

EFFECTEURS MOBILES DE LA PERMANENCE DES SOINS
AMBULATOIRES MISSIONNES PAR LE SAMU-CENTRE 15 : INTERET
D'UN MODELE NUMERIQUE D'OPTIMISATION DES TRAJETS.
APPLICATION DANS LE VAL-DE-MARNE

Thèse soutenue par
Matthieu HEIDET

Pour l'obtention du titre de
Docteur en sciences de la vie et de la santé (spécialité « Pathologie et recherche clinique »)
UNIVERSITE PARIS 12 – PARIS-EST CRETEIL (UPEC)

Sous la direction de
Professeur Jean MARTY
EA-4390 (ANALYSIS OF RISKS IN COMPLEX HEALTH SYSTEMS – ARCHES)
UNIVERSITE PARIS 12 – PARIS-EST CRETEIL (UPEC)

Thèse présentée et soutenue publiquement le 27 Mai 2019 devant le jury constitué de

PRESIDENT – Pr. Dominique PATERON (PROFESSEUR DES UNIVERSITES PARIS 6)
DIRECTEUR DE THESE – Pr. Jean MARTY (PROFESSEUR DES UNIVERSITES PARIS 12)
RAPPORTEUR – Pr. Karim TAZAROURTE (PROFESSEUR DES UNIVERSITES LYON)
RAPPORTEUR – Pr. Frédéric ADNET (PROFESSEUR DES UNIVERSITES PARIS 13)
EXAMINATEUR – Pr. Mehdi KHELLAF (PROFESSEUR DES UNIVERSITES PARIS 12)
EXAMINATEUR – Pr. Abdelhamid MELLOUK (PROFESSEUR DES UNIVERSITES PARIS 12)
EXAMINATEUR – Pr. Étienne AUDUREAU (PROFESSEUR DES UNIVERSITES PARIS 12)
EXAMINATEUR – Dr. Agnès RICARD-HIBON

N° de dépôt
XXXXXXXXXX

RESUME

En-dehors des horaires d'ouverture des cabinets de médecine générale, la permanence des soins ambulatoires (PDSA) est assurée par des médecins effecteurs mobiles (MPDSA), missionnés par le SAMU – Centre 15 et effectuant des visites au domicile des patients. L'ordre de réalisation de ces visites est basé sur un modèle intuitif, défini selon le degré d'urgence établi lors de l'appel au SAMU – Centre 15 et la connaissance du secteur par le MPDSA. Cette méthode intuitive est le plus souvent dictée par la problématique du plus court chemin entre les visites. Le maintien de délais compatibles avec le besoin médical dépend ainsi du flux de visites et du temps d'acheminement des MPDSA. Or, ce temps d'acheminement dépend notamment des effectifs de MPDSA de garde et des conditions de trafic. Les modèles existants d'optimisation des trajets sont inapplicables à la PDSA, en raison de la réactualisation continue de la liste des visites à effectuer, ainsi que de la pondération du délai cible par le degré d'urgence.

Nous proposons donc de créer un modèle spécifique d'optimisation des trajets des MPDSA missionnés par le SAMU–Centre 15. Nous développons une méta-heuristique évolutionnaire de type algorithme génétique, dont nous comparons d'abord les performances calculatoires à celles d'une méthode exacte d'optimisation linéaire en nombres entiers (méthode d'optimisation combinatoire non évolutionnaire), sur données théoriques, intégrant les données cliniques (3 degrés de priorité de visite), opérationnelles (taille de la flotte des MPDSA) et les objectifs temporels (3 délais d'effectation cible).

Les objectifs de ce travail sont de montrer que l'algorithme génétique, comparativement à la méthode linéaire en nombres entiers, conduit à une réduction des délais d'effectation des visites MPDSA, donc à un plus grand respect des délais d'effectation cibles ainsi qu'à une augmentation du nombre de patients vus par unité de temps (plage horaire de PDSA).

Les résultats obtenus suggèrent que l'algorithme génétique est à la fois plus performant que la méthode linéaire en nombres entiers sur tous les critères établis, et que ses performances s'améliorent avec la complexité du problème à résoudre (nombre de patients à visiter, taille de la flotte des MPDSA).

L'utilisation de la méthode d'optimisation développée dans ce travail pourrait permettre aux SAMU-Centres 15 d'améliorer le service rendu à la population, en termes d'accès au juste soin et de sécurité du patient.

MOTS-CLES

Permanence des soins ambulatoires
SAMU-Centre 15
Optimisation de trajet

ABSTRACT

During out-of-hours times, mobile general practitioners (GPs), appointed by the SAMU - Centre 15 (French public emergency call center), can provide out-of-hours home visits (OOH-HV).

The order in which these visits are carried out is based on an intuitive model, i.e. the shortest path problem, and determined according to the degree of urgency established at the time of the call to the SAMU - Centre 15 and the knowledge of the sector by the mobile GP. Maintaining timelines consistent with the medical need thus depends on the flow of visits and the GP's response times. However, this transit time depends in particular on the number of available GPs and traffic conditions. Existing models for routing optimization are inapplicable to OOH-HV, due to the continuous updating of the list of visits to be carried out, as well as the weighting of the target time by the degree of urgency.

We therefore propose to create a specific model for the optimization of the mobile GPs' sent by the SAMU-Centre 15. We develop an evolutionary meta-heuristic of the genetic algorithm type, whose computational performances we first compare with those of an exact method of integer linear optimization (non evolutionary combinatorial optimization method), on theoretical data, integrating the clinical data (3 degrees of priority of visit), operational constraints data (mobile GPs' fleet size) and response times objectives (3 target effectation times).

The objectives of this work are to show that the genetic algorithm, compared to the integer linear method, leads to a reduction in mobile GPs visit completion times, to a greater respect of the deadlines of target outcomes, as well as an increase in the number of patients seen per time unit (GPs time slot).

Our results suggest that the genetic algorithm is more efficient than the integer linear method on all established criteria, and that its performances improve with the complexity of the problem to be solved (number of patients to visit, size of mobile GPs' fleet).

The use of the optimization method developed in this work could enable the SAMU-Centres 15 to improve the service provided to the population, in terms of efficiency, safety and quality of access to care.

KEYWORDS

Out-of-hours primary care
Emergency call center
Routing optimization

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de tous ceux qui m'ont entouré, un jour ou l'autre, avec plus ou moins de force et de conviction.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma grande reconnaissance envers mon directeur de thèse Jean Marty, pour m'avoir soutenu dans ce parcours du combattant et pour m'avoir permis de mener de (trop) nombreux projets, dont cette thèse est le fer de lance. J'ai bouillonné, vous m'avez contenu.

Il est des choses qui doivent arriver, ainsi que des routes qui doivent se croiser. Mon chemin d'urgentiste est jalonné par la présence régulière et discrète de Dominique Pateron, qui m'a connu étudiant, puis a présidé ou a participé à tous les jurys de ma carrière, y compris celui-ci. Merci pour votre patience et vos mots d'encouragement.

J'ai grandi dans les pas de quelques modèles, des médecins qui m'ont inspiré, impressionné, poussé à me surpasser. Karim Tazarourte est l'un d'entre eux, et il est surtout celui qui a le plus infléchi ma trajectoire de soignant. Celui que j'écoute toujours attentivement. Merci Karim, je te dois tant (notamment cet intérêt étrange pour les SIG).

Merci à Mehdi Khellaf pour son entrain ainsi que pour soutien précieux. Il m'aide à naviguer sur cet océan agité qu'est le monde académique.

Merci aux autres membres de ce jury : Frédéric Adnet, qui a gentiment accepté d'être rapporteur (et qui m'a aidé à mener à bien un autre projet de recherche) ; Étienne Audureau, dont la sagesse n'a d'égal que la grande connaissance du monde automobile sportif ; Agnès Ricard-Hibon, qui a ouvert de grands yeux étonnés à l'annonce de mon sujet de thèse (mais qui a gardé le sourire malgré tout) ; Abdelamine Mellhouk, pour avoir accepté de juger ce travail à la lueur perçante de son savoir mathématique.

La liste des gens, collègues, amis et membres de la famille qui m'ont façonné est bien trop longue pour se prémunir du moindre oubli : c'est pourquoi je vais relever le défi, avec un peu de mauvaise foi, et en commençant par l'ensemble de mes amis en blanc au SAMU 94 (cette sous-liste est vraiment VRAIMENT trop longue), qui entretiennent cette étrange sensation de ne jamais venir au travail mais plutôt dans une succursale de ma propre maison. Merci pour les sourires, le soutien, les sourires et les sourires. C'est chouette de bosser avec vous — y compris avec les têtes de mule et autres caractères de cochon qui se reconnaîtront. J'ai une pensée sincère pour ceux qui nous ont quittés.

Les maîtres de stage, les chefs de service, les séniors, les collègues internes, les aides-soignants, les infirmiers.ères, les collègues administratifs et tous les autres, ceux que j'ai croisés depuis mes premiers pas à l'hôpital ou au cabinet et qui m'ont appris à être un homme, un collègue, un médecin, un apprenti chercheur, ont leur petit coin de souvenir dédié.

Un grand merci à Onur Ozturk pour son aide au cours de ces trois années de thèse. Il est celui de nous deux qui comprend le mieux l'abstraction mathématique et les opérateurs génétiques.

Un autre énorme merci à Éric Mermet, géomaticien de son état (et ingénieur de recherche en réseaux complexes), pour le temps qu'il passe à plancher sur nos sujets en commun, pour sa curiosité, sa motivation, sa soif de connaissances, ses conseils musicaux et ses sourires d'incompréhension quand il entend les histoires du monde médical. Je te souhaite plein de bonnes choses mon pote.

Les amis ne sont pas ceux qui vous plaignent — certains des miens s'amuse souvent de mes malheurs — ; ce sont simplement ceux qui vous connaissent le mieux et savent vous faire remarquer que vous êtes à côté de la plaque, mais qui vous veulent du bien en toute circonstance. Ceux qui restent avec le temps, et avec qui les silences ne sont pas inconfortables. Ceux avec qui la route est moins ennuyante (et qui ont vu mes golfes se clairsemer). Ceux que je défendrai toujours avec une mauvaise foi assumée : Chacha Ouicoucou, Élo le Fromage, Juju Plexiglas, Guégué le Guégué, Max Bouli, Pipo le roi du Bernard, Riku Redface, Riton *enss-enss-enss*.

Vous êtes parmi mes trésors (des trésors bizarres mais des trésors quand même).

Je n'oublie pas ceux que la vie a dispersés aux grands vents, mais qui restent nichés dans des souvenirs puissants : Beuleubeuleu c'est ralama, Lolo Yéyé, Loutfi mon gros fifi et les carabins cristoliens qui se reconnaîtront, Mehdi Firebird, Milou, et tous les copains de VE. Que ceux que j'ai omis me pardonnent : je n'ai pas beaucoup dormi en finalisant ce manuscrit.

Je n'oublie pas non plus ceux qui m'ont fait du mal, qui ont un jour voulu ma chute ou mon non-bonheur. Ceux-là m'ont rendu plus fort. Ils m'ont poussé à serrer les dents et à avancer, toujours. Elle est aussi pour vous celle-là, les gars (et les filles).

Le sport, c'est la vie ; le hockey, c'est les blessures et les copains. Tous ceux à qui j'ai fait des passes trop floues, qui m'ont insulté, encouragé, enlacé dans la victoire et consolé dans la défaite, qui m'ont fait vivre ces moments que seul le sport d'équipe peut offrir (Chocopouce et la Chenille dans le TGV, C'est pour moi c'est cadeau, Les gars pas de pinch), les tournois, les vestiaires, les blagues douteuses, le titre et la coupe (que j'ai secrètement gardée, fallait bien vous l'avouer un jour), tous ceux-là m'ont rendu la vie plus belle (quoique plus malodorante). Merci les filles.

La musique aussi, c'est la vie. Et Grimsli, c'est l'essence même de la musique (en tout cas d'après mes parents). C'est surtout Adi et ses amplis (mon bon), Buhan et ses grandes dents (mon juste), G-zu et feu ses cheveux (mon fat). Je n'oublie ni mon Boons exclusif, ni Titou ce Titou. Vache ce qu'on a rigolé, les gars.

La famille, c'est les piliers de la maison. Mes cousins.nes, oncles et tantes sont bien trop nombreux pour être tous cités (et comme je les vois tous les quinze jours, je leur dirai le fond de ma pensée autour d'un verre de jus de pomme, au détour d'un anniversaire). Vous savez comme je vous adore.

Mes grands-parents ont toute mon affection. Ils m'ont connu autrement plus ridicule que ce que je suis aujourd'hui — avec la goutte au nez et la couche aux fesses. Ils ont eu la patience de ceux qui croient aux excuses fumeuses (trop de travail, trop de fatigue, pas assez de temps, ce genre de trucs). Je pense à toutes les briques qu'ils ont posées dans le mur de ma vie, et je comprends que ce dernier tient debout aussi grâce à eux. Mamie Pierre et Papi Ginette, Mamie Prinçou, Papi Train, merci pour tout.

Mes parents, que je vois lentement mûrir avec toute la terreur que cela engendre, ont ma plus grande reconnaissance. Ils m'ont tenu quand je vacillais, ils ont établi les contraintes de mon modèle avec le souci de la juste solution. J'aimerais pouvoir leur rendre une partie de ce qu'ils m'ont donné. Devenir parent à mon tour m'a fait comprendre bien des choses. Maman, papa, devinez quoi : je vous aime.

Ma sœur, qui m'a toujours supporté comme seules peuvent le faire les petites sœurs, a souvent le mot juste et le regard doux. Merci ma Caillou. Et avec Flou, vous avez bien bossé. Mes nièces Chachou et Bago sont mes biquettes préférées. Numéro trois a intérêt à être au moins aussi chou. Je vous aime fort et vous souhaite le meilleur, vous savez bien.

Audrey, ma fée, mon p'tit bout de nez, ma meilleure amie, mon tout, se tient à mes côtés depuis si longtemps. Merci pour ton soutien indéfectible et les sacrifices qu'il a demandés. Merci de m'avoir accepté sans condition, avec tout ce que cela comporte d'imprévu et de foisonnement. Rien de tout cela n'aurait été surmontable sans toi. Je suis vraiment très Gontran.

Lola, ma petite étoile, ma galaxie, mon tourbillon, tu es une merveille qui m'aide à me réinventer chaque jour. Je t'aime comme l'univers et encore plus, et je te protège. Pour toujours.

Mon p'tit bonhomme, prends ton temps et rejoins-nous quand tu seras prêt. Mais rejoins-nous avec une envie de vivre aussi puissante que ce que nous t'aimons déjà (et une envie de hockey !).

TABLE DES MATIERES

RESUME	2
ABSTRACT	3
REMERCIEMENTS	4
LISTE DES ANNEXES	10
INDEX	11
LABORATOIRE DE PREPARATION DE LA THESE	12

PREMIERE PARTIE 13

1. LA PERMANENCE DES SOINS AMBULATOIRES : GENERALITES	14
1.1. DEFINITION ET MISSIONS	14
1.2. LE CADRE GENERAL	15
1.2.1. Les tutelles	15
1.2.2. Cadre général et cahier des charges	15
1.2.2.1. Cadre général	15
1.2.2.2. Cahier des charges	15
1.2.2.3. L'organisation de la PDSA	16
1.2.2.3.1. La régulation téléphonique	17
1.2.2.3.2. L'effectif fixe	18
1.2.2.3.3. L'effectif mobile	18
1.2.2.3.4. Les médecins correspondants du SAMU	18
1.2.3. L'organisation de la PDSA en Île-de-France	19
1.2.3.1. Île-de-France : données générales	19
1.2.3.2. La PDSA francilienne	19
1.3. L'ORGANISATION DE LA PDSA DANS LE VAL-DE-MARNE	20
1.3.1. Le Val-de-Marne : données générales	20
1.3.1.1. Géographie et urbanisation	20
1.3.1.2. Une population vulnérable	21
1.3.1.3. Articulation de la PDSA avec l'offre hospitalière et les transports sanitaires	22
1.3.2. La régulation téléphonique	23
1.3.3. L'effectif mobile	24
1.3.3.1. Territoires d'effectif	24
1.3.4. L'effectif fixe	25
1.3.5. Les taux de participation	25
2. LA PDSA, UN SYSTEME A FORTS ENJEUX	26
2.1. UN SYSTEME FRAGILE DEPUIS SA CREATION	26
2.1.1. Baisse des effectifs	27
2.1.2. Erosion du volontariat	28
2.1.2.1. Type d'exercice et choix de carrière	28
2.1.2.2. Une participation à la PDSA en chute libre	29
2.1.3. Le vieillissement de la population médicale	30
2.1.4. L'exode rural et la désertification des territoires	30
2.1.5. Une population davantage consommatrice de soins	31
2.1.5.1. Une population âgée plus nombreuse	31
2.1.5.2. Une consommation de soins toujours plus grande	31
2.1.5.3. Des pathologies chroniques plus fréquentes, une population moins dépendante mais plus consommatrice de soins	32
2.1.6. Une demande de soins croissante et impatiente	33
2.1.7. La riposte insuffisante des médecins généralistes	33
2.1.8. L'augmentation du recours à la PDSA comme conséquence	34
2.1.8.1. Le recours aux urgences hospitalières	34
2.1.8.2. Le recours aux effecteurs non hospitaliers de la PDSA	34
2.2. LES ENJEUX DE LA PDSA	35
2.2.1. Une meilleure offre de soins	35
2.2.1.1. Une plus grande égalité d'accès aux soins	35
2.2.1.2. Un désengorgement des services d'urgence	36
2.2.1.3. Pour un meilleur contrôle budgétaire	37
3. L'EFFECTION MOBILE DE LA PDSA : PRINCIPES ET RELATIONS AVEC LE SAMU-CENTRE 15	38
3.1. LE SAMU-CENTRE 15	38
3.1.1. Cadre légal et missions	38
3.1.2. Organisation	39
3.1.3. De l'appel du patient à la visite du MPDSA : un circuit codifié	39
3.1.4. Critères d'évaluation	40
3.1.4.1. Les performances opérationnelles	40
3.1.4.1.1. Les critères téléphoniques	40
3.1.4.1.2. Les critères d'activité	41
3.1.4.2. Le service rendu à la population	41

