaccination(t)[categorie % (nb_categories//2) ]

# vaut 1 si cette catégorie est vaccinée, -1 sinon
epsilon = (categorie >= (nb_categories // 2))*2 - 1

# On calcule la variation de personnes infectés dans cette catégorie à t
infectes = 0
if alive != 0:
    infectes = beta.dot(contamines)[categorie] * (s / alive)

# On calcule la variation des personnes qui perdent leur immunité
perte_immunite = individu.k() * individu.l() * imm

if categorie >= nb_categories//2:
    # On est dans une catégorie de vaccinés.
    # On enlève aux sains de cette catégorie les infectés (habituel)
    # On ajoute aux sains de cette catégorie ceux qui viennent de se faire vacciner
    # On ajoute aux sains de la catégorie correspondante non vaccinée ceux qui perdent l'immunité vac
cinale
    resultat[nb_etats * categorie + 0] += - infectes + epsilon * a_vacciner
    resultat[nb_etats * (categorie % (nb_categories//2))] += perte_immunite
else:
    # On est dans une catégorie de non-vaccinés
    # On enlève aux sains de cette catégorie les infectés (habituel)
    # On enlève aux sains de cette catégorie ceux qui viennent de se faire vacciner
    # On ajoute aux sains de cette catégorie ceux qui perdent l'immunité
    resultat[nb_etats * categorie + 0] += - infectes + epsilon * a_vacciner + perte_immunite

# Calculs selon les équas diff
resultat[nb_etats * categorie + 1] += infectes - individu.b() * inf
resultat[nb_etats * categorie + 2] += individu.c() * individu.b() * inf - individu.d() * ca
resultat[nb_etats * categorie + 3] += (1 - individu.c()) * individu.b() * inf - (individu.e + individ
u.h()) * individu.f() * cs - (1 - individu.e - individu.h()) * individu.d() * cs
resultat[nb_etats * categorie + 4] += individu.e * individu.f() * cs - individu.g() * individu.i() *
rea - (1 - individu.g()) * individu.j() * rea
resultat[nb_etats * categorie + 5] += individu.d() * ca + (1 - individu.e - individu.h()) * individu.
d() * cs + (1-individu.g()) * individu.j() * rea - perte_immunite
resultat[nb_etats * categorie + 6] += individu.h() * individu.f() * cs + individu.g() * individu.i()
* rea

return np.array(resultat)

```

```

def afficher(y, t):
    """
    Fonction pour afficher ce qui est intéressant
    """
    # On affiche un bilan général, état par état indépendamment de la catégorie
    for i in range(nb_etats):
        result = np.sum(y[:, i::nb_etats], axis = 1)
        plt.plot(t, result, label = noms_etats[i], linewidth=3)

    plt.title("Etats de la population française (" + noms_strategies[strategie_vaccinale] + ")")
    plt.xlabel("Temps (jours)")
    plt.ylabel("Nombre de personnes")
    plt.legend()
    plt.figure()

    # On affiche les pourcentages de réanimation par catégorie
    total = np.sum(y[:,4::nb_etats], axis=1)

    for categorie in range(nb_categories//2):
        plt.plot(t, (y[:,categorie*nb_etats + 4] + y[:,(categorie + nb_categories//2)*nb_etats + 4]) / total,
                  label=noms_categories_regroupees[categorie], linewidth=3)

    plt.legend()
    plt.title("Pourcentage des patients en réanimation par âge (" + noms_strategies[strategie_vaccinale] + ")")
    plt.xlabel("Temps (jours)")
    plt.ylabel("Pourcentage")
    plt.figure()

    # On affiche le nombre de réanimations par catégorie
    for categorie in range(nb_categories//2):
        plt.plot(t, y[:,categorie*nb_etats + 4] + y[:,(categorie + nb_categories//2)*nb_etats + 4],
                  label=noms_categories_regroupees[categorie], linewidth=3)
    plt.plot(t, total, label="Total", linewidth=3)
    # plt.plot(t[78:340], patient_rea_reel, label = "Chiffres réels", linewidth = 3)

    plt.legend()
    plt.title("Nombre de patients en réanimation (" + noms_strategies[strategie_vaccinale] + ")")
    plt.xlabel("Temps (jours)")
    plt.ylabel("Nombre de personnes")
    plt.figure()

    # On affiche le nombre de réa, selon si vacciné ou non
    for v in range(2):
        plt.plot(t,
                 np.sum(y[:, v*nb_etats*(nb_categories // 2) + 4:(v+1)*nb_etats*(nb_categories // 2) + 4:nb_etats],
                        axis=1),
                 label= ("Non vacciné" if (v == 0) else "Vacciné"),
                 linewidth=3)
    plt.plot(t, total, label = "Total", linewidth = 3)
    plt.legend()
    plt.xlabel("Temps (jours)")
    plt.ylabel("Nombre de personnes")
    plt.title("Réanimations en fonction de la vaccination (" + noms_strategies[strategie_vaccinale] + ")")
    plt.figure()

    # On affiche le nombre de vaccinés par catégorie
    for categorie in range(nb_categories//2, nb_categories):
        plt.plot(t,
                 np.sum(y[:, categorie*nb_etats:(categorie+1)*nb_etats], axis = 1),

```

```

        label=(noms_categories[categorie] + " (tous états)"),
        linewidth = 3)
plt.plot(t, np.sum(y[:, nb_etats*nb_categories//2:], axis = 1), label = "Total", linewidth = 3)
plt.title("Nombre de vaccinés par âge (tous états confondus) (" + noms_strategies[strategie_vaccinale] +
")")
plt.xlabel("Temps (jours)")
plt.ylabel("Nombre de personnes")
plt.legend()
plt.figure()

# On affiche, état par état, les différentes catégories de la population française
for etat in range(1):
    for categorie in range(nb_categories):
        label = noms_etats[etat] + " de la catégorie " + noms_categories[categorie]
        plt.plot(t, y[:, categorie*nb_etats + etat], label = label)
        titre = noms_etats[etat] + " par catégorie de la population française"
        plt.title(titre)
        plt.legend()
        plt.figure()

plt.show()

def corriger(y):
    for ligne in range(y.shape[0]):
        for colonne in range(y.shape[1]):
            if y[ligne, colonne] < 0:
                y[ligne, colonne] = 0

    return y

def resolution():
    """
    Initialise, résout et affiche
    """
    initialiserObjets()
    ci = conditionsInitiales()

    t = np.linspace(0, temps, temps)
    y = odeint(fonction, ci, t)

    y = corriger(y)

    afficher(y, t)

resolution()

```

Voici le code de la classe Individu (qui représente un français, avec les paramètres retenus) :

```

import numpy as np

class Individu:

    def __init__(self, categorie_age, vaccin, confinement=0):
        self.categorie_age = categorie_age # 0 = <15 1 = 15-25 ; 2 = 26-34 ; 3 = 35-49 ; 4 = 50-65 ; 5 = >65
        self.vaccin = vaccin
        self.confinement = confinement #booléen
        self.calculere()

    def beta(self):
        '''Nombre de personnes saines contaminées par personne contagieuse par jour (en jours^-1)'''
        if self.confinement == 1:
            B = [[1.2, 0.6, 1., 1., 0.8, 0.4, 0.4],
                [0.6, 2., 1.4, 1.4, 1.2, 0.4, 0.4],
                [1., 1.4, 1.4, 1.4, 1.2, 0.4, 0.4],
                [1., 1.4, 1.4, 0.8, 0.8, 0.4, 0.4],

```

```

        [0.8, 1.2, 1.2, 0.8, 0.8, 0.4, 0.4],
        [0.4, 0.4, 0.4, 0.4, 0.4, 0.9, 0.9],
        [0.4, 0.4, 0.4, 0.4, 0.4, 0.9, 0.9]]
    else:
        B=[[4., 1.7, 2.2, 2.2, 1.8, 1.7, 1.7],
          [1.7, 7.3, 7., 4.8, 2.5, 1.7, 1.7],
          [2.2, 7., 7.3, 4.8, 2.5, 1.7, 1.7],
          [2.2, 4.8, 4.8, 2.5, 2.2, 1., 1.7],
          [1.8, 2.5, 2.5, 2.2, 2., 1.9, 1.9],
          [1.7, 1.7, 1.7, 1., 1.9, 1., 1.],
          [1.7, 1.7, 1.7, 1., 1.9, 1., 1.]]

    beta = np.array(B)

    if self.confinement == 2:
        # Gestes barrières
        beta*=0.3

    return beta*self.d()

def b(self):
    '''Retourne l'inverse de la valeur du temps moyen d'incubation'''
    return 1/4 #valeur moyenne trouvée sur le site du gouvernement

def c(self): #age?
    '''Retourne la proportion de personnes en incubation qui développent une forme asymptomatique'''
    if self.vaccin != None:
        return 1-self.vaccin.efficacite_maladie
    return 0.243 #valeur publiée par SPF mais variable et on le sait parce que dans ceux qu'on considère
    asymptomatiques il y a forcément ceux qui sont dans une phase "pré-
    symptomatiques" et ceux qu'on ne teste pas => pourcentages de symptomatiques est alors de 75,7%"

def d(self):
    '''Retourne l'inverse du temps caractéristique de la durée de la contagion (symptomatique ou asymptom
    atique)'''
    if self.vaccin != None:
        return 1/0.1
    return 1/14

def calculere(self):
    '''Retourne la proportion de symptomatiques qui vont en réanimation'''
    rr=0.14/700 #proportion de personnes ayant été en réa sur le nombre total de symptomatiques, valeurs
    calculées à partir du rapport ICNARC => données en angleterre
    if self.categorie_age==4:
        rr*=10
    if self.categorie_age==5:
        rr*=35 #valeur de Santé Publique France
    if self.categorie_age==6:
        rr*=30

    if self.vaccin != None:
        rr *= self.vaccin.efficacite_rea

    self.e = rr

def f(self):
    '''Retourne l'inverse du temps caractéristique avant de développer une forme grave'''
    return 1/8.5

def g(self):
    '''Proportion de personnes en réa qui décèdent'''
    if self.categorie_age == 5:
        return 0.2
    elif self.categorie_age == 6:
        return 0.4

    return 0.05

```

```

def h(self):
    '''Proportion des personnes symptomatiques qui meurent chez elles'''
    return 0.00052

def i(self):
    '''Retourn l'inverse du temps caractéristique du temps en reanimation si décès'''
    return 1/9.5 #temps médian d'après ICNARC report

def j(self):
    '''Retourn l'inverse du temps caractéristique du temps en rea si survie'''
    return 1/12 #temps médian d'après ICNARC report

def k(self):
    '''Retourne l'inverse du temps caractéristique de perte d'immunité'''
    if self.vaccin != None:
        return 1/(self.vaccin.duree_protection)
    return 1/(6*30)

def l(self):
    '''Retourn la proportion d'immunisés qui perdent l'immunité'''
    if self.vaccin != None:
        return self.vaccin.prop_perte_protection
    return 1

```

Enfin, voici le code de la classe Vaccin (qui représente le vaccin retenu avec ses paramètres) :

```

class Vaccin:

    def __init__(self, efficacite_maladie=0.042, efficacite_rea=0.01, duree_protection=365, prop_perte_protection=0.5):
        '''
        Efficacité réa = (proportion symptomatique qui vont en réa vacciné)/(proportion symptomatique qui vont
        en réa pas vaccinés)
        Efficacité maladie = (proportion des incubés qui développent des symptômes)
        '''
        self.efficacite_maladie = efficacite_maladie
        self.efficacite_rea = efficacite_rea
        self.duree_protection = duree_protection
        self.prop_perte_protection = prop_perte_protection

```

j. Préviation d'un calendrier de vaccination, en prenant en compte l'hésitation vaccinale

Au regard des estimations concernant l'**hésitation vaccinale** réalisées dans la partie 3c) du mini-projet de vaccination, ainsi que des commandes passées par la France avec les différents laboratoires pharmaceutiques, il est **possible de prévoir un calendrier vaccinal**.

Pour ce faire, il est nécessaire d'analyser simultanément plusieurs données:

- Celles qui caractérisent la population qui se fera vraisemblablement vacciner (estimation de l'hésitation vaccinale de la partie 3c)
- Les capacités de vaccination dont dispose la France en termes de matériel, de personnel soignant dédié à la vaccination, etc...
- Les doses des différents vaccins dont la France disposera à l'avenir
- Les dates de livraison des différents vaccins commandés par la France

Alors que la France ne s'est pas encore positionnée sur une stratégie en ce qui concerne les lieux de vaccination ou encore le personnel soignant qui la pratiquera, il est possible, en reprenant les scénarios établis lors de la préparation de la campagne pour la grippe H1N1 [22], d'estimer dans les différents cas les capacités de vaccination dont dispose la France :

- Une vaccination reposant uniquement sur la présence de centres de vaccination offrirait la possibilité de vacciner **6 millions de personnes par mois** (capacité de vaccination d'environ 240 pers/jour/centre)
- Une vaccination uniquement réalisée via la médecine ambulatoire permettrait de vacciner 10 pers/jour/médecin dans le cas où le médecin continue son activité en parallèle, en ne gardant que la moitié de ses patients pour des consultations simples. Compte tenu du nombre de médecins libéraux en France, en admettant que simplement la moitié accepterait de vacciner la population (au vue de l'importante hésitation vaccinale), nous estimons que ce dispositif offrirait la possibilité de vacciner **4,5 millions de personnes par mois**.

On peut alors considérer qu'une vaccination reposant à la fois sur la médecine ambulatoire et sur la présence de centres de vaccination permettrait de vacciner la somme des deux données précédentes dans le meilleur des cas, à savoir **10,5 millions de personnes par mois**.

Notons que notre étude est ici purement mathématique et ne s'intéresse pas aux avantages et aux problématiques soulevées par chacune de ces stratégies, ce qui est évalué en fin de partie 3c du mini-projet vaccination.