3.1.4.3.	Les délais d'intervention	41
3.1.4.4.	Le nombre de patients vus	41
3.2.	L'EFFECTION MOBILE	42
3.2.1.	Principes et généralités	42
3.2.2.	Des données rares pour un modèle discuté	42
3.2.3.	En France : état des lieux	43
3.2.4.	L'évaluation des pratiques dans le Val-de-Marne : un prérequis aux méthodes correctives	45
3.2.4.1.	Méthode et données	46
4.	LES AXES D'AMELIORATION DE LA PDSA	47
4.1.	LES PROPOSITIONS DU CONSEIL NATIONAL DE L'ORDRE DES MEDECINS	47
4.2.	LES OBJECTIFS DE L'ARS-IDF	48
4.3.	LES PROPOSITIONS DE L'ASSEMBLEE NATIONALE	48
4.4.	LA COUR DES COMPTES	48
4.5.	LES PROPOSITIONS DU SENAT	49
4.6.	LES PROPOSITIONS DU RAPPORT MESNIER	49
5.	OBJECTIFS DU TRAVAIL PRESENTE	50
DEUXIEME PARTIE		51
1.	L'OPTIMISATION DE TRAJET DES EFFECTEURS DE SANTE	52
1.1.	L'OPTIMISATION : GENERALITES	52
1.2.	DEFINITIONS UTILES	52
1.3.	CLASSIFICATION DES PROBLEMES D'OPTIMISATION	54
1.4.	METHODES EXISTANTES	55
1.4.1.	Les méthodes linéaires	55
1.4.1.1.	La méthode graphique	57
1.4.1.2.	L'algorithme simplexe	57
1.4.2.	La programmation linéaire en nombres entiers	58
1.4.2.1.	L'optimisation combinatoire : généralités	59
1.4.2.2.	Méthodes exactes : les méthodes arborescentes	60
1.4.2.3.	Méthodes exactes : la programmation dynamique	61
1.4.2.4.	Méthodes approchées : les heuristiques	61
1.4.2.5.	Les méthodes méta-heuristiques	62
1.4.2.5.1.	Le recuit simulé	63
1.4.2.5.2.	Les algorithmes gloutons	64
1.4.2.5.3.	L'optimisation par essais particuliers	65
1.4.2.5.4.	La colonie de fourmis	66
1.4.2.5.5.	Les algorithmes génétiques	67
1.4.2.5.6.	Les algorithmes mémétiques	70
1.4.2.5.7.	Les algorithmes tabous	70
1.4.3.	Les méthodes non linéaires	71
1.5.	L'OPTIMISATION DE TRAJET : GENERALITES ET METHODES	72
1.5.1.	Le voyageur de commerce	72
1.5.2.	Le postier chinois	73
1.5.3.	Le « vehicle routing problem » ou VRP	73
1.5.4.	Le VRP à fenêtre temporelle (VRPTW)	76
1.5.5.	Le VRP avec chargement-livraison (VRPPD)	77
1.5.6.	Le VRP dynamique (dVRP)	78
1.5.7.	Les visites des MPDSA : un dVRPTW ?	79
1.6.	LE CŒUR DU PROBLEME A OPTIMISER : L'INFORMATION ET SON EVOLUTION	80
1.6.1.	L'information : généralités	80
1.6.2.	L'optimisation de trajet en santé : quelles informations ?	81
2.	L'EFFECTION MOBILE : PROBLEMATIQUES DU CHOIX DE TRAJET	83
2.1.	LE PROCESSUS ACTUEL	83
2.1.1.	Un modèle intuitif	83
2.1.2.	Les solutions existantes	86
2.2.	LES CONTRAINTES DU PROBLEME	87
2.2.1.	Une liste dynamique	87
2.2.2.	Une grande variabilité	87
2.2.3.	Plusieurs degrés de priorité, donc plusieurs délais cibles	88
3.	LE PROCESSUS CIBLE : VERS LE MODELE NUMERIQUE	89
3.1.	LE PROCESSUS D'EFFECTION CIBLE	89
3.2.	L'OPTIMISATION DE TRAJET EN SANTE : ETAT DES LIEUX	91
3.2.1.	Les urgences vitales	91
3.2.1.1.	En situation de fonctionnement normal	91
3.2.1.1.1.	Activation de l'équipe la plus proche (off-line)	92
3.2.1.1.2.	La réallocation dynamique des ambulances (on-line)	92
3.2.1.2.	En situation de fonctionnement altéré	93
3.2.2.	Les soins primaires	93

3.2.3.	Les visites médicales à domicile	94
3.2.4.	Le trajet des MPDSA : un modèle hybride	95
3.3.	LE MODELE NUMERIQUE	96
3.3.1.	Le choix de l'algorithme génétique	96
3.3.2.	La définition des contraintes	96
3.3.3.	Déroulé du consensus	96
3.3.3.1.	Constitution du comité d'experts	97
3.3.3.2.	Données existantes	98
3.3.3.3.	Motifs de visite et degrés de priorité	98
3.3.3.3.1.	Degrés de priorité	98
3.3.3.3.2.	Motifs de visite : classifications	98
3.3.3.3.3.	Motifs de visite : les données du Val-de-Marne	99
3.3.3.4.	Délais cibles	100
3.3.3.5.	Sélection des dossiers à analyser	100
3.3.3.5.1.	Déterminants du nombre d'appels	101
3.3.3.5.2.	Extraction des données	101
3.4.	Modèle mathématique (MILP)	101
3.5.	L'algorithme génétique : généralités et objectifs	103
3.5.1.	Représentation et partitionnement des chromosomes	104
3.5.2.	Crossover	105
3.5.3.	Mutation	107
3.5.4.	Composition de la nouvelle génération et critères d'arrêt	107
3.6.	Le langage informatique	108

TROISIEME PARTIE

110

1.	DONNEES DE REGULATION MEDICALE ET VISITES PDSA	111
1.1.	ÉTAT DES LIEUX DANS LE VAL-DE-MARNE	111
1.1.1.	Base de données globale	111
1.1.2.	Dossiers sélectionnés après application de la RAM	112
1.1.3.	Motifs de visite	113
1.2.	QUALITÉ DU DOSSIER DE REGULATION MEDICALE	115
1.2.1.	Méthode	115
1.2.1.1.	Les déterminants de l'efficacité du processus de la PDSA	116
1.2.1.2.	Variables	116
1.2.1.3.	Critères de jugement	116
1.2.1.4.	Gestion des données et analyse	116
1.3.	Résultats	117
1.3.1.	Population et motifs de visite	117
1.3.2.	Critères de qualité	117
1.3.3.	Analyse univariée	118
1.3.4.	Analyse multivariée	119
1.4.	Discussion	119
1.4.1.	Résumé	119
1.4.2.	Comparaison avec les données de la littérature	121
1.4.3.	Forces et limites	123
1.4.4.	Implications générales	123
1.4.4.1.	Pour la recherche	123
1.4.4.2.	Pour la pratique	124
1.4.5.	Implications pour notre travail principal	124
1.4.5.1.	Les contraintes du modèle	124
1.4.5.2.	L'adaptation aux conditions réelles	125
2.	PERFORMANCES DE L'ALGORITHME GENETIQUE	127
2.1.	SUR DONNEES THEORIQUES	127
2.1.1.	Listes des visites fournies par instance de test	127
2.1.2.	Performances des méthodes testées	129
2.1.2.1.	Faisabilité et solutions	129
2.1.2.2.	Somme des retards (<i>sum of tardiness</i>) ou délais d'effecton	129
3.	DISCUSSION	136
3.1.	INTERET DU MODELE D'OPTIMISATION	136
3.2.	PERSPECTIVES ET TRAVAUX EN COURS	137
3.2.1.	L'évaluation sur données historiques	137
3.2.2.	La gestion en temps réel	137
3.2.3.	Vers une évaluation prospective en vie réelle	139
3.2.4.	Implémentation des logiciels de régulation	139
4.	CONCLUSION	141

ANNEXES

142

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Composition du CODAMUPS-TS

Annexe 2. Nombre de médecins régulateurs présents par plage horaire de la PDSA au CRRA du Val-de-Marne

Annexe 3 Territoires d'effectif mobile de la PDSA dans le Val-de-Marne

Annexe 4. Synthèse de la répartition des effecteurs de la PDSA dans le Val-de-Marne

Annexe 5. Cartographie des SAMI en fonction des territoires d'effectif de PDSA dans le Val-de-Marne¹²

Annexe 6. Taux de participation des médecins généralistes à la PDSA au 31 Décembre 2017 (en %)

Annexe 7. Taux de couverture des territoires de PDSA par les effecteurs mobiles

Annexe 8. Variation des effectifs de médecins généralistes en activité régulière (2010-2017)

Annexe 9. Pyramide des âges de l'ensemble des médecins inscrits au CNOM (2007-2017)

Annexe 10. Effectifs des médecins inscrits au CNOM (1979-2017)

Annexe 11. Évolution du nombre et de la densité de médecins français en activité (2006-2030)

Annexe 12. Répartition des dépenses de santé en fonction de l'âge en France (2004)

Annexe 13. Répartition horaire des recours urgents (non programmés), en cabinet de ville, auprès des MPDSA et à l'hôpital, selon l'âge des patients

INDEX

- AC : arrêt cardiaque
ACO : ant colony optimization
AG : algorithme génétique
AMU : aide médicale urgente
AP-HP : assistance publique - hôpitaux de Paris
APL : accessibilité potentielle délocalisée
ARM : assistant.e de régulation médicale
ARPS : Association départementale des médecins pour le regroupement de la régulation médicale et de la permanence des soins ambulatoires dans le Val-de-Marne
ARS : agence régionale de santé
AVC : accident vasculaire cérébral
BSPP : brigade de sapeurs-pompiers de Paris
CCMU : classification des consultations des malades aux urgences
CESU : centre d'enseignement des soins d'urgence
CIM-10 : classification internationale des maladies (10^{ème} version)
CISP : classification internationale des soins primaires
CNIL : commission nationale informatique et libertés
CNOM : conseil national de l'ordre des médecins
CODAMUP-TS : comité départementale de l'aide médicale urgente, de la permanence des soins et des transports sanitaires
CRRRA : centre de réception et de régulation des appels
CSP : code de la santé publique
DGOS : Direction générale de l'offre de santé
DREES : direction de la recherche, de l'évaluation, des études et des statistiques
DRM : dossier de régulation médicale
EDI : european deprivation index
EHPAD : établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes
EURO : european operational research societies
GPS : global positioning system
HAS : haute autorité de santé
HCSP : haut conseil de santé publique
HHC : home health care
IC95 : intervalle de confiance à 95%
ICPC-2 : international classification for primary care (2nd version)
INSEE : institut national des statistiques et des études économiques
InVS : institut national de veille sanitaire
IRDES : institut de recherche et documentation en économie de la santé
IRIS : îlots regroupés pour l'information statistique
PDS : permanence des soins
PDSA : permanence des soins ambulatoires
MCS : médecin correspondant du SAMU
MILP : mixed integer linear programming
MPDSA : médecin de la permanence des soins ambulatoires
OMS : organisation mondiale de la santé
OR : odds-ratio
ORL : oto-rhino-laryngologie
PDP : pickup delivery problem
RAM : RAND/UCLA appropriateness method
SAMI : service d'accueil médical initial
SAMU : service d'aide médicale urgente
SAU : service d'accueil des urgences
SIG : système d'information géographique
SIHP : syndicat des internes des hôpitaux de Paris
SMA : système multi-agents
SMUR : service mobile d'urgence et de réanimation
SUdF : samu-urgences de France
TSL : transportation science and logistics society
URPS-IDF : union régionale des professionnels de santé Île-de-France
VRP : vehicle routing problem
dVRP : dynamic vehicle routing problem
VRPPD : vehicle routing problem with pickups and deliveries
VRP-TW : vehicle routing problem with time window
dVRP-TW : dynamic vehicle routing problem with time window
VSAV : véhicule de secours et d'assistance à victime
WONCA : world organization of national colleges, academies and academic associations of general practitioners/family physicians

LABORATOIRE DE PREPARATION DE LA THESE

Ce travail a été élaboré sous au sein de l'EA-4390 (Analysis of Risk in Complex HEalth Systems — ARCHES) de l'Université Paris-Est Créteil, située au SAMU 94, Hôpital Universitaire Henri Mondor, Créteil, France (sous la direction du professeur Jean Marty).

Il a été mené en collaboration avec l'école supérieure d'ingénieurs en électrotechnique et électronique (ESIEE Paris), Marne-la-Vallée, France, puis la Telfer school of management de l'Université d'Ottawa, Ottawa, Canada (en partenariat avec Onur Ozturk).

PREMIERE PARTIE

La permanence des soins ambulatoires :
contexte, problématiques et justification du travail

1. LA PERMANENCE DES SOINS AMBULATOIRES : GENERALITES

1.1. Définition et missions

La permanence des soins ambulatoires (PDSA) est le dispositif assurant la continuité de prise en charge des soins non programmés. Mission de service public instauré en 2002 depuis l'abandon de l'obligation de garde des médecins généralistes, elle garantit, à l'ensemble de la population, l'accès à un médecin aux horaires de fermeture des cabinets de ville, la nuit, les week-ends, les jours fériés et sur certains ponts¹ : tous les jours de 20h à 08h, les dimanches et jours fériés de 08h à 20h et dans certains départements, en fonction des ressources disponibles et de l'offre de soins, les samedis à partir de midi, les lundis précédant un jour férié, et les vendredis et les samedis suivant un jour férié.

Elle est assurée par des médecins volontaires de garde et d'astreinte exerçant dans les cabinets médicaux, les maisons de santé, les pôles et centres de santé, et par des médecins appartenant à des associations de permanence des soins², ou par tout médecin volontaire ayant encore une activité clinique. Elle se fait en lien avec les établissements de santé, dans les conditions fixées par l'ARS. Elle représente une obligation collective.

Ses trois grands principes, qui seront détaillés ultérieurement, sont le volontariat des médecins effecteurs, un accès conditionné par la régulation médicale des appels par les SAMU³-Centre 15 et les associations de médecins libéraux de la PDSA, ainsi que la sectorisation et les rémunérations forfaitaires (forfaits d'astreinte).

¹ Décret n°2010/809 du 13 juillet 2010

² Articles L.6314-1, R.6315-1 et R.730 du code de la santé publique (CSP)

³ Service d'aide médicale urgente

1.2. Le cadre général

1.2.1. Les tutelles

La loi du 21 juillet 2009 portant réforme de l'hôpital et relative aux patients, à la santé et aux territoires (HPST) (1) confie à l'agence régionale de santé (ARS) l'organisation de la mission de service public de PDSA, avec l'aide du comité départementale de l'aide médicale urgente, de la permanence des soins et des transports sanitaires (CODAMUP-TS). Ce dernier est codirigé par le préfet et le directeur général de l'ARS⁴. Sa composition, comprenant, entre autres, le directeur médical du SAMU, est synthétisée en Annexe 1.

1.2.2. Cadre général et cahier des charges

1.2.2.1. Cadre général

L'ARS est responsable du pilotage de la PDSA, du montant de son financement forfaitaire ainsi que du dénombrement et de la délimitation des secteurs de garde des médecins volontaires, appelés effecteurs mobiles de la PDSA (EMPDSA), médecins mobiles de la PDSA (MPDSA) ou simplement médecins mobiles (MMO). À des fins d'uniformisation, les médecins effecteurs seront appelés « médecins de la PDSA (MPDSA) » dans ce travail.

Les territoires d'effectif peuvent être considérés comme des sous-unités d'un département donné, au sein desquelles doit s'organiser la rotation des effecteurs lors de chaque garde.

La PDSA est assurée en liaison avec les établissements de santé, par l'intermédiaire de leurs services d'urgence qui représentent le dernier recours en cas d'accès impossible à un effecteur de la PDSA. L'ARS détermine les conditions de cette participation hospitalière.

1.2.2.2. Cahier des charges⁵

Les tutelles établissent et réactualisent chaque année, en concertation avec les acteurs professionnels concernés, un cahier des charges régional de la PDSA dont la trame générale, dictée par la loi HPST, peut être modifiée selon les principes d'organisation locale. Ce cahier des charges, après avis du CODAMUPS-TS, de la commission spécialisée de l'organisation des soins, de la conférence régionale de la santé et de l'autonomie et de l'union régionale des professionnels de santé représentant les médecins, est arrêté par le directeur de l'ARS⁶.

⁴ Article R.6313-1 du CSP

⁵ Cahier des charges de la région Île-de-France, arrêté de la Direction Générale de l'ARS n°DOS-2017-2140 (entré en vigueur au 01/01/2018)

⁶ Article R.6315-6 du CSP

L'organisation proposée est soumise pour avis au conseil départemental de l'ordre des médecins et au préfet. Le cahier des charges est révisé chaque année afin de pouvoir adapter l'organisation régionale aux évolutions rencontrées ainsi qu'au montant de l'enveloppe annuelle de financement de la PDSA. Propre à chaque région, il précise :

- l'organisation de la régulation médicale des appels (dont le CRRA⁷) du SAMU-Centre 15 est la pierre angulaire : statut des médecins régulateurs (publics ou libéraux), effectifs etc.
- l'organisation de l'offre de soins ambulatoires aux horaires de la PDSA
- l'organisation territoriale de la PDSA
- les lieux de consultation fixes
- les conditions de rémunération des médecins régulateurs et effecteurs
- les conditions de gouvernance territoriale

En outre, il précise les modalités de suivi et d'évaluation du fonctionnement de la PDSA. Il est opposable à chaque intervenant de la PDSA et ce, à chaque étape du dispositif :

- régulation médicale régionale et départementale (gouvernance, organisation)
- tableaux de garde (dont réquisitions préfectorales en cas de carence)
- rémunérations forfaitaires
- traçabilité et analyse qualité des appels reçus et traités, telles que définies par les recommandations de la haute autorité de santé (HAS) et des sociétés savantes (2,3)
- modalités de suivi et analyse des dysfonctionnements

1.2.2.3. L'organisation de la PDSA

L'organisation de la PDSA, bien que soumise à variations régionales, départementales ou infra-départementales, répond à un schéma général commun. L'enquête annuelle sur la PDSA conduite par le CNOM⁸ a pour but de synthétiser l'état des lieux du système et ses variations organisationnelles locales au cours de l'année écoulée. Réalisée avec le concours de chaque conseil départemental, elle permet d'éclairer l'organisation et le fonctionnement de la PDSA, et de comparer les particularités locales. Elle décrit par ailleurs les réorganisations de certains secteurs et territoires de PDSA, l'ouverture de nouveaux centres fixes de garde et des renforcements de régulateurs médicaux.

⁷ Centre de réception et de régulation des appels

⁸ Conseil national de l'ordre des médecins

Le CNOM analyse les évolutions du type d'exercice des médecins généralistes, le taux de participation à la liste de garde ou de régulation téléphonique, la démographie médicale et ses évolutions prévisibles, et formule une liste de recommandations pour le maintien et l'amélioration de la PDSA.

1.2.2.3.1. *La régulation téléphonique*

Son accès est légalement conditionné par un acte de régulation médicale téléphonique : seul un médecin doit évaluer le niveau d'urgence d'un appel de santé et y apporter la réponse la plus adaptée. Les centres de réception et de régulation des appels (CRRRA) des SAMU-Centres 15 apparaissent comme la clé de voûte de ces actes de régulation téléphonique. Cependant, malgré un cadre légal strict, seuls 72 % des appels de santé aboutissant à acte de PDSA sont médicalement régulés (4), en raison de l'intrication de plusieurs organisations (SAMU-Centres 15 et associations libérales de MPDSA possédant leur propre standard, souvent non médicalisé).

Les modalités de régulation de la PDSA sont variées : en majorité, cette dernière s'effectue à l'échelle départementale, au SAMU-Centre 15, en collaboration avec les médecins urgentistes hospitaliers (dont 95 % des départements déclarent qu'elle s'articule de façon satisfaisante).