Il est donc à présent intéressant de s'intéresser aux commandes réalisées par la France auprès des différents laboratoires pharmaceutiques proposant un vaccin efficace contre la COVID. Nous retenons volontairement pour notre étude uniquement trois vaccins: ceux développés par les laboratoires Pfizer, Moderna et Astrazeneca. Ce choix repose sur le critère de rapidité de disponibilité du vaccin: nous imaginons que les vaccins les plus avancés dans leurs phases de tests seront les premiers disponibles sur le marché. La France a passé, avec 6 autres pays de l'union Européennes, des accords de principe, qui font office de "précommande". Si on considère, comme l'a affirmé, le président français, que parmi ces six pays, les commandes seront équitablement réparties en fonction du nombre d'habitants de chaque pays, la France récupérerait 15% des vaccins de chacune des commandes. On peut alors estimer qu'à long terme, la France disposera au minimum de **30 millions de vaccins unidoses** (vaccins Pfizer), **45 millions de vaccins en principe multidose** (vaccins Astrazeneca) et jusqu'à **13,5 millions** de doses du vaccin de Moderna [27].

On considérera par ailleurs qu'aucune date de mise sur le marché n'est encore fixée, ces vaccins étant encore, aux yeux des autorités Européennes, "en période de test". La HAS précise en effet dans son rapport qu'il existe de trop grandes incertitudes sur de nombreux paramètres pour envisager la mise en place d'un véritable calendrier vaccinal [19]. Notre résultat fera donc l'hypothèse que les vaccins sont livrés en France à une date donnée J0, et que toutes ces commandes arrivent simultanément (ce qui constitue une hypothèse conséquente compte tenu de l'évolution différente des vaccins en cours de test).

Les calendriers prévisionnels dans les trois scénarios de vaccination sont alors les suivants:

Vaccination par des centres:

catégorie à vacciner	date de vaccination
phase 1 & 2	de J0 à J0 + 28 jours
phase 3	de J0 + 28 jours à J0 + 60 jours
phase 4 & 5	de J0 + 60 jours à J0 + 153 jours (5 mois après le début de la campagne)

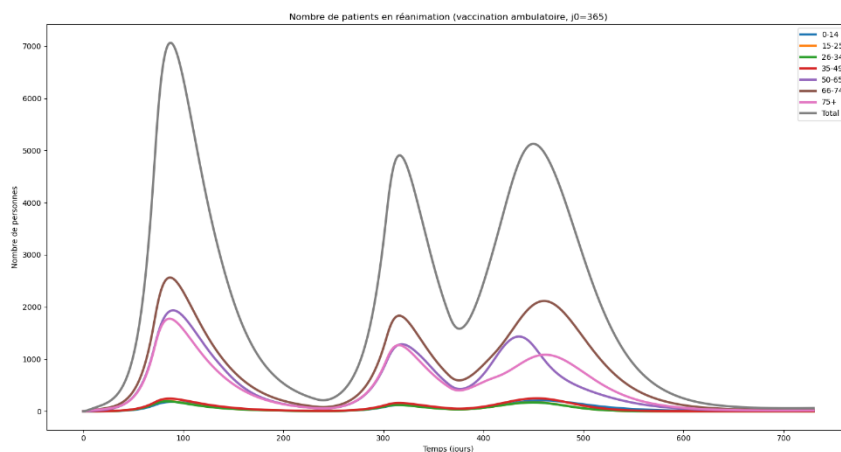
Vaccination en médecine Ambulatoire:

catégorie à vacciner	date de vaccination
phase 1 & 2	de J0 à J0 + 38 jours
phase 3	de J0 + 38 jours à J0 + 81 jours
phase 4 & 5	de J0 + 81 jours à J0 + 205 jours (7 mois après le début de la campagne)

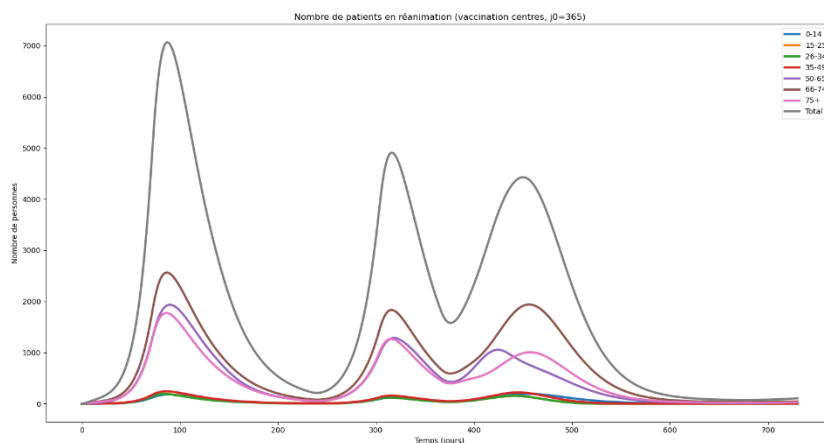
Vaccination "hybride":

catégorie à vacciner	date de vaccination
phase 1 & 2	de J0 à J0 + 16 jours
phase 3	de J0 + 16 jours à J0 + 35 jours
phase 4 & 5	de J0 + 60 jours à J0 + 88 jours (≈3 mois après le début de la campagne)

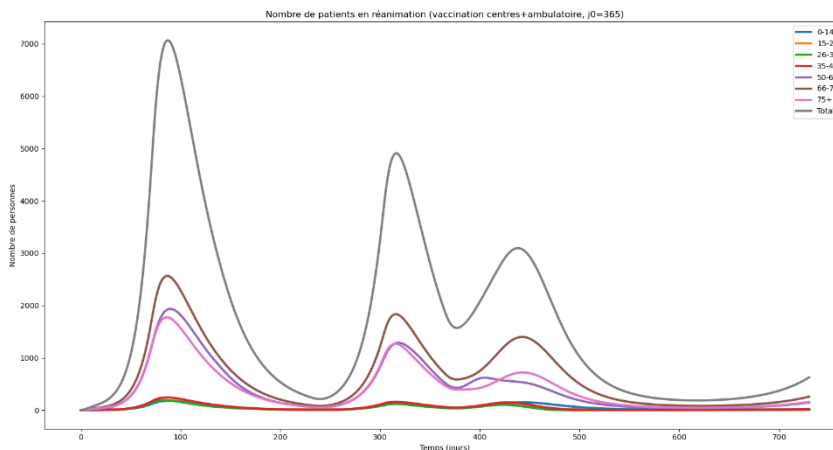
Annexe 4 : Données à propos des lieux de vaccination



Courbe de réanimations, vaccination en ambulatoire uniquement, avec hésitation vaccinale (aucun confinement ni gestes barrières en 2021)



Courbe de réanimations, vaccination en centres uniquement, avec hésitation vaccinale (aucun confinement ni gestes barrières en 2021)



Courbe de réanimations, vaccination en centres et en médecine ambulatoire, avec hésitation vaccinale (aucun confinement ni gestes barrières en 2021)⁹

Annexe 5 : Priorisation de l'HAS & conservation des vaccins

Voici la priorisation annoncée par la HAS :

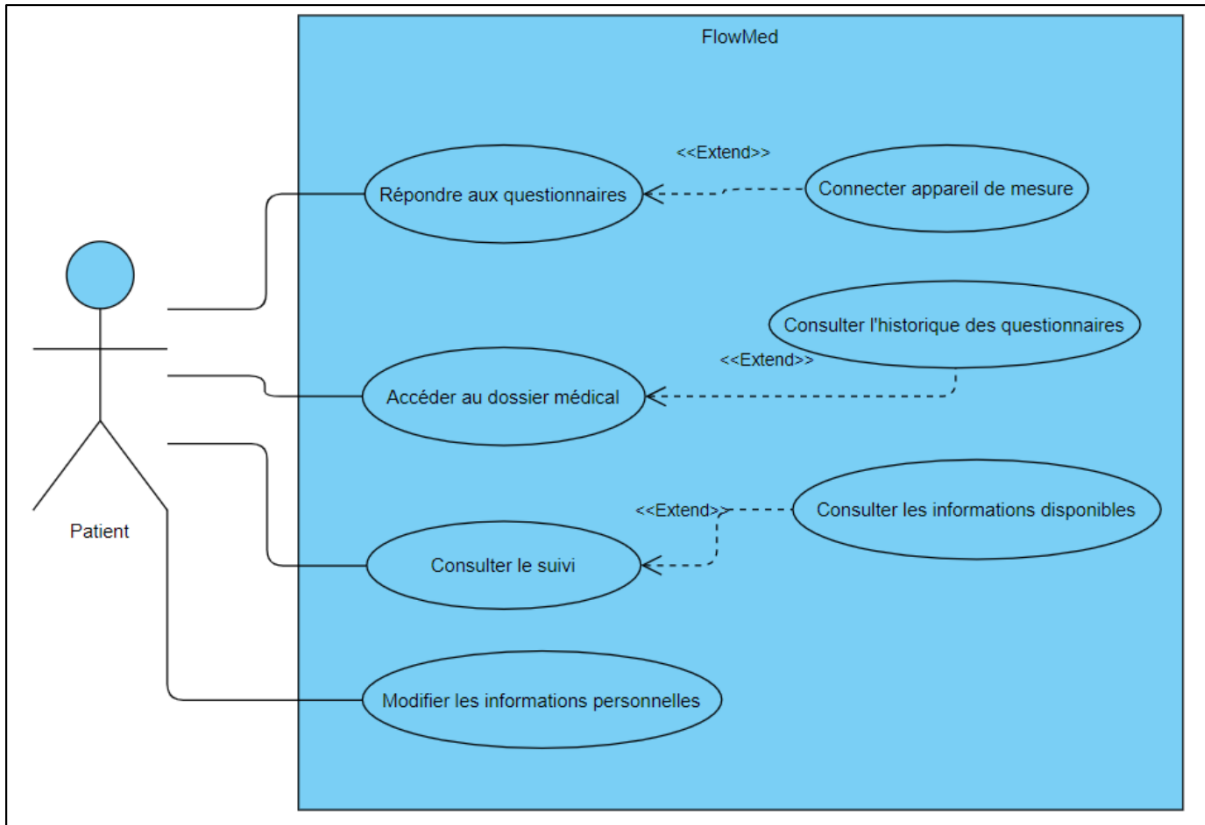