Certains départements ne possèdent pas de régulateur libéral et d'autres, en raison de leur grande étendue géographique ou d'une localisation excentrée du SAMU-Centre 15, se voient contraints de mettre en place une régulation dite « déportée », c'est-à-dire effectuée depuis le domicile ou le cabinet des médecins généralistes. Enfin, certaines régions ont récemment organisé une régulation centralisée.

Le numéro téléphonique d'accès à la régulation médicale est inconstant sur le territoire. En ce qui concerne la PDSA, la majorité des départements est organisée autour du numéro du SAMU-Centre 15 (cinquante-quatre départements) mais il existe plusieurs numéros alternatifs, tels le 116-117 (dans douze départements) ou autres (trente-quatre départements).

Pourtant, la loi de modernisation du système de santé prévoit la mise en place d'un numéro unique de permanence des soins ambulatoires depuis 2016⁹. Les événements sociétaux récents, ayant mis en lumière la problématique de la multiplication et de la juxtaposition des numéros d'urgence et d'accès aux soins non programmés, ont accéléré la discussion vers la mise en place de ce numéro unique, qui pourrait être celui de tout appel de santé (5).

⁹ Loi n°2016-41 du 16 Janvier 2016, article 75

1.2.2.3.2. *L'effectation fixe*

Certaines structures fixes participent à la PDSA. Elles peuvent être des cabinets libéraux de garde (cabinets de médecine générale restant ouverts aux horaires de la PDSA), des maisons médicales de garde, ou des structures rattachées aux urgences hospitalières. Leur fonctionnement est identique à celui des cabinets libéraux aux heures ouvrées : les patients s'y rendent par leurs propres moyens.

1.2.2.3.3. *L'effectation mobile*

Elle correspond à l'envoi d'un MPDSA pour réalisation d'une visite au domicile du patient, soit parce que ce dernier ne peut pas se déplacer de lui-même ou que son état doit être cliniquement évalué avant décision de transfert à l'hôpital, soit parce que l'accès aux autres structures de la PDSA (structures d'effectation fixe) est impossible.

L'effectation mobile est assurée par des médecins généralistes de garde entièrement dédiés à cette activité sur une plage de PDSA donnée. En début de garde, chaque MPDSA se voit attribuer un territoire fixe au sein duquel il effectue ses visites, au gré des listes transmises par le CRRA ou par les standards de l'association libérale de laquelle il dépend.

Lorsqu'un territoire n'est pas pourvu, en-dehors des situations où le MPDSA d'un autre territoire est disponible et accepte d'y effectuer une visite, les patients pour lesquels une visite à domicile serait appropriée sont réorientés vers d'autres solutions (structures fixes de PDSA).

Le processus exact est décrit plus avant au chapitre 3 (p.38).

1.2.2.3.4. *Les médecins correspondants du SAMU*

Dans les territoires où le délai d'accès des équipes de secours médicalisés est supérieur à trente minutes, des médecins formés à la médecine d'urgence participent à la mission d'aide médicale urgente en relais avec les SAMU-Centres 15¹⁰. L'intervention de ces médecins correspondants du SAMU (MCS) permet de réduire les délais de prise en charge des patients et d'assurer le lien avec les équipes de secours. Les objectifs et missions des MCS diffèrent de ceux des MPDSA, mais un même effecteur peut cumuler les deux activités. Il appartient dans ce cas au SAMU de mettre en œuvre le type de réponse le plus approprié aux besoins des patients. Ce dispositif est basé sur le volontariat et est accessible à tout professionnel médical répondant aux conditions de formation dictées par décret. Il n'existe pas de MCS dans le Val-de-Marne.

¹⁰ Décret n°2006-576 du 22 mai 2006

1.2.3. L'organisation de la PDSA en Île-de-France

1.2.3.1. Île-de-France : données générales

L'Île-de-France est le premier bassin de population français, comptant pour près de 20 % des habitants de métropole (plus de 12 millions) (6). Sa géographie et sa démographie sont hétérogènes, avec un centre hyper-urbain hyperdense et une couronne semi-rurale ou rurale, ainsi que de grandes disparités socio-économiques (les écarts de revenus sont les plus importants du pays) et d'accès aux soins (7).

La densité moyenne de médecins généralistes en Île-de-France diminue constamment (- 22 % entre 2007 et 2016), et y est plus faible que dans le reste du pays (147/100 000 habitants contre 157/100 000 habitants) (8,9). L'offre hospitalière et l'activité des SAMU-Centre 15 sont dans la frange nationale haute : 300 centres de santé, pour une densité de places d'hospitalisation de 11/100 000 habitants (10), 2,6 millions d'appels entrants en 2016 (près de 10 % des appels nationaux) pour environ 1 million de dossiers de régulation médicale traités annuellement par les quatre SAMU-Centre 15 de l'AP-HP¹¹ (alors que 25 % des SAMU-Centre 15 français traitent moins de 25 000 DRM par an et que la médiane nationale est de 104 340) (5,11).

1.2.3.2. La PDSA francilienne

L'Île-de-France est l'une des cinq régions ayant modifié son cahier des charges en 2017¹², *via* la fusion de certains secteurs d'effectif, la création de nouvelles maisons médicales de garde (MMG) ainsi que l'ouverture de postes supplémentaires de régulation téléphonique le samedi.

En 2018, la PDSA francilienne bénéficie d'une régulation médicale libérale dédiée 24 heures sur 24 dans chacun des huit départements. Il existe 69 lieux de consultation fixes dont la répartition et la densité varient en fonction des départements (12 dans le Val-de-Marne, 2 dans le Val d'Oise).

L'effectif mobile est assurée par les associations de PDSA (type SOS Médecins, Médecins à domicile, etc.), dont la majorité est entièrement professionnalisée (entièrement dédiée à la PDSA).

¹¹ Assistance publique – hôpitaux de Paris

¹² Arrêté ARS N° DOS-2017-2140 du 21 Décembre 2017

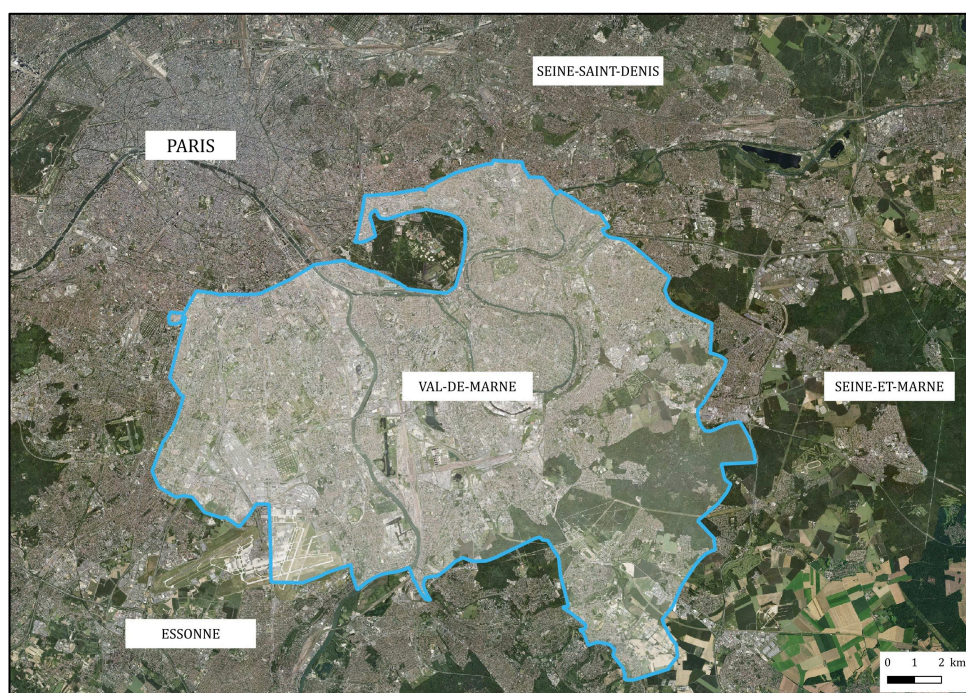
1.3. L'organisation de la PDSA dans le Val-de-Marne

1.3.1. Le Val-de-Marne : données générales

1.3.1.1. Géographie et urbanisation

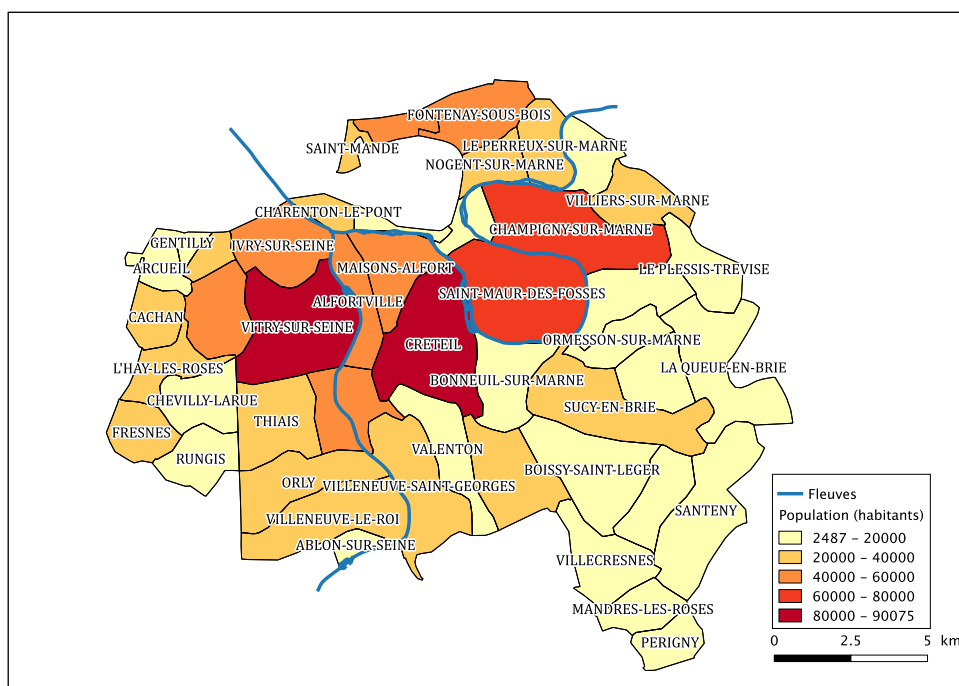
Le Val-de-Marne, situé au sud-est de Paris, est le plus vaste département de la petite couronne parisienne (245 km²) et comptait, en 2016, 1 354 005 habitants dans 49 communes. C'est le onzième département le plus peuplé de France. Il est limitrophe avec Paris, la Seine-Saint-Denis, la Seine-et-Marne, l'Essonne et les Hauts-de-Seine (Figure 1).

Figure 1. Limites administratives du Val-de-Marne



Le niveau d'urbanisation du Val-de-Marne, bien que globalement très élevé, est disparate : tandis que huit communes urbaines comptent plus de 50 000 habitants (Champigny, Créteil, Fontenay-sous-Bois, Ivry-sur-Seine, Maisons-Alfort, Saint-Maur-des-Fossés, Villejuif et Vitry-sur-Seine), cinq communes du plateau Briard, une zone agricole du Sud-Est du territoire, sont classées rurales et comptent moins de 5 000 habitants (Mandres-les-Roses, Périgny-sur-Yerres, Santeny, Marolles-en-Brie). Sa densité de population moyenne est de 5 649 habitants/km² (min : 367 hab./km² à Santeny, max : 26 018 hab./km² à Vincennes) (6) (Figure 2).

Figure 2. Population par commune du Val-de-Marne



1.3.1.2. Une population vulnérable

La population du Val-de-Marne est plutôt jeune (plus de 80 % des habitants ont moins de soixante ans, contre 7 % pour les plus de 75 ans) et sa proportion immigrée est de 20 % (12). Son niveau socio-économique est faible : le taux de chômage des Val-de-Marnais âgés de 15 à 64 ans est de 13 % (13) et 6,5 % de la population bénéficie de la couverture mutuelle universelle. Ces chiffres sont superposables au reste de l'Île-de-France (14).

Quatre communes sont classées zones franches urbaines (communes de plus de 10 000 habitants, dites « sensibles » ou « défavorisées » en raison de leur taux de chômage, du pourcentage d'habitants sortis du système scolaire ou sans diplôme, du pourcentage de jeunes et du potentiel fiscal d'habitation)¹³ : Champigny-sur-Marne, Choisy-le-Roi, Orly et Vitry-sur-Seine.

Par ailleurs, le département compte 42 quartiers prioritaires de la politique de la ville (sur 1500 nationaux), dont le principal critère de découpage est la concentration en pauvreté (nombre d'habitants vivant sous le seuil de pauvreté), et qui ont pour but de réduire la complexité du maillage des zones défavorisées.

Plusieurs scores et méthodes sont utilisés pour mesurer le niveau de défavorisation au niveau individuel ou à l'échelle de la population. La version française du score national de défavorisation EDI¹⁴ (French-EDI) (15) est calculée pour chaque maille territoriale élémentaire

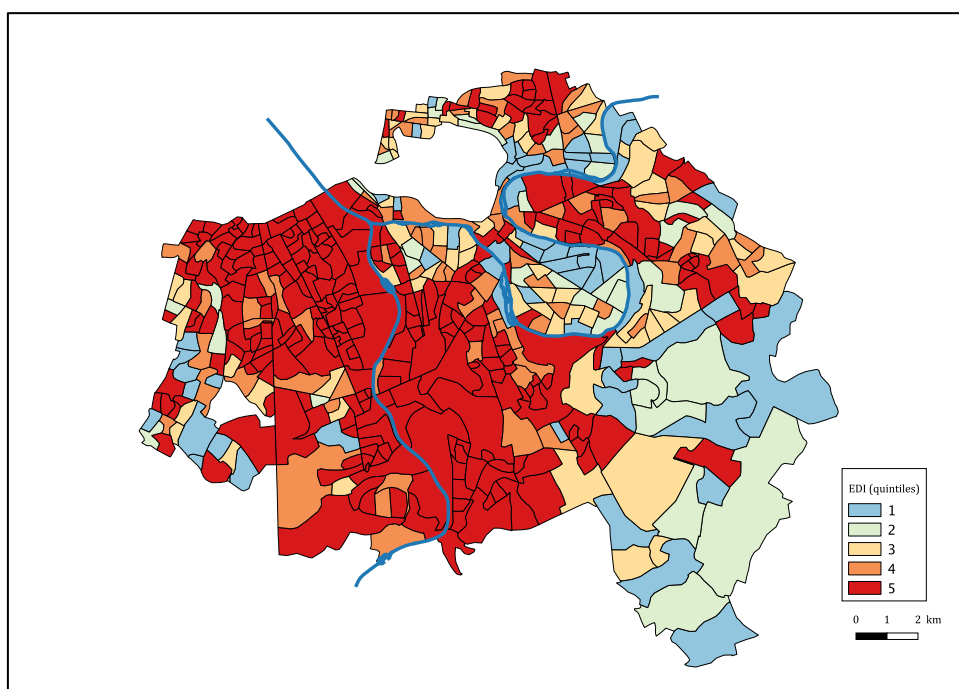
¹³ Source : Institut national des statistiques et des études économiques (INSEE)

¹⁴ European deprivation index

nommée IRIS¹⁵ et catégorisée en quintiles (de Q1 : moins défavorisé à Q5 : plus défavorisé). Ce score évalue, en plus des données communes aux scores classiques, les besoins fondamentaux de vie de la population.

Après avoir récupéré l'EDI de chaque IRIS, nous avons analysé la répartition de ce score dans le Val-de-Marne : la moitié de sa population vit dans les zones les plus défavorisées : médiane Q5, interquartile [Q3-Q5]. Ainsi, seulement 20 % de la population du département vit sous la médiane de défavorisation socio-économique nationale (Figure 3).

Figure 3. Niveau socio-économique dans le Val-de-Marne (EDI par IRIS)



1.3.1.3. Articulation de la PDSA avec l'offre hospitalière et les transports sanitaires

Le Val-de-Marne possède dix services d'accueil des urgences adultes (neuf civils et un militaire), dont quatre d'entre eux assurent également la prise en charge des urgences pédiatriques.

Deux de ces sites hébergent des services mobiles d'urgence et de réanimation (Créteil et Villeneuve-Saint-Georges). Le département est défendu par le 2^{ème} groupement de la BSPP¹⁶, qui partage l'une de ses ambulances de réanimation (Vitry-sur-Seine).

¹⁵ Îlots regroupés pour l'information statistique

¹⁶ Brigade de sapeurs pompiers de Paris

1.3.2. La régulation téléphonique

L'accès à la régulation médicale est théoriquement précédé par l'appel au numéro unique 15. En 2018, même si l'accès à la régulation téléphonique était également possible *via* le numéro national 116 117, chaque association libérale de la PDSA (SOS Médecins, Médecins à domicile et Médigarde) possédait son propre standard téléphonique.

Le CRRA du SAMU – Centre 15 du Val-de-Marne est situé à l'hôpital universitaire Henri Mondor (Créteil) et traite environ 500 000 appels par an, dont environ 200 000 passés sur les horaires de la PDSA, pour près de 100 000 dossiers de régulation médicale. Cette régulation est effectuée en interconnexion avec les trois autres standards des associations de PDSA. À ce jour et à notre connaissance, il n'existe pas de données relatives à la répartition du nombre d'appels traités par chacun des lieux de réception et de régulation téléphonique du département (CRRA ou standards libéraux). En 2018, comme dans toute l'Île-de-France, la régulation de la PDSA était maintenue 24 h/24 et 7 j/7.

La gestion de la liste de gardes des médecins régulateurs de la PDSA au sein du CRRA est de la responsabilité de l'ARPS 94¹⁷. L'effectif des régulateurs y est actuellement de 35 et permet d'assurer entre deux et trois lignes de régulation continue toute l'année (Annexe 2).

¹⁷ Association départementale des médecins pour le regroupement de la régulation médicale et de la permanence des soins ambulatoires dans le Val-de-Marne

1.3.3. L'effectation mobile

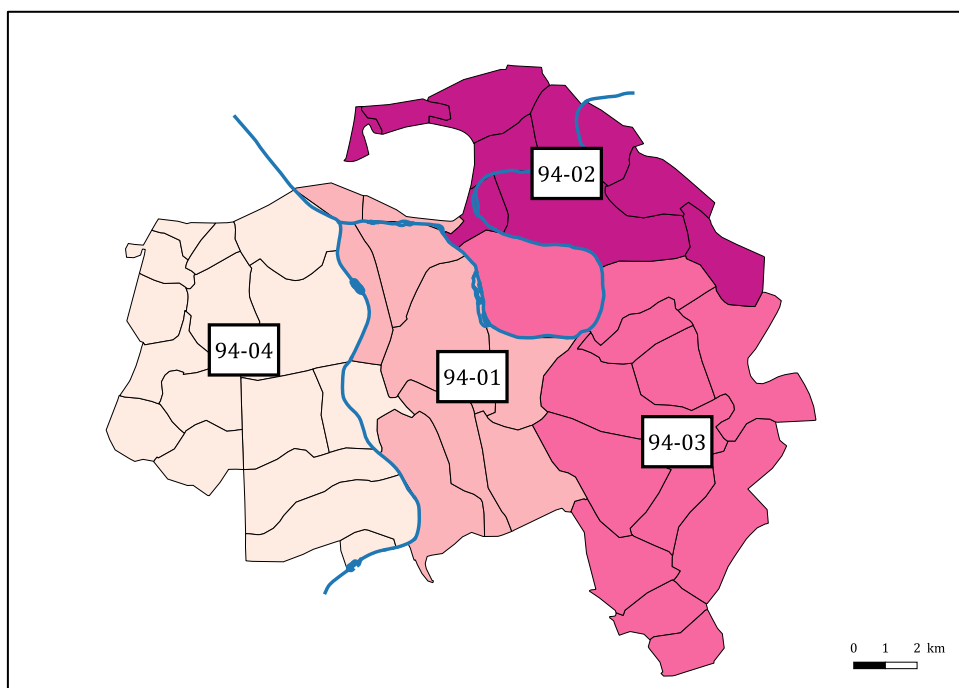
1.3.3.1. Territoires d'effectation

Au 1^{er} janvier 2018, le département comprenait quatre territoires communs aux effecteurs fixes et mobiles de la PDSA (Figure 4):

- 94-01 : Créteil, Saint-Maurice, Saint-Maur-des-Fossés
- 94-02 : Vincennes, Bry-sur-Marne, Champigny-sur-Marne
- 94-03 : Sucy-en-Brie, Limeil-Brévannes
- 94-04 : Choisy le Roi, Vitry, Chevilly-Larue, Villejuif

Le détail de la territorialisation est repris en Annexe 3. En nuit profonde, entre minuit et 5 heures, les secteurs d'effectation mobile fusionnent et passent de 4 à 3.

Figure 4. Les territoires d'effectation mobile de la PDSA dans le Val-de-Marne



Les effecteurs mobiles appartiennent à l'une des trois associations de PDSA du département (SOS Médecins, Médecins à domicile, Médigarde). Ils doivent se signaler par téléphone au CRRA au début et en fin de garde. Leur planning de garde est géré par l'ARPS 94.

1.3.4. L'effectation fixe

Les maisons médicales de garde sont appelées SAMI¹⁸ dans le Val-de-Marne. Elles sont au nombre de 12 et sont ouvertes en début de nuit en semaine (de 20h à minuit), et toute la journée les week-ends et jours fériés. Deux d'entre elles sont situées dans les enceintes d'hôpitaux publics (Bry-sur-Marne et Saint-Maurice).

Les SAMI couvrent tous les territoires d'effectation de la PDSA du Val-de-Marne. Leur accès est théoriquement conditionné par une régulation par le CRRA et ne peut en aucun cas être l'objet d'une prise de rendez-vous préalable. Pourtant, en 2017, seuls 18 % des actes pratiqués dans les SAMI du Val-de-Marne étaient précédés d'une régulation médicale téléphonique.

La synthèse de la répartition de l'ensemble des effecteurs de la PDSA du Val-de-Marne est illustrée en Annexe 4 et en Annexe 5.

1.3.5. Les taux de participation

Les taux de participation à la PDSA sont très variables sur le territoire français : dans certains départements, l'ensemble des médecins généralistes effectue des gardes, tandis que dans d'autres, comme à Paris, cette proportion est inférieure à 10 % (Annexe 6). Par ailleurs, la participation à la PDSA varie également au sein d'un même département selon les typologies : ainsi les zones urbaines sont-elles associées à des taux de participation plus élevés qu'en zones rurales.

Dans le Val-de-Marne, la participation des médecins généralistes aux activités de la PDSA, comprise entre 50 % et 67 %, est nettement plus élevée que dans le reste de l'Île-de-France (Annexe 6). Le taux de participation à l'effectation mobile, lui, y est incertain. Il est cependant suffisant pour assurer une couverture de tous les territoires d'effectation entre 20 heures et minuit, et de 50 à 75 % des territoires de minuit à 08 heures (Annexe 7).

¹⁸ Service d'accueil médical initial

2. LA PDSA, UN SYSTEME A FORTS ENJEUX

La PDSA est un système dont le potentiel théorique, tant du point de vue de l'égalité d'accès aux soins, de leur qualité, de l'impact sur l'état des urgences hospitalières ou sur celui des finances publiques, semble majeur. Le contexte actuel et à venir de la PDSA explique l'intérêt de mener des travaux en vue de son amélioration.

2.1. Un système fragile depuis sa création

Avant 2001, les médecins généralistes étaient seuls soumis à l'obligation de garde par le code de déontologie médicale. Après un conflit social intense ayant mené à la grève des gardes et puisant sa source dans la très forte augmentation de la demande de soins ainsi que dans les nombreuses inégalités alors ressenties par les médecins généralistes (gardes obligatoires non rémunérées, variabilité de la démographie médicale, autres spécialités non concernées), la PDSA fut créée, d'abord par décret puis par la loi de financement de la sécurité sociale pour 2003 (16). Plusieurs modifications et campagnes de déclinaison territoriale du dispositif ont eu lieu jusqu'à ce jour, témoignant de son instabilité et de sa fragilité.

Dans son dernier rapport sur la PDSA, le CNOM s'est dit être « préoccupé » au sujet de l'avenir de ce système en raison de plusieurs facteurs organisationnels, dont (4) :

- l'érosion du volontariat et la diminution du taux d'effectif mobile
- le vieillissement de la population médicale
- l'exode rural et la désertification de certains territoires
- les rémunérations de garde jugées insuffisantes
- les variations de contenu des cahiers des charges locaux
- l'absence de communication large sur le dispositif de la PDSA

D'autres facteurs, d'ordre sociétal et démographique, participent à la fragilisation de la PDSA :

- le vieillissement de la population (patients fragiles)
- l'augmentation des pathologies chroniques
- une consommation de soins croissante
- le nomadisme médical

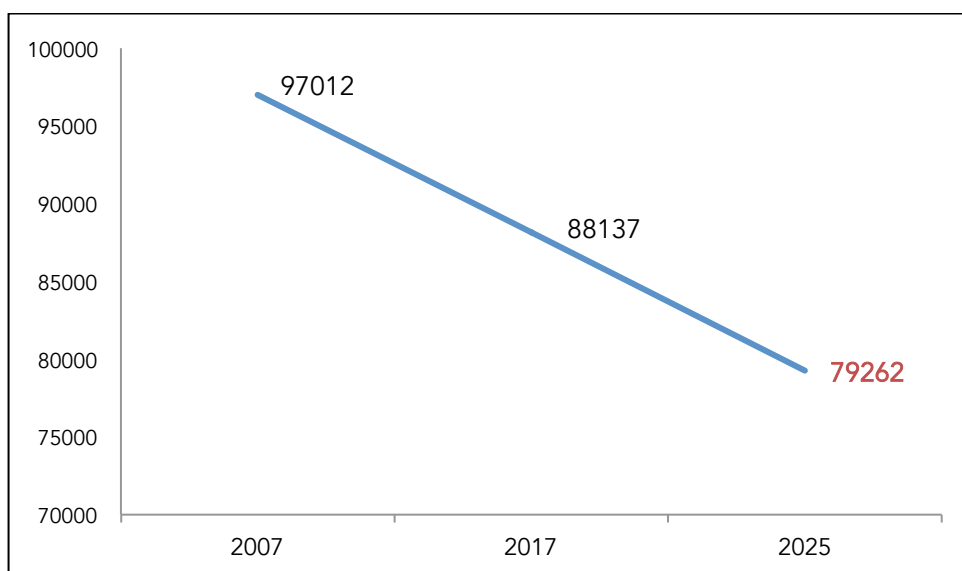
De plus, le CNOM s'est attaché à analyser les facteurs d'attractivité de la PDSA afin « d'entamer une réflexion générale ». Ces données semblent corroborées par de nombreux autres rapports et études, qu'ils soient spécifiques à la PDSA ou simplement tournés vers l'état de la médecine générale ou libérale au sens large.

Enfin, l'organisation et l'efficacité de la PDSA semblent directement liées aux caractéristiques de la population générale ainsi qu'aux structures d'aval, telles que les urgences hospitalières.

2.1.1. Baisse des effectifs

Entre 2007 et 2017, d'après l'atlas de la démographie médicale établi par le CNOM, les effectifs nationaux de médecins généralistes ont diminué de 9 % (17). Cette diminution devrait se prolonger au moins jusqu'en 2025, pour atteindre près de 20 % depuis 2007 (Figure 5).

Figure 5. Évolution des effectifs nationaux de médecins généralistes (prévisions à l'horizon 2025)



Cette variation est hétérogène sur le territoire national et davantage marquée en Île-de-France, où elle atteint déjà plus de 15 % (Annexe 8). Le Val-de-Marne est le neuvième département le plus atteint par la diminution des effectifs de médecins généralistes depuis 2007 (-21 %). En Île-de-France, seuls Paris (-25 %) et les Yvelines (-23 %) le devancent.

La diminution puis l'inversion de la pente ne devraient pas survenir avant 2030 (avec un bilan nul, entre les nouveaux inscrits et les départs à la retraite, en 2020) (18) (Annexe 11).

2.1.2. Erosion du volontariat

2.1.2.1. Type d'exercice et choix de carrière

La nouvelle génération de médecins libéraux, dont les généralistes, privilégient désormais l'activité salariale, l'activité groupée ou mixte, permettant un meilleur compromis entre vie privée et vie professionnelle avec une charge de travail moindre : en 2014, le CNOM rapportait que la majorité des nouveaux inscrits exerçait en tant que remplaçants (42 %, dont 64 % en activité régulière) ou en tant que salariés (33 %). Seuls 20 % faisaient le choix de l'installation libérale exclusive (19). Ces chiffres contrastaient avec ceux des inscrits de 2007 qui, dix ans plus tard, étaient majoritairement libéraux (65 %).

Dans son enquête réalisée par TNS-Sofres en 2013, le SIHP¹⁹ rapportait que parmi les 1599 jeunes médecins répondeurs, tous internes, la majorité désirait surtout exercer à l'hôpital ou dans un établissement public de santé (50 %), contre 35 % en libéral ou en structure privée. Les internes en médecine générale, toutefois, s'orientaient préférentiellement vers une activité libérale ou en établissement privé de santé (59 %). Ces données semblent confirmées par celles du CNOM qui, dans son rapport comparatif 2007/2017, avance une augmentation de 10 % à la fois des effectifs salariés et de ceux à activité mixte (19). Ainsi, 64 % des jeunes médecins choisissent l'exercice salarié et 21 % celui de remplaçant, ne laissant plus que 12 % d'installations en secteur libéral ou mixte.

Pour les internes interrogés par TNS-Sofres, les critères très importants ou extrêmement importants à prendre en compte pour les futurs choix de carrière étaient l'équilibre vie professionnelle – vie privée (86 %), le travail en équipe (74 %) dans une ambiance agréable (86 %), avec un volume horaire hebdomadaire inférieur à 50 heures (71%) (20).

Après avoir fini leur internat, seuls 37 % des répondants pensaient garder une activité de nuit et 58 % souhaitaient travailler du lundi au vendredi. Parmi ceux ne le souhaitant pas, 99 % espéraient travailler seulement trois ou quatre jours par semaine.

Enfin, 66 % des répondants se déclaraient prêts à abandonner leur carrière médicale en raison d'une surcharge de travail ou d'un stress important, d'une coercition d'installation ou d'une meilleure opportunité de concilier vie privée – vie professionnelle.

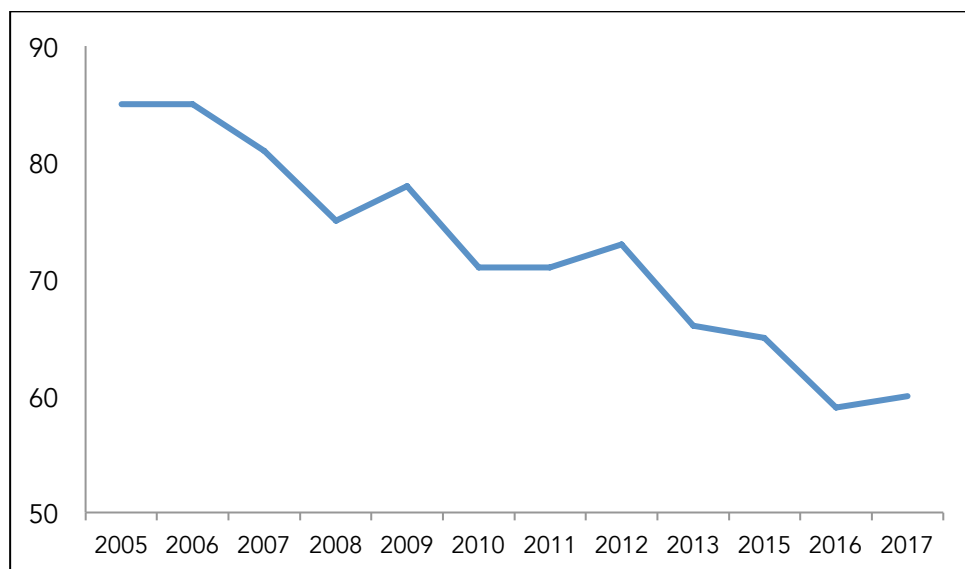
Ces données illustrent la baisse d'un volontariat pour un exercice comme celui de la PDSA, une activité exigeante, soumises à de fortes contraintes organisationnelles et au maintien d'un planning de gardes (nuits, week-ends et jours fériés).

¹⁹ Syndicat des internes des hôpitaux de Paris

2.1.2.2. Une participation à la PDSA en chute libre

Le taux de participation des médecins généralistes à la PDSA est donc en baisse constante et importante depuis 2005. En 2017, il n'était supérieur à 60 % que dans moins de deux tiers des départements français (60%, contre 73 % des départements en 2012) (4,21) (Figure 6 et Annexe 6).

Figure 6. Évolution annuelle (2005-2017) de la proportion de départements où la part de médecins généralistes participant à la PDSA est supérieure à 60 %



La régulation semble être la part de la PDSA la moins affectée par l'érosion du volontariat. En effet, le nombre de médecins régulateurs diminue peu à l'échelle nationale, sauf en nuit profonde (-8 % en 2017 par rapport à 2016). Leur effectif était, au 31 Décembre 2017, de 2572 (contre 2666 en 2016), soit 5 % des médecins généralistes ayant une activité régulière.

Toutefois, le nombre de départements non couverts par une régulation PDSA en nuit profonde est passé de trente-deux à trente-six entre 2016 et 2017, soit par décision des ARS (activité insuffisante) soit par retrait des médecins eux-mêmes, en vue d'un éventuel renfort aux plages problématiques (samedi matin, jours fériés).

Le taux de participation à l'effectif fixe ou mobile est mal connu et très variable. Dans les zones hyper urbaines, le taux de participation à l'effectif est à interpréter en fonction du niveau de professionnalisation des effecteurs : dans certaines villes, l'effectif est entièrement à la charge des associations libérales de type SOS Médecins.

En 2016, 7 % des territoires d'effectif de la PDSA étaient dépourvus d'effecteurs (sur 1579). Depuis 2003, le nombre de territoires d'effectif a diminué de 60 %, en raison d'une diminution de la participation des médecins, d'une activité faible en nuit profonde ou une stratégie d'économie de la santé.

2.1.3. Le vieillissement de la population médicale

Entre 2007 et 2017, les médecins français inscrits au tableau ont vieilli : en 2017, 47 % d'entre eux avaient plus de 60 ans (contre 27 % en 2007), seuls 15 % avaient moins de 40 ans (13 % en 2007) et 26 % étaient retraités (19). La pyramide des âges est ainsi jugée « préoccupante » par le CNOM, en ce qu'elle traduit l'augmentation des effectifs âgés et la diminution des effectifs d'âge moyen (Annexe 9). Par ailleurs, la part des médecins retraités ayant gardé une activité a progressé de 93 % en dix ans (Annexe 10). Ces médecins retraités participent probablement moins à une activité contraignante telle que la PDSA.

La pyramide des âges devrait cependant rajeunir à l'horizon 2030 : selon certaines prévisions, et ce dès 2025, la population médicale totale sera majoritairement composée de médecins âgés de moins de 45 ans, avec un âge moyen de 44,5 ans en 2030 (contre 50,2 en 2012) (18).

2.1.4. L'exode rural et la désertification des territoires

En raison de nombreux facteurs, dont l'évolution de la démographie médicale et les aspirations des jeunes médecins généralistes, désirant s'installer avant tout dans des structures regroupées et pluridisciplinaires au sein de territoires offrant une bonne qualité de vie (cf. 2.1.2.1, p.28) (22), l'accès aux soins primaires est de plus en plus difficile pour une part grandissante de la population française.

Ces difficultés d'accès aux soins s'accroissent continuellement et touchent principalement les territoires ruraux entourant les grands pôles d'activité, et les communes hors influence desdits pôles. Ainsi, plus de 20 % des habitants de ces territoires résident dans des communes souffrant d'une faible densité médicale (23) (proportion dépassant 30 % dans les couronnes rurales des grands pôles). De plus, en raison de la concentration centripète de l'offre de soins primaires dans les grands pôles, ces difficultés d'accès aux soins primaires touchent également fréquemment les habitants des pôles urbains eux-mêmes (25 % en région parisienne).

L'évolution semble être à l'accroissement de cette tendance : entre 2012 et 2015, l'indicateur APL²⁰, établi par la DREES²¹ et l'Irdes²², montre une augmentation de la proportion des communes dites « sous-denses » (en termes d'accessibilité au médecin généraliste) de 7,8 % à

²⁰ Accessibilité potentielle délocalisée. Indicateur synthétique permettant de tenir compte de la proximité et de la disponibilité des médecins. Présenté comme plus fin que les indicateurs traditionnels (densité médicale ou temps d'accès), en ce qu'il intègre notamment une estimation de l'activité des médecins ainsi que les besoins de la population locale. Il est exprimé en nombre annuel de consultations par habitant. Le seuil retenu d'accessibilité diminuée aux soins est de 2,5 C/hab/an.

²¹ Direction de la recherche, de l'évaluation, des études et des statistiques

²² Institut de recherche et documentation en économie de la santé

8,6 % sur l'ensemble du pays (1,9 % à 2,2 % en Île-de-France). La DREES prédit également que les communes sous-denses connaîtront probablement davantage de départs de médecins généralistes que les autres (24).

2.1.5. Une population davantage consommatrice de soins

En parallèle des difficultés structurelles et de la diminution de l'offre de soins, plusieurs facteurs liés à la population elle-même concourent à l'accroissement des dysfonctionnements de la PDSA, tels que son vieillissement, ses habitudes de consommation de soins et l'augmentation de la prévalence des pathologies chroniques.

2.1.5.1. Une population âgée plus nombreuse

L'INSEE estime qu'en 2060, un tiers de la population française aura plus de soixante ans (25). Entre 2020 et 2060, la frange la plus âgée (75 ans et plus) augmenterait le plus fortement, passant de 9 millions à plus de 16 millions (+150 %). Bien que la pyramide des âges devrait s'équilibrer, avec une augmentation de la frange âgée de moins de 20 ans, le nombre absolu de personnes âgées de 60 ans et plus sera très élevé (23,6 millions d'habitants, soit une augmentation de 83 % entre 2007 et 2060). Il augmentera fortement jusqu'en 2035 pour ralentir ensuite.