1. Les résidents d'établissement accueillant des personnes âgées, les résidents en service de long séjour (EHPAD, USLD...) et les professionnels exerçant dans les établissements accueillant des personnes âgées présentant eux même un risque accru de formes graves/de décès
2. Les personnes âgées de plus de 75 ans, en commençant par les plus âgées et/ou celles présentant une ou des comorbidités. Dans un second temps, les personnes âgées de 64 à 75 ans, avec le même ordre de priorité. Professionnels du secteur de la santé et du médico-social de plus de 50 ans.
3. Les personnes âgées de 50 à 64 ans ainsi que l'ensemble des professionnels du secteur de la santé et du médico-social et d'autres professionnels dont l'activité serait "essentielle" au maintien de nos sociétés en période d'épidémie (professeurs des écoles, ...)
4. Professionnels dont les conditions de travail favorisent l'infection ainsi que l'ensemble de personnes vivant dans des conditions où l'application des gestes barrières est compromise (pour des raisons de vulnérabilité socio-économique par exemple).
5. Le reste des populations âgées de plus de 18 ans pourraient se faire vacciner

Enfin, voici les conditions de conservation des différents vaccins :

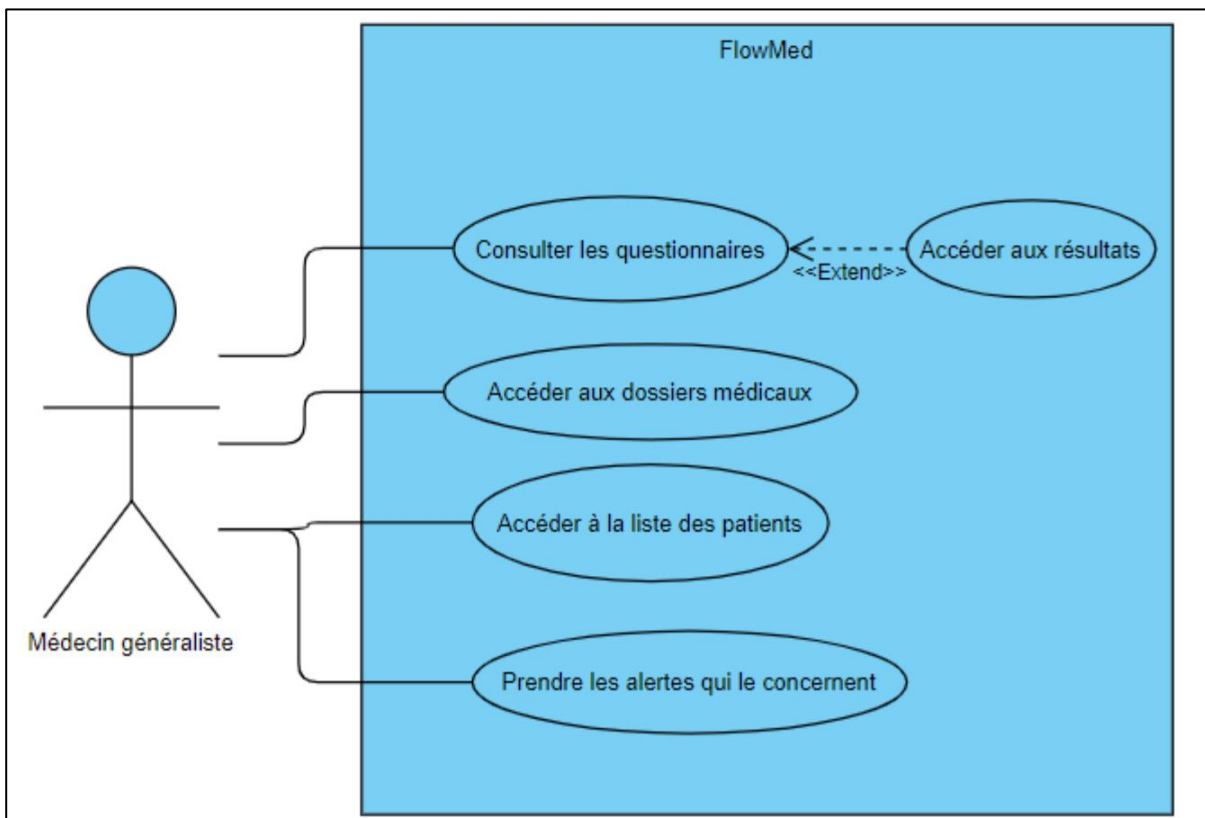
Le vaccin Pfizer et BioNtech se conserve à -80°C dans des super-congérateurs : la France en a commandé 50. Le vaccin Astrazeneca se conserve au réfrigérateur (entre 2 et 8°C), ces conditions ne bloquent donc aucun lieu de vaccination. [23]. Le vaccin Moderna se conserve au congélateur (-20°C) jusqu'à 6 mois, au réfrigérateur (entre 2°C et 8°C) jusqu'à un mois, ou 12h à température ambiante après dégel, ces conditions ne bloquent aucun lieu de vaccination [24].

⁹ Remarque : pourquoi le nombre de personnes en réanimation remonte à la fin ? Parce que dans ce scénario, on a vacciné une importante partie de la population en début 2020, et comme on a supposé que l'on perdait l'immunité du vaccin au bout d'un an, début 2021, ceux vaccinés début 2020 sont de nouveau susceptibles de l'attraper ... Alors que dans une vaccination plus progressive, les gens sont vaccinés au fur et à mesure, donc ne redeviennent pas susceptibles d'attraper la Covid en même temps.

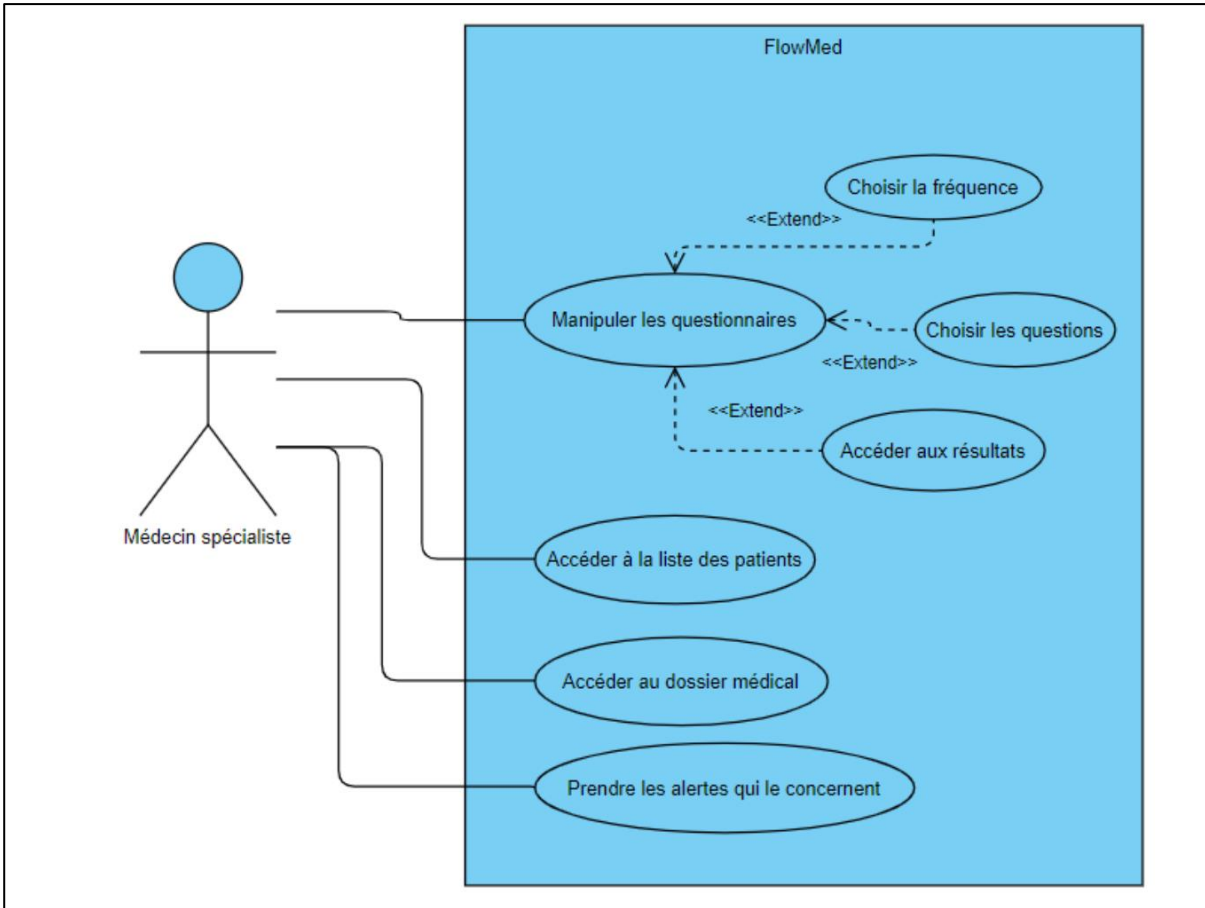
Annexe 6 : Cas d'utilisation de la plateforme digitale



Cas d'utilisation patient



Cas d'utilisation médecin généraliste



Cas d'utilisation médecin spécialiste

Annexe 7 : Diagrammes d'états Matlab

Ce diagramme a pour objectif de montrer les différents états dans lequel le patient peut se trouver. Il montre également les relations entre ces états.

a. Hypothèses simplificatrices

- Si un patient est effectivement positif à la Covid, le résultat de son test sera positif dans 100% des cas.
- Si un patient est effectivement négatif à la Covid, le résultat de son test sera négatif dans 100% des cas.
- Pas de patients asymptomatiques : lorsqu'un patient est positif, il a des symptômes, le médecin généraliste l'inscrit donc sur la plateforme pour la Covid dans 100% des cas (puis l'envoie faire un test).
- Le délai d'obtention du résultat du test pour la Covid est de 2 unités de temps.
- Le délai de guérison pour la Covid, compté à partir du moment où le patient commence le suivi, est de 5 unités de temps. Donc le temps de suivi du patient pour la Covid ne dépend pas du stade de la Covid auquel il a commencé ce suivi.