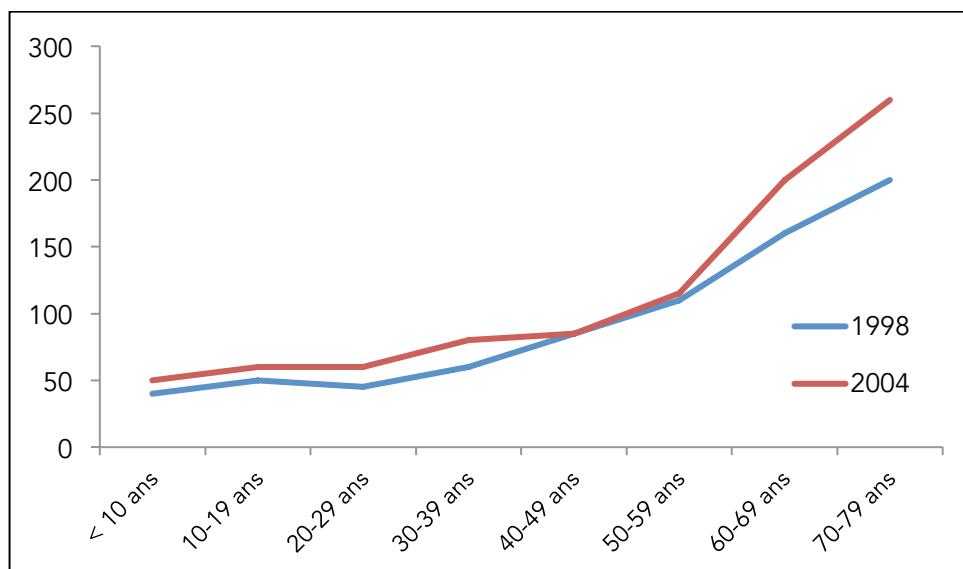
2.1.5.2. Une consommation de soins toujours plus grande

La population âgée est la principale consommatrice de soins, puisqu'on estime que 45 % des dépenses de santé concernent les patients de plus de 60 ans (26) (dont 17 % pour la seule population des plus de 80 ans). Ainsi, en 2004, le montant des dépenses de santé annuelles des patients de moins de 50 ans était de 1860 €, tandis que ces dernières s'élevaient à plus de 7000 € pour la population âgée de plus de 80 ans (Annexe 12).

La part des dépenses de soins en ville augmente constamment jusqu'à 70 ans, âge auquel la bascule se fait vers l'hôpital, sauf pour les dépenses liées aux consultations et actes réalisés par les médecins généralistes, les infirmiers.ères et les kinésithérapeutes (27). Pour l'INSEE, dès 2003, avant même l'instauration du parcours de soins faisant du médecin généraliste le coordonnateur de la prise en charge des patients, ces données traduisaient déjà le fait qu'au-delà de 60 ans, le premier recours aux soins se faisait principalement par le médecin généraliste (28).

Enfin, la nouvelle génération de personnes âgées de 60 ans et plus consommait davantage de soins en 2004 que la même population en 1998 (29). Elle représente la frange de la population au sein de laquelle la consommation de soins a le plus fortement augmenté (Figure 7).

Figure 7. Dépenses annuelles de santé (en millions d'euros) par tranche d'âge (1998-2004)²³



2.1.5.3. Des pathologies chroniques plus fréquentes, une population moins dépendante mais plus consommatrice de soins

L'une des explications à cette augmentation de la consommation de soins par les patients les plus âgés pourrait être l'altération de leur état de santé : on peut supposer qu'en vieillissant, la population devienne plus malade. Or, sur le plan physique, la population âgée est de moins en moins dépendante : les taux de limitations fonctionnelles, d'incapacité légère (réduction des activités de la vie quotidienne) et sévère (confinement à domicile, alitement) sont inférieurs à ceux datant du début des années 1990. Et ce, même si la prévalence des maladies chroniques a fortement augmenté, qu'elles soient cardio-vasculaires ou neurologiques (démences dégénératives) (30). La population vieillit, est plus malade mais moins limitée : elle semble mieux soignée qu'avant (31).

Cette apparente contradiction peut être expliquée par le fait que les indicateurs de morbidité d'une population ne suffisent pas à expliquer l'augmentation de la consommation de soins des personnes âgées. Cette dernière puise très probablement sa source dans les modifications sociétales de la demande d'accès aux soins à état de santé donné, particulièrement par l'accroissement de la consommation de soins par les personnes les moins malades supérieur à celles en mauvaise santé (32,33).

²³ Données InVS (institut national de veille sanitaire) (29)

2.1.6. Une demande de soins croissante et impatiente

Les pratiques de consommation de soins se sont récemment fortement modifiées à l'échelle de la population, et semblent liées à la conjoncture de plusieurs facteurs : 1) les progrès scientifiques, techniques et médicaux permettant une prise en charge plus précoce, plus adaptée et plus efficace, 2) la diffusion de l'information médicale, touchant un large public, et l'accès facilité à cette dernière 3) l'importance portée par la population, toujours plus urbaine et qualifiée, à son état de santé (34), 4) l'immédiateté de l'information, du service et du bénéfice, telle que favorisée par l'explosion des technologies connectées (internet, téléphones portables etc.), 5) les pratiques de consommation au sens général, avec intolérance à l'attente (explosion du commerce en ligne et des livraisons à domicile), exigence de retour et d'échange des marchandises insatisfaisantes, notation des prestations etc. Les patients ne veulent plus attendre pour accéder aux soins ou aux conseils médicaux (5,35). Le développement de solutions de type marchand, ou « ubérisation » de la médecine, tirées du modèle économique répandu par la société de transports Uber, témoigne de cette tendance à l'impatience et à la demande d'accessibilité constante aux soins (36) : une *startup* teste actuellement une application de téléphonie mobile pour « commander un médecin généraliste 7j/7, 24h/24 », en Île-de-France (37) (ou « comme un taxi » (38)).

Ces pratiques sont illustrées par les données de l'URPS-IDF²⁴, qui a montré, dans une enquête datant de Juin 2015, que les patients qui sollicitent les médecins généralistes pour une consultation non programmée (hors PDSA) n'honorent pas leur rendez-vous, contactent simultanément plusieurs praticiens afin d'obtenir le meilleur horaire ou sollicitent spontanément leur médecin pour une consultation ou un avis téléphonique auto-caractérisés d'urgents (39,40).

2.1.7. La riposte insuffisante des médecins généralistes

En réponse à cette modification des pratiques de consommation du soin, les médecins libéraux ayant répondu à l'enquête de l'URPS-IDF déclaraient tous avoir modifié leur organisation et être capables de répondre à la demande dans les 72h (40 % dans les 24h). Les médecins généralistes et les pédiatres répondaient le plus souvent dans les 24h (65 % des généralistes et 56 % des pédiatres). Parmi les 46 % de médecins aménageant des plages d'urgence, 42 % recevaient des patients supplémentaires en-dehors de ces plages. En cas d'incapacité à assurer le rendez-vous, 54 % des praticiens proposaient un conseil médical téléphonique associé à la prise de rendez-vous ultérieur, 29 % orientaient leurs patients vers un confrère de même spécialité et 17 % redirigeaient les appels vers un centre de régulation téléphonique (du type SAMU-Centre 15).

²⁴ Union régionale des professionnels de santé Île-de-France

Pourtant, malgré ces mesures, la réorganisation opérationnelle des médecins libéraux entraîne l'aggravation des difficultés d'accès aux soins non programmés, puisque 49 % d'entre eux ont mis en place de la surréservation, elle-même certainement partie prenante d'un encombrement de l'accès aux soins, notamment aux horaires à forte demande, et d'un renforcement des pratiques de nomadisme médical.

2.1.8. L'augmentation du recours à la PDSA comme conséquence

En 2004, la DREES estimait que 12 % des consultations annuelles en médecine de ville (soit 35 millions) n'étaient pas programmées. Plus de la moitié des patients interrogés en 2015 par l'institut de sondage BVA déclaraient avoir rencontré des difficultés pour prendre un rendez-vous en médecine de ville (55 %), dont la majorité pour des raisons de délais : près de deux tiers de la demande de soins non programmés attend une réponse dans la semaine (notamment lors de deux pics, entre 10-11h et 19-20h) (41). De plus, d'après l'enquête de l'URPS-IDF citée en 2.1.6 (p.33), 97 % des praticiens interrogés rapportaient que cette demande se concentrait entre 18h et 20h (42). Il semble donc exister un goulot d'étranglement pour l'accès aux soins non programmés, qui sont, de fait, basculés vers les effecteurs de la PDSA, qu'ils soient hospitaliers ou pas (Annexe 13).

2.1.8.1. Le recours aux urgences hospitalières

Cette tendance est confirmée par les données de fréquentation des urgences, tirées de l'enquête nationale sur les usagers des services d'urgence réalisée par la DREES en 2002 (43) : seuls 16 % des patients étaient adressés aux urgences par leur médecin (31 % chez les plus de 70 ans (44)), tandis que 19 % y avaient été envoyés sans qu'on leur demande leur avis. Parmi les autres, 38 % estimaient que leur problème devait être réglé rapidement pour des raisons personnelles et 47 % consultaient à l'hôpital en raison de sa proximité. Seuls 32 % des patients pensaient que leur condition était grave et qu'elle nécessitait peut-être une hospitalisation. L'urgence ressentie était encore davantage marquée chez les parents d'enfants en bas âge (42 %). 31 % des usagers avaient recours aux urgences afin de bénéficier d'une expertise, du plateau technique ou d'un examen complémentaire. Par ailleurs, 17 % des patients déclaraient consulter aux urgences en raison de l'absence ou de l'indisponibilité de leur médecin traitant.

Enfin, le nombre de passages aux urgences augmente constamment depuis vingt ans (+42 % depuis 2002) (45).

2.1.8.2. Le recours aux effecteurs non hospitaliers de la PDSA

La demande non programmée de soins primaires extrahospitaliers (hors interventions de secours), aux horaires de la PDSA, est peu renseignée mais semble importante (hors nuit

profonde, certaines études rapportant un taux de seulement 0,5 actes pour 100 000 habitants entre minuit et 07h) (46). D'après SOS Médecins, elle aurait augmenté de 35 % depuis 2013 (45).

2.2. Les enjeux de la PDSA

La PDSA possède ainsi de forts enjeux. Sa pérennité semble essentielle au maintien d'un haut niveau d'accès aux soins pour la population, tant sur le plan qualitatif que quantitatif, et, comme nous le verrons au [chapitre 4 \(p.47\)](#), constitue un objectif majeur pour de nombreuses institutions politiques et professionnelles.

Par exemple, le cahier des charges de l'ARS-IDF précise en 2018 plusieurs principes d'organisation de la PDSA, tels que la promotion et l'évaluation d'une régulation médicale de qualité, ainsi que le regroupement unique de la régulation médicale dans les CRRA des SAMU-Centre 15. En ce qui concerne l'effectif mobile, au-delà des mesures visant à l'incitation des médecins à participer à la PDSA, l'ARS-IDF insiste sur l'accroissement nécessaire du niveau d'exigence auprès des effecteurs (réduction des délais de prise en charge, amélioration du service rendu).

Ces enjeux, détaillés ci-après, sont la justification du cœur de notre travail.

2.2.1. Une meilleure offre de soins

Pour les raisons citées précédemment (cf. [2.1.6](#), [2.1.7](#) et [2.1.8](#)), les patients échappent de plus en plus au parcours de soins structuré, qui concourt à la juste coordination de leur prise en charge globale, notamment le suivi des maladies chroniques ([47–49](#)). De ce fait, la qualité de prise en charge globale des patients est sous-optimale en soins primaires, hors PDSA ([50](#)).

En ce qui concerne les actes de PDSA, l'amélioration du système pourrait tendre à un niveau de soins plus juste (meilleure couverture des territoires d'effectif, réduction des inégalités sociales de soins, désengorgement des services d'urgence) et à des économies de santé (réduction de la consommation des vecteurs de transport, des passages et des hospitalisations induits aux urgences).

2.2.1.1. Une plus grande égalité d'accès aux soins

La réduction des inégalités sociales, notamment en santé, représente un objectif majeur dans les pays industrialisés. En France, le HCSP²⁵ en a fait une priorité, en raison du lien étroit (et « injuste ») entre niveau socio-économique et niveau de santé (différence de 7 ans d'espérance de vie à 35 ans entre un cadre et un ouvrier, augmentation du risque de maladies cardiovasculaires, de comportements addictifs ou de maladies mentales) ([51–55](#)).

²⁵ Le haut conseil de santé publique

Le HCSP a édicté plusieurs propositions visant à réduire les inégalités sociales de santé. Parmi elles figurent l'amélioration de l'accès aux soins primaires (programmés ou non), tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif (délais d'accès), ainsi que la participation active des médecins généralistes à un traitement plus égalitaire de la population.

Par exemple, la fermeture constante des territoires d'effectif en nuit profonde (-11 % depuis 2016, soit 67 % des territoires nationaux d'après SUDF²⁶), en raison de la diminution des effectifs de médecins sur cette plage horaire au niveau national, illustre les inégalités territoriales (donc sociales) d'accès aux soins primaires non programmés (cf. 2.1.2.2 et 2.1.4) (4,5).

2.2.1.2. Un désengorgement des services d'urgence

Malgré de nombreuses campagnes de communication et les rappels réguliers à la population (56), le nombre de consultations annuelles aux urgences est passé de 7 millions en 1990 à 20 millions en 2015 (+300 %), sans augmentation de la proportion d'hospitalisations en découlant (20 %). Après évaluation clinique des patients, seuls 10 % des motifs sont finalement retenus comme urgents et 5 % correspondent à des urgences vitales. Reprenant les chiffres avancés par la DREES, le rapport Mesnier (cf. 4.6, p.49) stipule qu'en 2017, 43 % des 20 millions de passages annuels aux urgences en France relèveraient de la médecine ambulatoire (57). De plus, on estime que les consultations itératives abusives sont responsables de près de 30 % des passages aux urgences (58).

Or, le mésusage ou l'engorgement des SAU a plusieurs conséquences. D'une part, les coûts de santé publique engendrés par le mésusage des SAU sont très importants (cf. 2.2.1.3) et conduisent parfois à l'évocation d'une réponse punitive de la part des autorités publiques (non-remboursement des consultations pour motif non-urgent ou abusif) (59) menaçant l'équité de l'accès aux soins non programmés. Ces solutions sont combattues par les organisations professionnelles, devant l'absence de spécificité des motifs de consultation et l'impossibilité de prédire, dès l'inscription à l'accueil des urgences, l'évolution vers un diagnostic urgent ou non (60).

D'autre part, le mésusage des SAU semble altérer leur efficacité, donc la qualité des soins prodigués ainsi que la sécurité du patient : augmentation des interruptions de tâches et surcharge cognitive du personnel, augmentation du travail multitâches, diminution de la qualité de l'information donnée aux patients et à leur entourage, augmentation du taux d'erreurs médicales, retard au diagnostic ou au traitement, et altération du pronostic clinique dans certaines pathologies urgentes (58,61-65).

²⁶ SAMU-Urgences de France

Enfin, la part croissante des consultations ne relevant pas de la médecine d'urgence hospitalière semble directement influencer sur la perception qu'ont les personnels des urgences sur la qualité et la sécurité de leur travail (63), ainsi que sur leur motivation et leur qualité de vie : plus de 60 % du personnel des urgences s'estime en surmenage ou en présente des signes (66–68).

Pour toutes ces raisons, les responsables publics ainsi que les représentants professionnels insistent sur la meilleure articulation des soins primaires, une bonne coordination ville-hôpital et l'amélioration de l'efficacité de la PDS.

2.2.1.3. Pour un meilleur contrôle budgétaire

Entre 2005 et 2011, les dépenses annuelles liées à la PDSA ont augmenté de 300 à 393 millions d'euros (+ 30 %) pour la seule partie médicale, et de 473 à 629 millions d'euros en comptabilisant les services de garde et d'urgence des pharmacies ainsi que les gardes de transport sanitaire (+ 30%). Il est à noter que ces chiffres, rapportés par la cour des comptes en 2013, n'incluaient pas les dépenses résultant de la participation des urgences à la PDSA (69).

Par la suite, la cour des comptes estimait en 2017 que les coûts générés par des consultations indues aux urgences étaient compris en 654 millions et 1,2 milliards d'euros, et qu'ils étaient très supérieurs à ceux de prise en charge par la médecine libérale, compris entre 434 et 800 millions d'euros (70). De son côté, la DGOS²⁷ estime que la réorientation des consultations indues aux urgences vers la médecine libérale pourrait mener à une économie de l'ordre de 50 millions d'euros (71).

Ces montants restent cependant discutés en raison du manque de données robustes et généralisables.

²⁷ Direction générale de l'offre de santé

3. L'EFFECTION MOBILE DE LA PDSA : PRINCIPES ET RELATIONS AVEC LE SAMU-CENTRE 15

L'effection mobile de la PDSA répond à des besoins précis et a pour objectifs principaux de limiter le déplacement des patients les plus fragiles, ainsi que l'engagement de moyens inadaptés et les dépenses y afférant.

Sa relation organisationnelle et opérationnelle avec le SAMU – Centre 15 est encadrée par la loi et, bien qu'elle varie en fonction des territoires, répond aux mêmes grands principes : accès conditionné par la régulation médicale, et centralisation des appels et/ou interconnexion des plateformes téléphoniques.

3.1. Le SAMU-Centre 15

3.1.1. Cadre légal et missions

Le SAMU-Centre 15 est un service hospitalier dont les missions, définies par la loi, sont de répondre par des moyens médicaux aux situations d'urgence. C'est une mission de service public visant à garantir l'égalité d'accès aux soins pour tous et en tout point du territoire²⁸ (5).

Il a pour objectifs :

- d'assurer une écoute téléphonique continue, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7
- de déterminer et de déclencher la réponse la plus adaptée dans les meilleurs délais
- de s'assurer de la disponibilité des moyens d'hospitalisation adaptés à l'état du patient
- d'organiser, le cas échéant, le transport du patient et son accueil hospitalier

Le SAMU participe également à l'élaboration des plans de secours et à la prise en charge des situations sanitaires exceptionnelles, ainsi qu'à la formation initiale et continue des acteurs de santé au sein des CESU²⁹.

Le SAMU dispose d'un CRRA accessible par un numéro unique national, le 15 : c'est le SAMU-Centre 15, lui-même interconnecté avec les services de police et d'incendie et de secours.

²⁸ Loi n°2009-879 du 21 juillet 2009 relative à l'aide médicale urgente et aux transports sanitaires

²⁹ Centres d'enseignement des soins d'urgence. Encadrés par décret (n°2012-565 du 24 avril 2012), ils organisent des formations spécifiques pour chaque acteur en santé (72).

Les réponses apportées par le SAMU-Centre 15 peuvent être :

- un conseil médical ou une prescription téléphonique, sans mise en œuvre de moyens
- un conseil de consultation du médecin traitant
- le recours aux effecteurs de la PDSA (mobiles ou fixes, y compris les urgences hospitalières)
- l'envoi d'un moyen de transport sanitaire (de type ambulance privée) pour transfert aux urgences hospitalières
- l'envoi d'un moyen de secours (pompiers ou associatifs de type croix rouge)
- l'envoi d'un moyen médical d'urgence et de réanimation : les SMUR³⁰ ou les ambulances de réanimation des pompiers

3.1.2. Organisation

Le SAMU-Centre 15 est le plus souvent situé dans un hôpital public, parfois dans une plateforme commune aux différents services de secours (pompiers, police).

Schématiquement, chaque département possède son propre SAMU-Centre 15, responsable de l'organisation territorialisée de l'aide médicale urgente : sur 102 SAMU-Centres 15 français, un seul CRRA possède une emprise régionale (Doubs), et trois départements disposent de plus d'un CRRA.

Les SMUR, eux, sont au nombre de 428 (pour 700 équipes médicales) et sont répartis dans 234 hôpitaux habilités. Le maillage territorial vise à réduire les délais de réponse et d'arrivée auprès du patient (appelé « l'intervalle libre médical »), dont les autorités publiques ont fixé le plafond à 30 minutes.

Dans certaines zones situées à plus de 30 minutes de l'arrivée d'un SMUR, des médecins correspondants du SAMU (MCS) prodiguent les premiers soins en attendant l'arrivée de l'équipe spécialisée (cf. 1.2.2.3.4, p.18).

3.1.3. De l'appel du patient à la visite du MPDSA : un circuit codifié

Le circuit d'un appel pour problème de santé traité par un CRRA est défini par un ensemble de recommandations professionnelles (2,5,73).

³⁰ Services mobiles d'urgence et de réanimation. Leurs missions sont d'assurer la prise en charge des patients dont l'état requiert une prise en charge médicale et de réanimation, et leur transport vers un établissement de santé, ou d'assurer leur transfert entre deux établissements de santé (article R6123-15 du CSP).

L'appel est d'abord décroché par un(e) assistant(e) de régulation médicale (ARM) dont les rôles sont la prise de renseignements indispensables au traitement de l'appel (identification et localisation du patient, motif d'appel), l'aide aux gestes urgents si nécessaires (compression de plaie, mise en sécurité, massage cardiaque etc.) et l'envoi de moyens de secours, dits « départs réflexes », avant l'acte de régulation médicale (accidents graves, arrêts cardiaques, malaises graves etc.)

Ensuite, en fonction du motif d'appel et de l'état du patient tel qu'initialement établi par l'ARM, l'appel est transféré au médecin régulateur appartenant soit à l'aide médicale urgente (AMU), à la régulation libérale de la PDS (médecin généraliste). Dans l'idéal, les deux types de régulations médicales sont situés dans les mêmes locaux afin de favoriser les échanges directs entre régulateurs.

Le médecin régulateur, sur la base des éléments recueillis au cours de l'interrogatoire du patient ou du témoin, décide de la réponse la plus appropriée à la situation (cf. 3.1.1, p.38.). Il s'assure secondairement du suivi de la prise en charge, grâce à la réception de bilans par les effecteurs missionnés ou au rappel des patients ayant bénéficié d'un conseil simple.

3.1.4. Critères d'évaluation

Les recommandations professionnelles ont émis, de façon non limitative, plusieurs critères d'évaluation des pratiques visant à couvrir le processus de régulation dans son entièreté. Ces critères concernent tous les types d'appels et tous les modes de réponse de la part du SAMU-Centre 15. L'évaluation doit être régulière, principalement *via* le réexamen des dossiers de régulation médicale, et doit reposer sur des indicateurs précis que nous détaillons ci-après, y compris ceux plus spécifiques à la PDSA (dont l'effecteur mobile).

3.1.4.1. Les performances opérationnelles

Les performances opérationnelles du SAMU-Centre 15 illustrent le fonctionnement de ce dernier. Les critères préconisés pour leur évaluation sont nombreux.

3.1.4.1.1. Les critères téléphoniques

Ce sont les critères de fonctionnement de l'activité téléphonique : temps de réponse (de décroché) et d'attente, intervalles entre appel et décision médicale, appel et activation de l'effecteur, taux de charge (rapport temps de communication sur temps de présence effective), taux d'accueil (rapport nombre d'appels répondus sur nombre d'appels reçus réduit des appels raccrochés en moins de 15 secondes), qualité de service (proportion d'appels décrochés en un temps donné), productivité (nombre d'appels traités par heure par un agent).

3.1.4.1.2. Les critères d'activité

Ce sont les critères décrivant l'activité opérationnelle des SAMU-Centres 15 : nombre de dossiers de régulation médicale et type de régulation associée, nombre et types de décisions, nombre de suivi d'appels, orientation des patients, typologie d'activité (motifs d'appels, d'intervention, pathologies « traceuses » (AC³¹, AVC³², traumatisme grave, douleur thoracique etc.), événements indésirables graves.

3.1.4.2. Le service rendu à la population

Plusieurs indicateurs de qualité sont retenus, dont tous les axes sont applicables à la PDSA : pertinence de l'acte de régulation médicale et de la décision en découlant, service rendu aux patients, service rendu aux partenaires et service rendu à la collectivité (3).

3.1.4.3. Les délais d'intervention

Les délais d'intervention de tout effecteur missionné par le CRRA doivent être précisés lors du déclenchement. Ceci est également vrai pour les MPDSA, qui doivent s'entendre avec le médecin régulateur au sujet d'un délai cible, adapté au motif de visite et aux contraintes liées au patient (terrain, antécédents, état au moment de l'appel etc.) (14). Il est demandé aux effecteurs d'informer le CRRA de la prise en charge du patient et des délais associés.

L'objectif temporel de prise en charge des patients est une des missions du SAMU – Centre 15, telles que reprises au chapitre 3.1.1 (« déclencher la réponse la plus adaptée dans les meilleurs délais »), et s'applique donc légalement aux effecteurs mobiles que sont les MPDSA.

3.1.4.4. Le nombre de patients vus

Le nombre de patients vus par unité de temps est un indicateur d'évaluation du service rendu à la population par l'ARS-IDF dans son cahier des charges annuel. En ce qui concerne l'effectif mobile des MPDSA, il est réparti en :

- nombre total de visites effectuées (et répartition horaire et géographique)
- nombre de visites effectuées à la demande du CRRA
- typologie des visites effectuées (âge, motif)
- nombre de visites suivies d'un transfert vers les urgences
- nombre de visites pour certificat de décès

³¹ Arrêt cardiaque

³² Accident vasculaire cérébral

3.2. L'effection mobile

3.2.1. Principes et généralités

Comme précisé au paragraphe 1.2.2.3.3, l'effection mobile est la réalisation de visites dites « incompressibles », au domicile des patients, par des médecins mobiles (MPDSA). Le CNOM définit ces visites comme suit :

- elles ne peuvent être différées aux horaires d'ouverture des cabinets libéraux
- elles se répartissent en visites immédiate avec priorité, et en visites à délai usuel
- elles concernent des patients dans l'impossibilité de se déplacer en raison de leur état de santé (tel qu'évalué par le médecin régulateur), ou des patients pour lesquels un transfert aux urgences n'est ni indiqué ni souhaitable
- elles peuvent concerner l'établissement d'un certificat médical pour hospitalisation sous contrainte
- ou un certificat de décès survenu hors d'un établissement de soins

3.2.2. Des données rares pour un modèle discuté

Les bénéfices de l'effection mobile sont discutés, notamment en raison des spécificités du système de soins français. Ainsi, le déclenchement des MPDSA est théoriquement systématiquement précédé d'un acte de régulation médicale téléphonique coordonné par le SAMU-Centre 15. Cette attitude, défendue par le législateur, repose sur des données de faible niveau de preuve. Malgré une demande forte de la part des organisations professionnelles ou publiques, la PDSA (et particulièrement l'effection mobile) souffre en effet d'un manque de données relatives à son évaluation.

À ce jour et à notre connaissance, il n'existe que très peu d'études françaises publiées à ce sujet. La majorité des études relatives à la PDSA ont été conduites dans d'autres pays européens, tels que les Pays-Bas, l'Angleterre, la Suède ou le Danemark (74), où les systèmes sont parfois très différents du français. Dans ces pays, l'accès à un médecin de la PDSA n'est pas forcément conditionné par une régulation téléphonique, et encore moins par une régulation médicale (le plus souvent, un assistant de régulation/*dispatcher/triagist* ou un.e infirmier.ère procèdent à un interrogatoire assisté puis fournissent les renseignements nécessaires). L'envoi d'un médecin mobile à domicile, tel que nous les connaissons en France, relève soit de l'avis d'un médecin régulateur sollicité par l'assistant de régulation, soit d'un service privé coordonné par une organisation de médecins libéraux.

La grande hétérogénéité des organisations et des pratiques rend leur comparaison délicate, et la faible validité externe des études en question freine leur généralisation.

3.2.3. En France : état des lieux

Différents rapports institutionnels déplorent le manque d'évaluation précis de l'impact clinique de l'effectation mobile. Par exemple, le rapport d'information de la commission des affaires sociales présenté à l'assemblée nationale en 2015 note « l'absence d'outils permettant d'évaluer les mérites respectifs de l'orientation des patients vers les urgences, en nuit profonde, et du recours aux associations de type « SOS médecins », dont l'activité dépend pour l'essentiel des visites à domicile » (21). De plus, la rapporteure estime qu'il est « délicat de mesurer le service apporté qui peut conduire à diminuer le recours aux autres dispositifs concourant à la prise en charge [des patients] ». Elle cite la cour des comptes et écrit que cette dernière « a déploré la faiblesse des études statistiques sur les types d'actes médicaux réalisés par tous les acteurs aux horaires de la PDSA ».

Une étude a cependant analysé les données annuelle de l'activité de 20 associations SOS Médecins en nuit profonde, « sur l'ensemble du territoire français » pendant un an (2011-2012) (75). Ses résultats montraient que 39,5 % des 220 235 appels passés entre minuit et 07 heures concernaient des patients âgés ou de jeunes enfants, que le taux global d'hospitalisation au décours des visites à domicile était de 6 %, et qu'il atteignait 9 % dans le sous-groupe des patients pour qui le motif de visite était suspecté « urgence vraie » (39 % des appels). Après réalisation de la visite, le diagnostic retenu était une urgence non réanimatoire dans 25 % des cas, contre près de 70 % de « permanence des soins » (pour des taux d'hospitalisation de 16 % vs. 4 %). Les auteurs de cette étude concluaient que l'effectation mobile de la PDSA permettait d'éviter un nombre important de passages aux urgences.

Un rapport de la DREES, datant de 2006 et dont les résultats sont extrapolés à partir de 2300 visites MPDSA, estime que les visites MPDSA représentent 5 % des actes pratiqués sur l'ensemble du territoire par les médecins généralistes aux horaires de la PDSA (76). Les facteurs explicatifs de recours aux MPDSA, tels que décrits par ce rapport, sont repris dans le Tableau 1. Les patients seraient avant tout jeunes (75 % auraient moins de 13 ans), plutôt de sexe féminin, appelleraient plutôt la nuit (y compris en nuit profonde) pour une affection aiguë, et seraient plus souvent plus graves que les patients ayant recours aux autres effecteurs, y compris hors horaires de PDSA. Il est intéressant de noter, toujours d'après ce même rapport, que les patients bénéficiant d'une visite MPDSA seraient plus fréquemment chômeurs ou inactifs que les autres. Ces données illustrent le lien étroit entre niveau socio-économique, demande et pratique de consommation de soins primaires.

Tableau 1. Facteurs explicatifs de recours aux MPDSA³³

Facteur explicatif	Écart à la probabilité de référence (en %)	Fréquence (%)	
		MPDSA	Autres
Probabilité de référence	7,9***		
Âge			
< 2 ans	1,8**	14,6	8,3
2-12 ans	0,4	17,8	14
13-24 ans	-1,8***	8,4	11,3
25-44 ans	<i>ref.</i>	26,9	25
45-69	-2,8***	17	24,2
≥ 70 ans	-3,1***	15,3	17,3
Sexe			
Femme	<i>ref.</i>	57,7	57
Homme	-0,3	42,3	43
Activité			
Actif	<i>ref.</i>	51,2	55
Chômeur	9,9***	6,3	3,7
Inactif	2,8***	42,5	41,3
Horaire			
Soirée (20h-00h, 06h-08h)	38***	25	7
Nuit profonde	45,4***	12,5	2,1
Jour (semaine)	<i>ref.</i>	41,6	88,8
Week-end	34,7***	20,2	4
Motif			
Affection aiguë	<i>ref.</i>	70	70,1
Affection aiguë sur chronique	-2,5***	6,5	9,3
Affection chronique	-6,4***	0,9	7,5
Autre	-5,8***	1,1	2,9
Degré d'urgence			
État clinique stable	<i>ref.</i>	70	70,1
Aggravation potentielle	-0,5	27,4	28,7
Pronostic vital engagé	2,7	2,1	1,1
Décès	8,7*	0,5	0,2

***p<0,001 ; ** p<0,05 ; * p<0,1

Note : soient \hat{c} et \hat{a} les paramètres estimés de la constante du modèle et d'un caractère explicatif A.

La probabilité de référence du modèle est $\hat{C} = e^{\hat{c}} / (1 + e^{\hat{c}})$ et l'écart du caractère explicatif A à la probabilité de référence est $\hat{A} = \frac{e^{\hat{a}}}{(1+e^{\hat{a}})} - \hat{C}$

³³ Données : DREES (76)

De nombreuses autres études monocentriques se sont proposé d'évaluer la pertinence du transfert des patients aux urgences après une visite MPDSA (77), de décrire la typologie des patients qui sollicitent les MPDSA (78), ou d'analyser l'impact de la création d'une ligne de garde MPDSA sur un territoire donné (79,80). Bien que difficilement généralisables, les résultats de ces travaux sont globalement concordants à ceux présentés par la DREES et tendent à montrer que le pic d'activité pour les visites missionnées par le CRRA survient aux environs de 20h, que la transmission des ordres de visite s'effectue en moins de 30 minutes dans plus de 70 % des cas, que les principaux motifs d'intervention sont une symptomatologie digestive, infectieuse ou algique (10 % chacune), que le CRRA missionne fréquemment des MPDSA pour des motifs urgents (15 % de patients présentant un risque vital potentiel ou immédiat) et qu'il existe un taux de recours important à l'effection mobile par les patients à niveau socio-économique probablement faible (jusqu'à 30 % des visites). La répartition de l'âge des patients est similaire entre les études (par tranches d'âges : < 15 ans = 10 %, [15-60 ans] = 30 %, ≥ 60 ans = 60 %).

En ce qui concerne les délais de prise en charge, 80 à 90 % des visites seraient réalisées en moins de 150 minutes (pour un délai moyen d'environ 70 minutes) et la durée moyenne des visites serait de l'ordre de 20 à 30 minutes.

Les motifs retenus après réalisation des visites seraient surtout digestifs ou infectieux (10 à 15 % chacun), sociaux et médico-légaux (15 à 20 %), ORL³⁴ et respiratoires (10 %).

La majorité des patients seraient laissés sur place après réalisation de la visite. Parmi les 5 % de patients transférés aux urgences (principalement âgés de plus de 70 ans), 25 % souffriraient de pathologies cardiovasculaires et 20 % d'une affection digestive. Plus de 80 % des transferts paraîtraient justifiés aux yeux des urgentistes, tout comme les modes de transport choisis (> 90 %). Aux urgences, 33 % des patients adressés présenteraient un état susceptible de s'aggraver ou un état grave dès l'arrivée (CCMU 4 et 5)³⁵.

3.2.4. L'évaluation des pratiques dans le Val-de-Marne : un prérequis aux méthodes correctives

À ce jour et à notre connaissance, il n'existe aucune donnée publiée relative à l'effection mobile dans le Val-de-Marne. Or, l'évaluation des pratiques est un prérequis nécessaire vers la mise en place de méthodes correctives, telle que l'optimisation du trajet des MPDSA que nous proposons de développer dans ce travail.

³⁴ Oto-rhino-laryngologie

³⁵ Classification clinique des malades aux urgences. Codification évaluant la gravité des patients (y compris son pronostic). Croissant de CCMU 1 (état clinique jugé stable, abstention d'acte complémentaire ou thérapeutique) à CCMU 4 (situation engageant le pronostic vital sans gestes de réanimation immédiats) et 5 (pronostic vital engagé, manœuvres de réanimation immédiates).

Pour cette raison et à toute fin préparatoire, nous avons réalisé une analyse descriptive préliminaire de l'état des lieux de l'effectif mobile dans le Val-de-Marne.

3.2.4.1. Méthode et données

Nous avons recueilli les données issues de deux bases distinctes : d'une part, celle du CRRA 94, telle que constituée *via* le logiciel de régulation médicale Carmen (SIS, France), comprenant tous les éléments relatifs à la réception et au traitement d'un appel et du dossier de régulation qui lui est attaché (dont l'identité et la localisation du patient, l'interrogatoire, le motif d'appel et le diagnostic suspecté, la décision prise par le régulateur, l'identification de l'effecteur, le devenir du patient et chaque horaire associé).

D'autre part, la base de données issue du standard libéral de Médecins à domicile, qui est la structure assurant la très grande majorité des visites MPDSA du département (Konectel, Lille, France). Cette base de données collecte l'identité et la localisation des patients, les motifs de visite, les horaires associés à la prise en charge des patients (appel, réception de l'ordre de visite par le MPDSA, accord par ce dernier, début de mission, arrivée sur les lieux, départ des lieux) et l'identification de l'effecteur missionné.

Les deux bases de données sont déclarées à la CNIL³⁶ et leur accès est conditionné par une autorisation spécifique (personnel identifié et déclaré). Les données extraites pour ce travail étaient anonymisées et ne possédaient aucune table de correspondance.

Le critère de sélection des dossiers à analyser était la prescription d'une visite MPDSA (aux horaires de la PDSA) après régulation médicale (pour le CRRA), et tout dossier conclu par l'envoi d'un MPDSA par le standard de Médecins à domicile.

Cette analyse étant intégrée dans les études tirées de ce travail de thèse, elle sera détaillée plus avant dans les chapitres suivants (cf. 1.1, p.111).

³⁶ Commission nationale informatique et libertés

4. LES AXES D'AMÉLIORATION DE LA PDSA

De nombreuses recommandations officielles, émanant de diverses structures publiques (CNOM, cour des comptes, sénat, assemblée nationale, caisse nationale de l'assurance maladie et des transports sanitaires), insistent sur la mission de service public de la PDSA et, devant la persistance ou l'aggravation de multiples dysfonctionnements ou inégalités, sur l'urgence de sa nécessaire restructuration.