- Un patient atteint de la maladie autre est redirigé vers un spécialiste (par le généraliste) puis diagnostiqué positif à la maladie autre (par le spécialiste) dans 100% des cas.
- Le délai d'obtention du résultat du test pour la maladie autre est nul.
- Le délai de guérison pour la maladie autre est infini (ou autrement dit, il est très grand devant le temps de guérison de la Covid).

- Lorsqu'un patient consulte, il consulte soit pour la maladie autre, soit pour la Covid, soit pour les 2.
- Lorsqu'un patient consulte pour une maladie, le généraliste le redirige forcément vers la plateforme (dans le cas de la Covid) ou vers un spécialiste (dans le cas de la maladie autre).

b. Variables

Elles fonctionnent comme des booléens : 1 = vrai ; 0 = faux.

Variables d'entrées (inputs) : ce sont les variables que l'on choisit avant de lancer la simulation.

covid_pos : le patient est effectivement positif à la Covid.

autre_pos : le patient est effectivement positif à la maladie autre.

i_covid : le patient est déjà inscrit sur la plateforme pour un suivi de la Covid.

i_autre : le patient est déjà inscrit sur la plateforme pour un suivi de la maladie autre.

consult_covid : le patient choisit d'aller consulter pour la Covid.

consult_autre : le patient choisit d'aller consulter pour la maladie autre.

Variables locales : Les valeurs de ces variables changent au cours de la simulation.

inscrit_covid : vaut **i_covid** à l'initialisation puis indique si le patient est inscrit sur la plateforme pour un suivi de la Covid ou non.

inscrit_autre : vaut **i_diab** à l'initialisation puis indique si le patient est inscrit sur la plateforme pour un suivi de la maladie autre ou non.

test_covid : le patient est testé positif à la Covid.

test_autre : le patient est testé positif à la maladie autre.

fin : permet de mettre fin à la simulation lorsque le patient a atteint un état stable.

Constantes:

d : délai d'obtention du test pour la Covid, $d = 2$ unités de temps

guerison : délai de guérison pour la Covid, compté à partir du moment où le patient commence le suivi = 5 unités de temps.

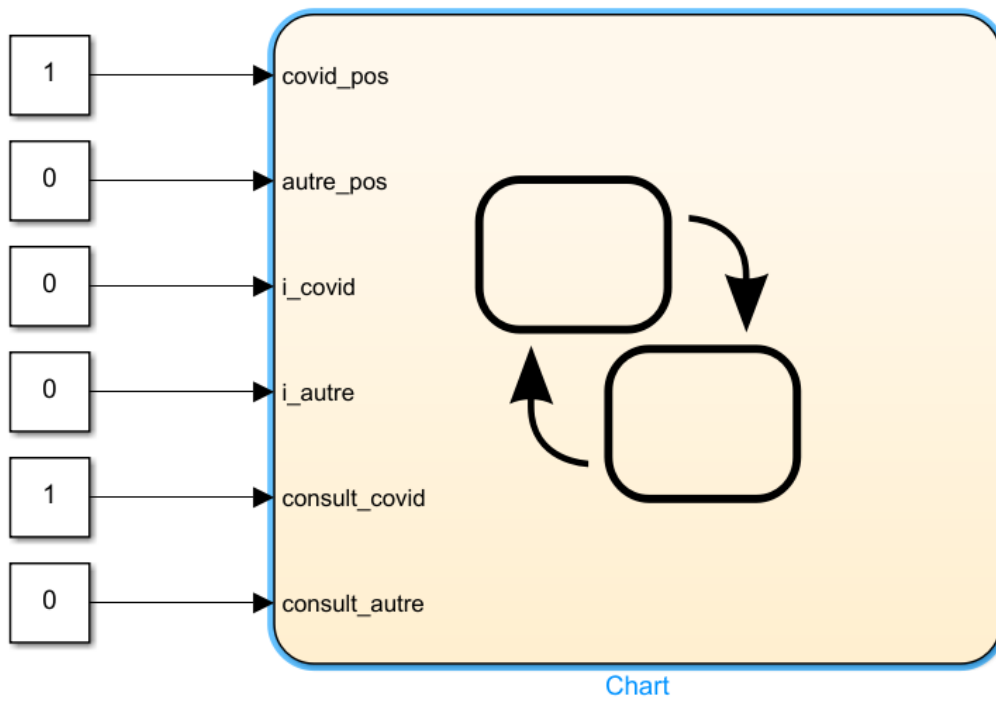
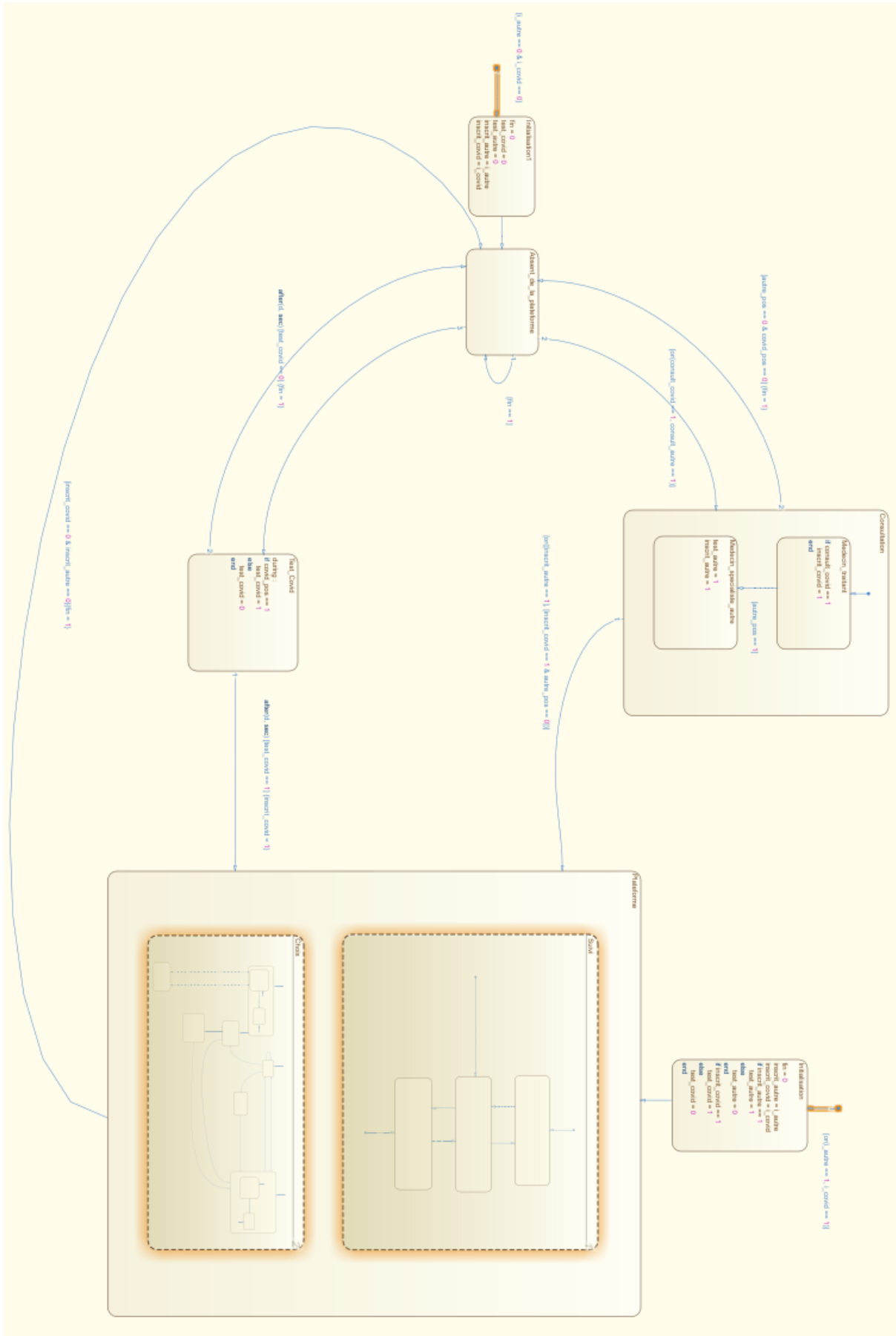
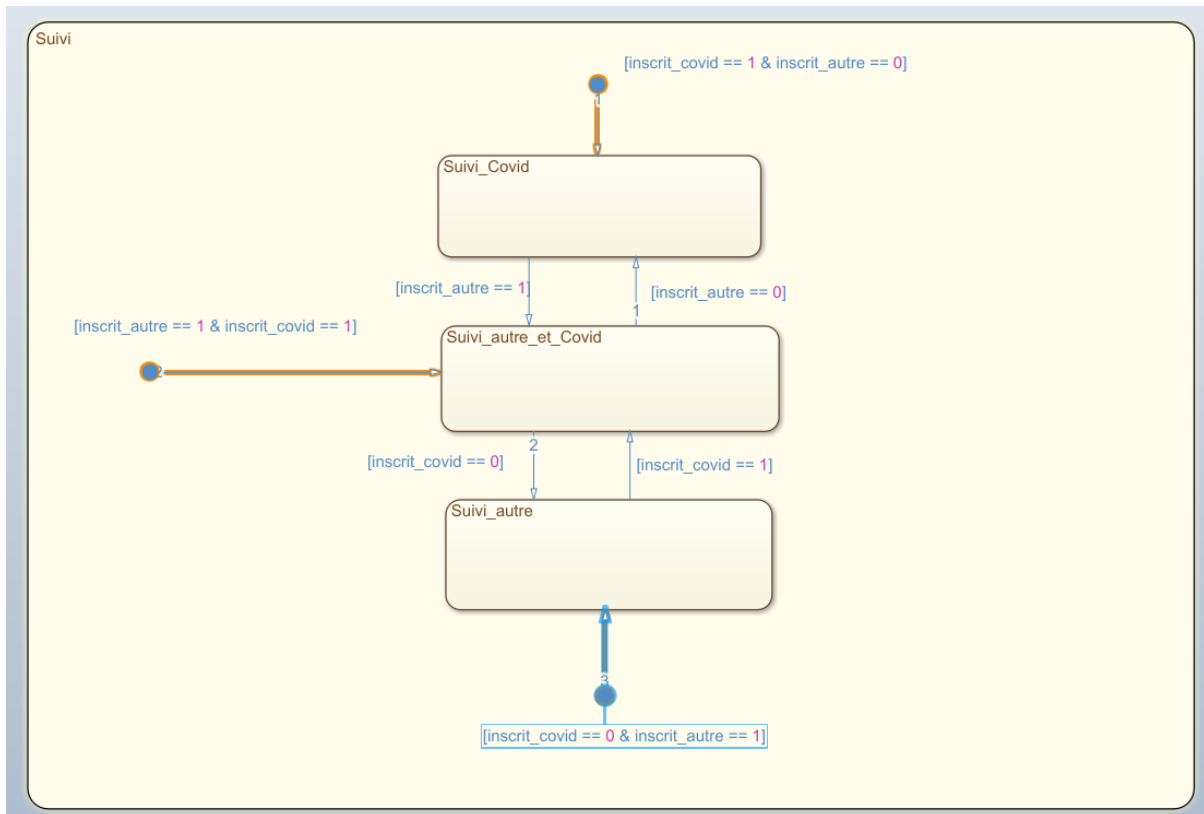


Schéma des inputs





C.

Déroulement des scénarios

Scénario 1 :

La "maladie autre" est le diabète :

autre_pos = 1

consult_autre = 1

Toutes les autres variables valent 0.

Scénario 2 :

La "maladie autre" est l'hypertension artérielle :

autre_pos = 1

i_autre = 1

consult_covid = 1

Toutes les autres variables valent 0.

Scénario 3 :

La "maladie autre" est le Sida :

autre_pos = 1

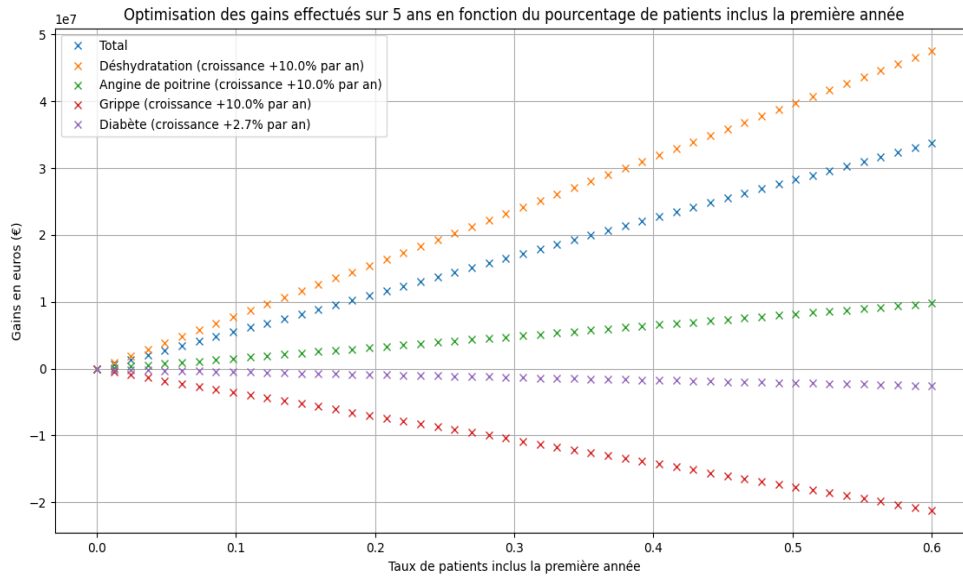
i_autre = 1

covid_pos = 1

Toutes les autres variables valent 0.

Annexe 9 : Mini-projet économie – résultats complémentaires

En faisant varier le taux de patients inclus sur la plateforme la première année, on obtient :



Globalement, plus le nombre de patients pris en charge sera important, plus le site sera rentable, mais l'inscription même d'un petit nombre de patients, sous nos hypothèses, apparaît comme bénéfique pour l'Assurance Maladie.

Annexe 9 : Code du mini-projet économie

```
1 import random as rd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import numpy as np
4
5 ## Objectif de ce code : calculer les coûts d'un site de télésurveillance de différentes maladies ##
6
7
8 # On explicite les données générales utiles pour tous les calculs
9
10 # Données sur la plateforme
11 sollicitation_cellule = 1/20 # appels par jour par patient --> données Covidom
12 eff_teleop = 50 # appels par jour par téléopérateur --> données Covidom
13 taux_teleop_base = sollicitation_cellule/eff_teleop
14
15 # Les coûts
16 cout_dev = 75000 # coût de construction du site --> source Adveris
17 cout_maintenance = 2400 # forfait annuel (5h/mois) --> source Webvitrine
18 salaire_teleoperateur = 20000 # salaire annuel moyen (avec valorisation)
19 salaire_medecin_superviseur = 70000
20 nb_medecin = 1/6 # nombre de médecins superviseurs pour 1 téléopérateur (<1)
21
22
23 # On définit une classe maladie, qui contient certaines infos utiles et des méthodes de calcul des coûts et gains
24
25 class Maladie:
26     def __init__(self, nom: str, nb_patients_maladie: int, cout_hospit: float, hospit_evitable: int, duree: float, genre: str,
27                 taux_teleop: float = taux_teleop_base):
28         """
29         nb_patients est le nombre de patients avec la maladie (ou à risque si la maladie est aiguë)
30         cout_hospit est le coût moyen d'une hospitalisation pour l'assurance maladie
31         hospit_evitable est le nombre total d'hospitalisations qui sont inutiles
32         duree est la fraction d'année sur laquelle la maladie est présente
33         genre peut être 'aiguë' ou 'chronique'
34         taux_teleop représente le nombre de téléopérateurs nécessaires pour 1 patient (<1)
35         """
36         self.nom = nom
37         self.nb_patients_maladie = nb_patients_maladie
38         self.cout_hospit = cout_hospit
39         self.hospit_evitable = hospit_evitable
40         self.duree = duree
41         self.taux_teleop = taux_teleop
42         self.genre = genre
43
44     def __repr__(self):
45         return f'{self.nom} est une maladie {self.genre} \n {self.nb_patients_maladie} patients sont atteints de {self.nom} en Île de France'
46
47     def nb_patients_pec(self, taux_patients_pec: float, taux_evol: float, annee: int):
48         """
49         cette fonction prend en entrée taux_patients_pec, le taux de patients pris en charge
50         annee, le nombre d'années de pérennité du site
51         et renvoie le nombre de patients pris en charge
52         """
53         nb_patients_pec = taux_patients_pec * \
54             (1 + taux_evol)**annee * self.nb_patients_maladie
55         return nb_patients_pec
56
57     def hospitalisation_evitees(self, taux_debut: float, taux_evol: float, rendement: float, annee: int):
58         """
59         cette fonction prend comme paramètres d'entrée taux_debut, la proportion des malades pris en charge
60         taux_evol l'évolution du nombre de patients de cette prise en charge
61         annee le nombre d'années de pérennité du site
62         rendement le rendement concernant les hospitalisations évitées
63         et retourne le nombre d'hospitalisations évitées
64         """
65         hospit = 0
66         for an in range(annee):
67             hospit += self.hospit_evitable * taux_debut * \
68                 (1 + taux_evol)**an * rendement
69         return hospit
70
```