De nombreux axes d'amélioration de la PDSA sont ainsi à explorer. Ils sont listés par différents rapports et documents précités, et constituent la base des travaux de recherche nécessaires. Parmi eux, l'effectation (fixe ou mobile) occupe une place importante. Lorsqu'elle n'est pas directement citée, elle s'inscrit tout de même dans les procédés à mettre en œuvre en vue de l'amélioration de la PDSA.

4.1. Les propositions du conseil national de l'ordre des médecins

Chaque année, le CNOM établit un rapport d'activité synthétisant les changements et les évolutions de la PDSA. Dans sa version 2018, ce rapport propose plusieurs solutions afin d'améliorer le système :

- améliorer la gouvernance et les responsabilités locales
- adapter localement l'organisation de la PDSA pour mieux contrôler les disparités (dont la « disponibilité des ressources professionnelles »)
- communiquer sur l'organisation de la PDSA
- former les étudiants à la PDSA (régulation et effectation)

Il est par ailleurs précisé que « la question des déplacements [des MPDSA] est problématique », notamment en cas de regroupement de territoires d'effectation ou d'altération du trafic routier entraînant une augmentation des délais d'arrivée.

L'effectation mobile est également décrite comme importante dans la gestion des patients vivant en EHPAD³⁷, pour qui le recours aux urgences est trop important en raison de l'indisponibilité d'effecteurs mobiles.

³⁷ Établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes

4.2. Les objectifs de l'ARS-IDF

Dans son cahier des charges 2018, l'ARS-IDF entend améliorer la qualité de l'effectif de la PDSA. En ce qui concerne l'effectif mobile, les objectifs sont :

- augmenter le nombre de territoires couverts
- développer des projets innovants permettant d'apporter des solutions pérennes
- accroître le niveau d'exigence auprès des effecteurs mobiles (respect et réduction des délais de réponse, retour d'information vers le CRRA, amélioration du service rendu)

4.3. Les propositions de l'assemblée nationale

Dans un rapport de 2015 présenté à l'assemblée nationale, la commission des affaires sociales a édicté 16 recommandations, réparties en quatre axes, visant à renforcer et améliorer le dispositif de la PDSA :

- améliorer la gouvernance (réforme du pilotage)
- informer les professionnels (dont les étudiants) et la population
- améliorer la structure de l'offre de soins (décharge des urgences)
- clarifier le périmètre de la PDSA

Seule l'effectif fixe faisait l'objet d'une recommandation claire dans ce rapport (« encourager le développement des maisons médicales de garde »), l'effectif mobile étant simplement présentée comme « problématique » (21).

4.4. La cour des comptes

Dans son rapport sur la sécurité sociale de 2013, la cour des comptes détaillait une stratégie visant à consolider le dispositif de la PDSA :

- mieux organiser la présence médicale
- articuler plus efficacement l'hôpital et la médecine libérale
- informer et sensibiliser le public
- surveiller et réguler à l'étage ministériel

De façon identique au rapport cité au 4.3, seule l'effectation fixe faisait l'objet de recommandations (vers le développement des maisons médicales de garde).

4.5. Les propositions du sénat

Dans son rapport sur les urgences de 2017, le sénat a formulé plusieurs recommandations relatives à la PDSA, similaires à celles édictées par les institutions précédentes. En revanche, il insistait sur l'importance de l'amélioration du processus de régulation médicale, y compris sur son versant « effectation mobile », en la qualifiant de « fonction-clé dans l'organisation et la prise en charge des urgences ».

Pour le rapporteur, la régulation médicale et l'effectation mobile tendent en effet à « devenir une forme d'exercice à part entière » et devraient bénéficier d'une formation dédiée, en vue de leur amélioration (45).

4.6. Les propositions du rapport Mesnier

En mai 2018, le député Thomas Mesnier a remis à la ministre des solidarités et de la santé un rapport intitulé « Assurer le premier accès aux soins. Organiser les soins non programmés dans les territoires » (71). Ce texte, dédié aux soins non programmés, n'avait pas pour objet la PDSA et se concentrait plutôt sur les horaires ouverts (de 08h à 20h en semaine et le samedi matin). Bien qu'en apparence non lié à la problématique de la PDSA, faisant elle-même l'objet de plusieurs rapports annuels précédemment cités, les problématiques qu'il soulève, ainsi que les solutions qu'il propose, sont indissociables à la fois du contexte général de l'accès aux soins non programmés, qu'ils soient urgents ou pas, et d'une forte volonté professionnelle et politique de réformer un système en grande souffrance.

Les propositions ayant un rapport avec l'effectation mobile étaient :

- assurer une réponse à la demande de soins primaires, dans tous les territoires
- faire de la régulation téléphonique un maillon clé du parcours
- encourager les visites à domiciles

5. OBJECTIFS DU TRAVAIL PRESENTE

En raison de l'importance d'une PDSA efficace sur le système de santé, tant sur le plan budgétaire que médical (y compris en termes de santé publique et de service rendu à la population), nous avons conduit ce projet au sein de l'EA-4390 (Analysis of Risk in Complex Health Systems — ARCHES) de l'Université Paris-Est Créteil (UPEC), en partenariat avec le SAMU 94 (Hôpitaux Universitaires Henri Mondor, Créteil), dans les suites du projet POSAMU (Performance et Optimisation des SAMU), coordonné par Pr Jean Marty et visant à optimiser les positionnements et trajets des véhicules SMUR dans le Val-de-Marne (81,82).

Focalisé sur la problématique de la PDSA, et plus particulièrement sur la partie « effecton mobile », ce travail a pour but d'étudier les performances théoriques d'une méthode numérique d'optimisation des trajets des MPDSA, afin de discuter l'intérêt de son évaluation en vie réelle, puis son implémentation dans les CRRA.

Une telle méthode pourrait aider à mieux utiliser les ressources professionnelles, en aidant 1) les médecins régulateurs et les assistants de régulation médicale à transmettre les ordres de visite et à choisir l'effecteur mobile le plus approprié, 2) les effecteurs mobiles à mieux organiser leur tournée, notamment en cas de territoire d'effecton élargi et/ou de flotte réduite, et 3) les patients à bénéficier d'une meilleure offre de soins (augmentation du nombre de visites, réduction des délais d'effecton, réduction des inégalités territoriales, etc.).

Ainsi, les objectifs de notre travail sont :

- la création d'un modèle mathématique d'optimisation
- la création du modèle numérique en découlant
- l'évaluation des performances du modèle numérique sur les délais d'effecton mobile

Dans un premier temps, nous discuterons de l'optimisation mathématique, des méthodes existantes et de leurs champs d'application possibles. Ensuite, nous décrirons 1) le processus de choix de la méthode en fonction de l'existant, 2) le modèle mathématique et ses contraintes, ainsi que 3) la méthode numérique et son architecture.

Enfin, nous testerons le modèle numérique sur données théoriques, comparativement à une méthode mathématique de référence (programmation linéaire en nombres entiers).

En conclusion, nous discuterons de la portée des résultats obtenus, tant sur le plan des recherches futures que de l'applicabilité du modèle.

DEUXIEME PARTIE

Les trajets des effecteurs mobiles de la PDSA : perspectives
d'amélioration

1. L'OPTIMISATION DE TRAJET DES EFFECTEURS DE SANTE

1.1. L'optimisation : généralités

L'optimisation fournit une aide au choix de la meilleure décision pour un problème posé. Elle a pour but de minimiser (ou maximiser) une fonction-objectif (ou critère) sur un ensemble donné. Ses étapes sont la modélisation, l'analyse puis la résolution du problème, le plus souvent pratique.

De nombreuses méthodes de résolution efficaces, i.e. ayant déjà prouvé leur efficacité dans des types de problèmes particuliers, sont utilisées dans divers domaines d'application (planification, gestion, ordonnancement, conception, structures, réseaux, économie, finance, localisation, transport etc.).

1.2. Définitions utiles

La fonction-objectif d'un problème d'optimisation comporte un nombre variable de paramètres et peut être soumise à des contraintes, du type égalité ou inégalité, susceptibles de rendre la résolution du problème difficile. Elle est définie sur un ensemble A de valeurs comprises dans \mathbb{R} (ensemble des nombres réels), et s'écrit :

$$f: A \rightarrow \mathbb{R}$$

On considère généralement que :

$$A \subset \mathbb{R}^n$$

C'est-à-dire que A est un sous-ensemble de l'espace euclidien \mathbb{R}^n : il est le plus souvent constitué de vecteurs dont les coordonnées satisfont des contraintes de type égalité (ou inégalité). Ses n composantes sont appelées les inconnues du problème.

Les éléments de A sont les solutions candidates du problème. L'ensemble des solutions forme le domaine de définition du problème. Dans le cas d'un problème d'optimisation où la fonction-objectif doit être minimisée, une solution candidate a_i est dite optimale si elle minimise f comme suit :

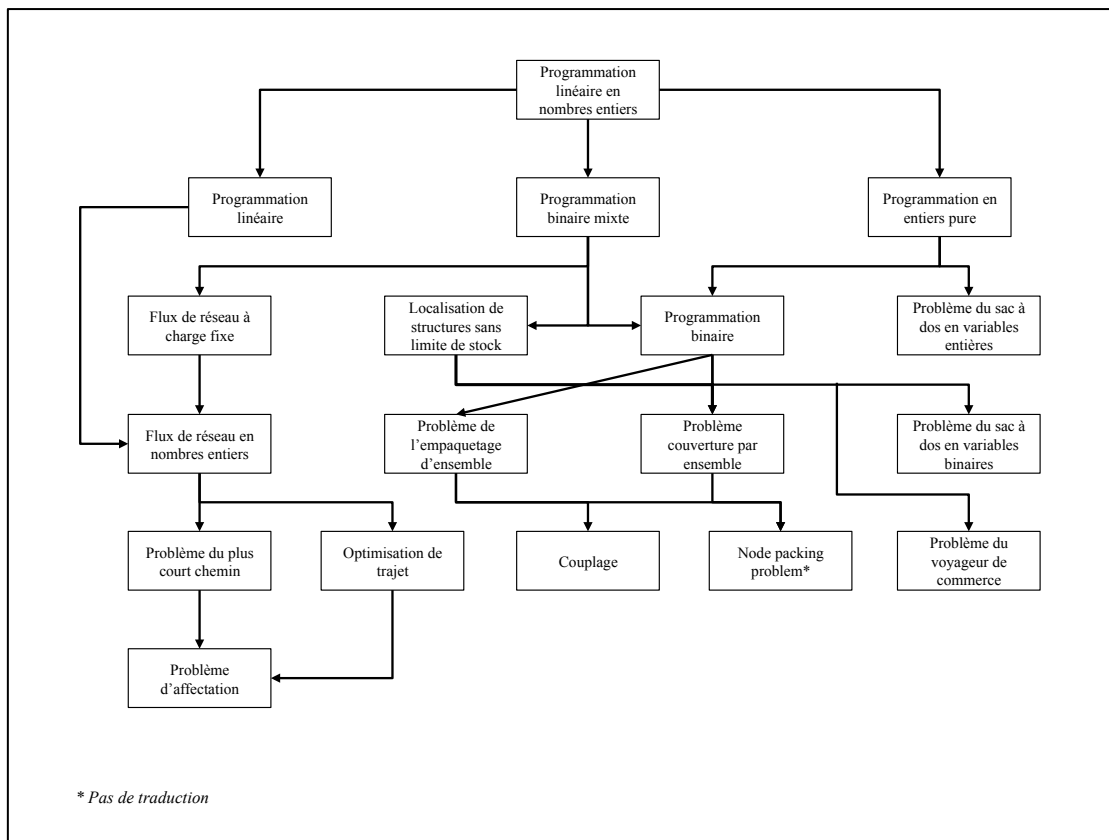
$$\forall a_j \in A, f(a_i) \leq f(a_j)$$

C'est-à-dire que toutes les autres solutions candidates a_j et leurs valeurs de f sont supérieures à celles de a_i . Dans un problème où on cherche à maximiser la fonction-objectif, cette définition de la solution optimale devient :

$$\forall a_j \in A, f(a_i) \geq f(a_j)$$

En ce qui concerne la méthode d'optimisation utilisée, parfois appelée programmation mathématique, si l'ensemble de définition A est continu (les variables du problème peuvent prendre une infinité de valeurs), on parle de méthode ou de programme mathématique continu(e). Si cet ensemble est discret, on parle de programme mathématique discret, et si $A \subset \mathbb{N}^n$, on le dit entier (en anglais : *integer program*). Enfin, si certaines composantes du vecteur de solutions prennent leurs valeurs dans un ensemble discret et les autres dans un ensemble continu, on parle de programme mathématique mixte (ou en nombre entiers), *mixed integer linear program (MILP)* (Figure 8) (83).

Figure 8. Grandes classes de méthodes de résolution et exemples de problèmes d'application (d'après Nemhauser et Wolsey (84))



1.3. Classification des problèmes d'optimisation

La formulation d'un problème d'optimisation doit conduire à sa catégorisation : les méthodes et algorithmes de résolution existants sont le plus souvent développés pour un type de problème particulier.

L'optimisation étant une discipline mathématique à part entière, il nous semble illusoire d'en dresser un état des lieux exhaustif. Même si les classifications de ces problèmes d'optimisation varient dans la littérature, on peut schématiquement distinguer quatre classes de définitions, selon la nature des variables de décision (discrète ou continue), l'existence (et la nature) de contraintes appliquées aux variables de décision, le nombre de fonctions-objectifs, et le caractère déterministe ou stochastique des données étudiées (Figure 9). Il est également courant de classer les problèmes d'optimisation d'après les propriétés de la fonction-objectif ou des contraintes appliquées. Selon les propriétés de la fonction-objectif :

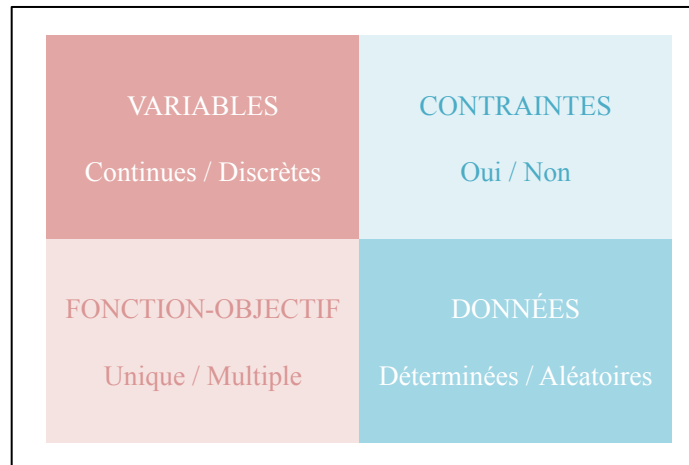
- variable unique
- fonction linéaire (du type $f(x) = ax$ ou $f(x) = ax + b$).
- fonction linéaire quadratique (du type $f(x) = ax^2 + bx + c$)
- fonction convexe
- fonction non-linéaire continûment dérivable
- fonction non-linéaire non dérivable

Selon les propriétés des contraintes :

- pas de contraintes
- bornes simples
- fonctions (linéaires, convexes, non-linéaires)

Nous détaillerons certaines de ces méthodes ci-après, afin d'introduire le choix du type de méthode utilisée dans notre travail.

Figure 9. Exemple de classification des problèmes d'optimisation



1.4. Méthodes existantes

Il existe donc de nombreuses méthodes d'optimisation, adaptées à la nature du problème posé. Leur choix n'est pas absolu et répond à une évaluation prenant en compte le contexte, la ou les fonctions-objectifs (nature, continuité, dérivabilité, propriétés particulières), les contraintes du modèle le cas échéant ainsi que le champ d'application et ses propres contraintes (notamment logistiques ou matérielles).

Par exemple, la méthode d'optimisation d'un problème donné dans un domaine fortement dynamique à haut niveau de sécurité (comme la navigation spatiale) devra être choisie en considérant le volume et la rapidité des calculs à effectuer, l'intégrabilité matérielle ou le niveau d'erreurs acceptable.

1.4.1. Les méthodes linéaires

Les méthodes d'optimisation linéaire sont le plus souvent utilisées pour résoudre des problèmes combinatoires, et sont très efficaces dans des modèles à variables continues.

La fonction-objectif et les contraintes de l'ensemble A sont linéaires, c'est-à-dire que la modélisation du problème posé est effectuée par un ensemble d'équations linéaires (du type $f(x) = ax$) ou affines ($f(x) = ax + b$). Les méthodes linéaires ont d'abord été développées en économie pour maximiser les coûts d'une entreprise.

La formulation générale d'un programme linéaire répond le plus souvent à un cadre bien défini, potentiellement constitué de quatre catégories d'éléments :

- des variables de décision (ou activités)
- des coefficients économiques (prix de vente, marge brute, etc.)
- des ressources (capacité de production, normes, etc.)
- des coefficients techniques (degré de consommation d'une ressource par activité) ; le coefficient technique a_{ij} est donné pour une ressource i et une activité j . Le nombre de coefficients techniques pour un problème à n variables et m ressources est donné par $n \times m$.

Pour des variables x , des coefficients économiques c , des ressources b et des coefficients techniques a_{ij} , ce type de problème peut être formalisé soit de façon canonique, soit de façon linéaire :

$$\text{forme canonique : } X = \begin{cases} x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \\ a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq \text{ou} \leq \text{ou} = b_1 \\ \vdots \\ a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \geq \text{ou} \leq \text{ou} = b_i \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq \text{ou} \leq \text{ou} = b_m \end{cases}$$

$$\text{forme linéaire : } X = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

La résolution d'un tel programme linéaire revient à déterminer les n -uplets (x_1, x_2, \dots, x_n) qui optimisent X .

Exemple³⁸ : un agriculteur possède un champ sur lequel il peut cultiver soit des navets, soit des courgettes. Il a à sa disposition deux types d'engrais (A, B) dont les contraintes d'épandage varient en fonction du type de légume (A : 2 L/m² pour les courgettes, 1 L/m² pour les navets ; B : 1 L/m² pour les courgettes, 2 L/m² pour les navets). Ses stocks sont de 8 L d'engrais A et 7 L d'engrais B . Il doit par ailleurs traiter ses plants de navets avec les 3 L d'antiparasite qu'il lui reste, et qui doit être répandu à hauteur de 1 L/m² de navets. Son champ a enfin un rendement de 4 kg/m² de courgettes et 5 kg/m² de navets.

³⁸ D'après M.Kleiner (85)

Problème : l'agriculteur veut maximiser la masse de sa production, qui représente sa fonction-objectif. Ses variables de décision étant x_N (surface de navets) et x_C (surface de courgettes), la fonction-objectif est donc :

$$f(x) = 4x_C + 5x_N$$

Contraintes : il est soumis à :

$$2x_C + x_N \leq 8 \quad (\text{limite d'engrais } A)$$

$$x_C + 2x_N \leq 7 \quad (\text{limite d'engrais } B)$$

$$x_N \leq 3 \quad (\text{limite d'antiparasite})$$

L'optimisation linéaire de ce genre de problème conduit à l'établissement de plusieurs demi-espaces euclidiens dont les intersections définissent l'ensemble des solutions candidates, sur lequel la fonction linéaire admet théoriquement un minimum sur au moins l'un des sommets.