```

70
71 def cout_annee(self, taux_patients_pec: float, teleop: float):
72     """
73     cette fonction prend comme paramètres taux_patients_pec, la proportion des malades pris en charge
74     teleop, le nombre ou le taux de téléopérateur nécessaires pour le suivi
75     et retourne le coût de maintenance de la plateforme
76     """
77     cout_v = (salaire_teleoperateur + nb_medecin *
78              | salaire_medecin_superviseur) * teleop * self.duree * taux_patients_pec
79     return cout_v
80
81 def cout_global(self, taux_debut: float, taux_evol: float, teleop: float, annee: int):
82     """
83     cette fonction prend en entrée taux_debut, la proportion de malades pris en charge la première année
84     taux_evol, la croissance attendue du nombre de patients par an
85     teleop le taux de téléopérateurs par patient
86     annee le nombre d'années de pérennité du site
87     et renvoie le cout sur plusieurs années de la maintenance de la plateforme
88     """
89     S = 0
90     taux_patients_pec = taux_debut
91     for i in range(annee):
92         S += self.cout_annee(taux_patients_pec *
93                             | (1 + taux_evol)**i, teleop)
94     return S
95
96 def gain_annee(self, taux_patients_pec: float, rendement: float):
97     """
98     cette fonction prend comme paramètres taux_patients_pec, la proportion des malades pris en charge
99     rendement, le rendement d'hospitalisations évitées
100    et retourne le gain de la plateforme sur un an
101    """
102    gain = self.hospit_evitable * self.cout_hospit * taux_patients_pec * rendement
103    return gain
104
105 def gain_global(self, taux_debut: float, taux_evol: float, rendement: float, annee: int):
106    """
107    cette fonction prend en entrée taux_debut, la proportion de malades pris en charge la première année
108    taux_evol, la croissance attendue du nombre de patients par an
109    annee le nombre d'années de pérennité du site
110    et renvoie le gain sur plusieurs années de la plateforme
111    """
112    S = 0
113    taux_patients_pec = taux_debut
114    for an in range(annee):
115        S += self.gain_annee(taux_patients_pec *
116                            | (1 + taux_evol)**an, rendement)
117    return S
118
119 def benefice(self, taux_debut: float, taux_evol: float, annee=5, rendement=1):
120    """
121    cette fonction prend en entrée taux_debut, la proportion de malades pris en charge la première année
122    taux_evol, la croissance attendue du nombre de patients par an
123    annee le nombre d'années de pérennité du site
124    et renvoie le bénéfice effectué par l'Assurance Maladie sur le nombre d'années choisies
125    """
126    gain = self.gain_global(taux_debut, taux_evol, rendement, annee)
127    cout = self.cout_global(taux_debut, taux_evol, teleop, annee)
128    benef = gain - cout
129    return benef
130
131
132 # Définition des maladies exemples et données
133
134 Diabete = Maladie('Diabète', 541412, 81000000 /
135                  | (320000*0.316), 1269, 1, 'chronique')
136 # nombre de patients atteints du diabète type 2 en Ile de France : 541 412 --> source Fédération Française du Diabète
137 # prix d'une hospitalisation : coût total des hospitalisations dues au diabète = 810 000 000
138 # et divisé par le nombre d'hospitalisations = nb_patients * pourcentage de patients hospitalisés (31,6%)
139
140 Deshydratation = Maladie('Déshydratation', 1785169,
141                          | 6000, 4596, 0.5, 'aiguë')
142 # population d'Ile de France de +65 ans en 2017 : 1 785 169 --> source Insee
143 # hospitalisations évitables : 4596 --> source ScanSant
144 # coût hospitalisation : 6000€ --> source Auxivia
145
146 Grippe = Maladie('Grippe', 1785169, 250, 10431, 0.5, 'aiguë')
147 # population d'Ile de France de +65 ans en 2017 : 1 785 169 --> source Insee
148 # autres données --> source Sante Publique France
149
150 ADP = Maladie('Angine de poitrine', 6807*5, 2500, 2584, 1, 'aiguë')
151 # 6807 hospitalisation en IDF on peut extrapoler le nombre de patients en multipliant par 5
152 # En moyenne, 2500€ pour une hospitalisation --> source GHM
153 # 2584 HPE en IDF --> source Scansante
154

```

```

155 teleop = {Diabete: Diabete.nb_patients_pec(0.1, 0.027, 5) * taux_teleop_base / 4,
156           Deshydratation: 50,
157           ADP: ADP.nb_patients_maladie * taux_teleop_base / 2,
158           Grippe: Grippe.nb_patients_pec(0.5, 0.1, 5) * taux_teleop_base / 2}
159
160
161 # On fait le bilan global de ce qui a été dépensé et gagné par l'Assurance Maladie sur N années
162
163 def bilan(maladies, taux_debut: float, taux_evol: float, annee: int, rendement=1, retour='texte'):
164     """
165     cette fonction fait le bilan de comptabilité de la plateforme
166     annee représente le nombre d'années de pérennité de l'application
167     maladies est une liste de Maladies
168     taux_debut est une liste de taux de prise en charge la première année pour chaque Maladie
169     taux_evol est une liste de pourcentages de nouveaux patients pris en charge correspondant à chaque Maladie
170     renvoie le détail si retour = 'texte'
171     renvoie juste le bénéfice si retour = 'benefice'
172     """
173     gain_tot = 0
174     nb_patients_tot = 0
175     depense_tot = cout_dev + annee * cout_maintenance
176
177     for i, maladie in enumerate(maladies):
178         gain_tot += maladie.gain_global(taux_debut[i],
179                                       taux_evol[i], rendement, annee)
180         depense_tot += maladie.cout_global(taux_debut[i],
181                                          taux_evol[i], teleop[maladie], annee)
182         nb_patients_tot += maladie.nb_patients_maladie * \
183             maladie.duree * (1 + taux_evol[i])**annee
184
185     if retour == 'benefice':
186         return gain_tot - depense_tot
187
188     return(f"Le gain est de {gain_tot : .3e} €, "
189           f"les depenses s'elevent a {depense_tot : .3e} € "
190           f"soit un benefice de {gain_tot - depense_tot : .3e} € sur {annee} ans "
191           f"pour {int(nb_patients_tot)} patients suivis.")
192
193
194 # Pour faire varier le nombre de patients inclus la première année
195
196 def optimisation_nb_patients(maladies, annee: int, taux_evol, rendement=1):
197     """
198     cette fonction montre l'influence de la part de patients pris en charge la première année sur les benefices potentiels
199     maladies est une liste de Maladies
200     taux_evol est une liste de pourcentages de nouveaux patients pris en charge correspondant à chaque Maladie
201     renvoie une courbe
202     """
203     les_taux = np.linspace(0., 0.6)
204     taux_debut = [les_taux for i in range(len(maladies))]
205     les_benef = bilan(maladies, taux_debut, taux_evol,
206                      annee, rendement, 'benefice')
207     if len(maladies) == 1:
208         plt.plot(les_taux, les_benef, marker='x',
209                linewidth=0, label=f'{maladies[0].nom} (croissance +{taux_evol[0]*100}% par an)')
210     else:
211         plt.plot(les_taux, les_benef, marker='x',
212                linewidth=0, label='Total')
213
214
215 optimisation_nb_patients([Deshydratation, ADP, Grippe, Diabete], annee=5,
216                        taux_evol=[0.1, 0.1, 0.1, 0.027], rendement=0.5)
217 optimisation_nb_patients([Deshydratation], annee=5,
218                        taux_evol=[0.1], rendement=0.5)
219 optimisation_nb_patients([ADP], annee=5,
220                        taux_evol=[0.1], rendement=0.5)
221 optimisation_nb_patients([Grippe], annee=5,
222                        taux_evol=[0.1], rendement=0.5)
223 optimisation_nb_patients([Diabete], annee=5,
224                        taux_evol=[0.027], rendement=0.5)
225
226
227 plt.title('Optimisation des gains effectués sur 5 ans en fonction du pourcentage de patients inclus la première année')
228 plt.legend()
229 plt.xlabel('Taux de patients inclus la première année')
230 plt.ylabel('Gains en euros (€)')
231 plt.grid()
232 plt.show()

```