Le choix des solutions optimales peut être effectué selon plusieurs méthodes.

1.4.1.1. La méthode graphique

La méthode de résolution graphique d'un problème linéaire est la plus rapide et la plus simple dès lors que le nombre de variables ou de contraintes ne dépasse pas deux.

En reprenant les données du problème de l'agriculteur, le tracé graphique des courbes correspondantes (dans un espace de définition positif) est reporté en Figure 10. Le sommet optimal de cet espace de définition est le point tangentiel entre l'espace de définition du problème et la droite donnée pour une valeur de la fonction-objectif fixée, qu'on appelle aussi ligne de niveau (dans notre exemple, $4x_C + 5x_N = 25$).

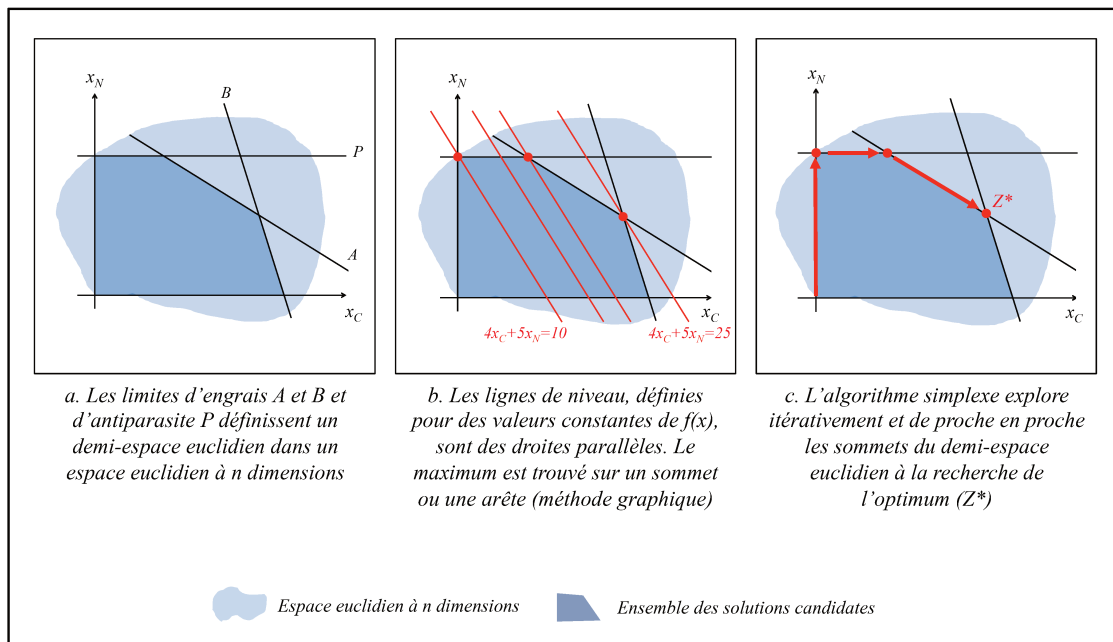
Au-delà de deux variables, comme dans le problème exposé, les méthodes de calcul algorithmique, telles que l'algorithme simplexe, sont préférées. Nous le décrivons ci-après.

1.4.1.2. L'algorithme simplexe

L'algorithme simplexe est le premier à avoir été décrit dans ce contexte, pour une application initiale purement économique. C'est une méthode de résolution générale des programmes linéaires possédant plus de deux variables. Il procède par l'identification de proche en proche des intersections des demi-espaces euclidiens de l'ensemble de définition. Il repose sur le principe d'amélioration locale, stipulant que si x_0 est un sommet non optimal, alors il existe un

sommet voisin x_i tel que $f(x_i) > f(x_0)$. La comparaison entre la méthode graphique et celle du simplexe pour le problème de l'agriculteur est synthétisée dans la Figure 10.

Figure 10. Optimisation linéaire et choix des sommets (méthode graphique et algorithme simplexe)



D'autres algorithmes existent que nous ne détaillerons pas, comme l'algorithme de points intérieurs (itérations à l'intérieur de l'espace des solutions) ou les algorithmes pour problèmes de grande taille.

1.4.2. La programmation linéaire en nombres entiers

Les méthodes d'optimisation linéaire en nombres entiers utilisent une fonction-objectif (et des contraintes) linéaire(s) mais des variables de décision ne prenant que des valeurs discrètes. On appelle cette contrainte sur les variables une contrainte d'intégralité (d'où est tirée la formulation anglo-saxonne *integer programming*).

Ces méthodes sont tirées de l'optimisation combinatoire, dont de nombreux problèmes peuvent être formulés comme des programmes linéaires en nombres entiers particuliers. Chacune de ces méthodes ne fournit des résultats satisfaisants que pour un type de problème donné : il n'existe à ce jour aucune méthode générale efficace de résolution.

Elles sont très utilisées en recherche opérationnelle, visant à la recherche du meilleur choix vers le meilleur résultat (aide à la décision), notamment l'ordonnancement, la gestion de stocks ou de flottes de véhicules, l'affectation de moyens, la conception de réseaux etc.

Il existe plusieurs classes de méthodes d'optimisation linéaire en nombres entiers, que nous ne détaillerons pas toutes :

- algorithmes polynomiaux
- programmation dynamique
- processus stochastiques (ou aléatoires)
- théorie des graphes (ordonnancement)
- simulation informatique
- méthodes arborescentes (de type *branch and bound*)
- heuristiques et méta-heuristiques

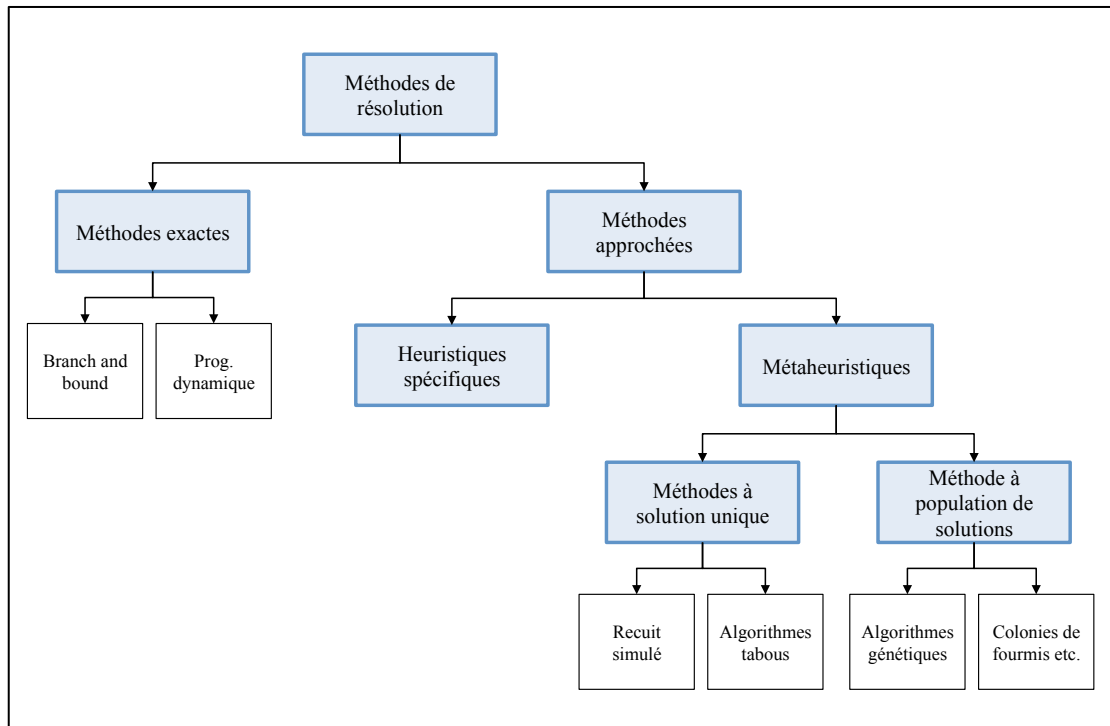
1.4.2.1. L'optimisation combinatoire : généralités

L'optimisation combinatoire consiste à trouver la meilleure solution dans un ensemble de solutions discret et fini. Le procédé théorique est l'énumération de toutes les solutions possibles pour choisir la meilleure. Pourtant, en pratique, en raison de la grande complexité des problèmes combinatoires, dits NP-difficiles³⁹, l'évaluation de l'ensemble des solutions est chronophage, d'augmentation polynomiale ou exponentielle.

Les méthodes d'optimisation combinatoire peuvent être classées selon leur appartenance à deux grandes classes : d'un côté, les méthodes exactes (ou exhaustives), qui explorent l'espace de recherche dans sa totalité, et de l'autre côté les méthodes approchées (ou approximatives), qui n'explorent que des sous-parties de cet espace (Figure 11).

³⁹ En théorie de la complexité, un problème NP-difficile est un problème de décision dont les solutions sont théoriquement vérifiables en un temps polynomial. Il faut au moins un algorithme exponentiel pour les résoudre : certains auteurs parlent d'une véritable « explosion » du temps de calcul exact. Dans le cas du problème du voyageur de commerce (cf. 1.5.1, p.66), une liste de 20 visites à effectuer représente un ensemble de $6 \cdot 10^{16}$ solutions ; en supposant un nombre d'itérations de l'ordre de $10^6/s$, le temps de calcul de l'énumération totale de l'ensemble des solutions est de 1900 ans. En réalité, la plupart des problèmes de décision sont non résolubles en un temps fini (86).

Figure 11. Exemple de classification des méthodes d'optimisation combinatoire⁴⁰



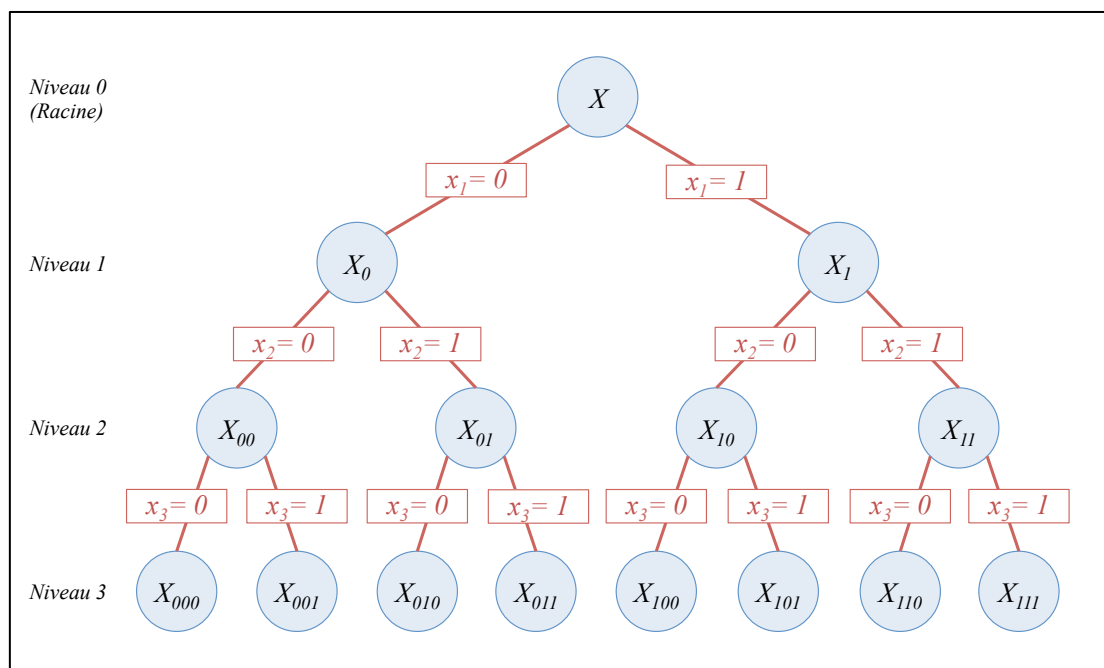
1.4.2.2. Méthodes exactes : les méthodes arborescentes

Ces méthodes essaient d'éviter d'explorer l'intégralité d'un espace fini de solutions, afin d'en trouver la meilleure le plus rapidement possible. Lorsque le nombre de solutions possibles est élevé, le temps d'énumération et d'évaluation de chacune d'entre elles augmente le plus souvent de façon exponentielle.

Les méthodes arborescentes, comme l'algorithme de séparation-évaluation (*branch and bound*), visent à minimiser le nombre de sommets évalués et le temps d'évaluation de chaque sommet. Elles procèdent à une énumération dite implicite de l'espace des solutions, d'abord en partitionnant cet ensemble en sous-ensembles successifs et arborescents (séparation) (Figure 12), puis en éliminant les sous-ensembles ne pouvant pas contenir la meilleure solution. Ainsi, les solutions ne sont pas toutes explicitement évaluées. À chaque nœud, l'algorithme résout un programme linéaire sur un sous-ensemble de solutions réalisables.

⁴⁰ D'après Ben Ismail (86)

Figure 12. Arborescence d'un algorithme de type « *branch and bound* »



Afin d'améliorer encore les performances des méthodes arborescentes, il est possible de leur appliquer une méthode de programmation par contraintes. Les contraintes, définies par les relations entretenues par les variables du modèle entre elles, limitent les valeurs simultanément prenables par ces dernières.

Les méthodes arborescentes sont largement utilisées dans le domaine de l'optimisation combinatoire, notamment dans les problèmes d'optimisation de trajet (87–89).

1.4.2.3. Méthodes exactes : la programmation dynamique

La programmation dynamique, développée dans les années 1950, est une méthode algorithmique mixte associant optimisation mathématique et programmation informatique. Elle repose sur la simplification de problèmes complexes *via* leur réduction récursive en sous-problèmes plus simples : c'est le principe de Bellman, qui stipule que « si C est un point appartenant au chemin optimal entre A et B, alors la portion de ce chemin allant de B à C est le sous-chemin optimal entre B et C ». En généralisant ce principe à des problèmes en nombres entiers, la programmation dynamique permet ainsi de trouver, pour un problème complexe donné, une combinaison de sous-solutions optimales (84). Elle est ainsi utilisée en optimisation de trajet, en optimisation combinatoire, en gestion de stocks ou de procédés industriels.

1.4.2.4. Méthodes approchées : les heuristiques

Elles appartiennent aux méthodes dites non-déterministes, ou stochastiques (mettant en œuvre des processus aléatoires) et tendent, après les itérations nécessaires, vers un optimum

global (ou un ensemble d'optimums satisfaisants) pouvant n'être qu'une approximation de la solution optimale. Contrairement aux méthodes exactes, les heuristiques ne garantissent pas l'obtention de la solution réellement optimale : elles peuvent n'en proposer qu'une approximation.

Leurs deux avantages principaux sont 1) leur efficacité dans des problèmes réputés insolubles en pratique, et 2) leur rapidité d'exécution, supérieure aux méthodes d'optimisation dites « classiques » ou exactes. Elles sont utilisées pour la résolution de problèmes particuliers pour lesquels elles ont été spécifiquement conçues, ou de problèmes proches de ceux déjà résolus. Leur nom dérive du mot grec *eurisko* (« je trouve »).

Elles sont parfois considérées comme les seules méthodes efficaces dans la résolution de problèmes d'optimisation complexes, comme les problèmes NP-difficiles, en vie réelle (contraintes temporelles, matérielles, financières etc.). Quand aucune méthode exacte n'est disponible ou que le commanditaire ne peut attendre un résultat trop longtemps, les heuristiques sont les méthodes de choix.

Elles sont particulièrement utilisées dans les problèmes d'optimisation de trajet, soit de façon isolée (une heuristique pour un type de problème précis), soit de façon combinée en une méta-heuristique (plusieurs heuristiques, ou heuristique d'heuristiques, cf. 1.4.2.5) (90–92).

1.4.2.5. Les méthodes méta-heuristiques

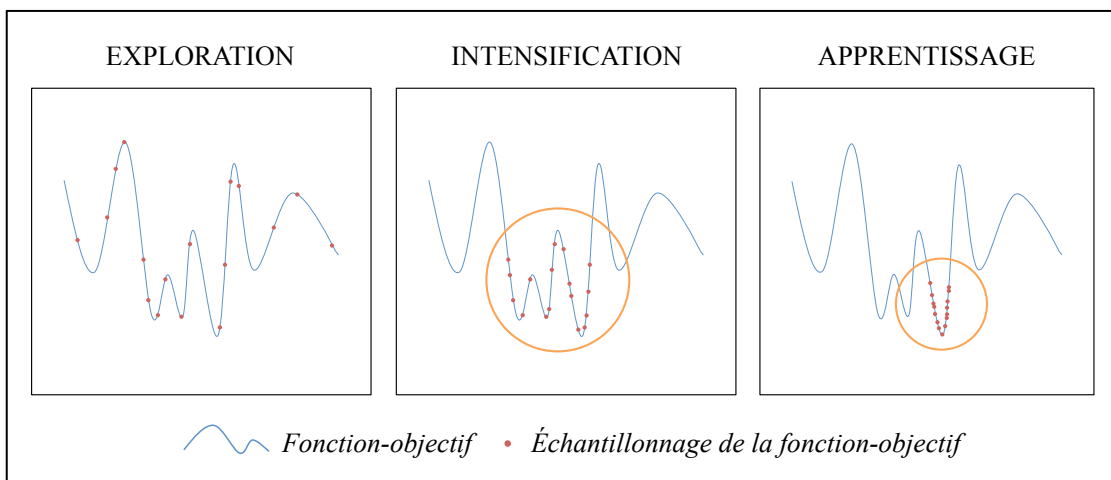
Les méta-heuristiques visent à l'optimisation de problèmes plus généraux que les heuristiques, ou à l'utilisation de plusieurs heuristiques dans un même algorithme de résolution. Elles sont parfois appelées heuristiques générales. Elles procèdent par échantillonnage de la fonction-objectif du problème étudié. Elles sont inspirées des systèmes naturels et du monde du vivant : elles apprennent les caractéristiques du problème posé et s'y adaptent afin de trouver la ou les solutions optimales.

Les méta-heuristiques sont le plus souvent utilisées en optimisation combinatoire, tel que dans la problématique du voyageur de commerce ou de tournées de véhicules (93).

Les différentes étapes des méthodes méta-heuristiques sont (Figure 13) :

- l'exploration (ou diversification) : recueil d'information sur le problème posé
- l'intensification (ou exploitation) : définition des zones de l'espace de solutions exploré
- l'apprentissage : focalisation de l'algorithme sur les zones de solutions susceptibles d'abriter l'optimum du problème posé

Figure 13. Étapes des méta-heuristiques itératives (fonction-objectif à deux dimensions)



Il existe de nombreuses méthodes méta-heuristiques. Nous discuterons des plus courantes (et des plus décrites) : d'abord du recuit simulé, tiré de la métallurgie, puis des méthodes gloutonnes, de recherche locale (méthodes tabous) et enfin, de celles dites évolutionnaires.

Ces dernières sont tirées des lois de l'évolution décrites par Charles Darwin (loi de croissance, loi de reproduction, loi d'hérédité, loi de variabilité, loi de multiplication des espèces, loi de sélection) et suivent une architecture globale identique. Elles partent du postulat qu'une solution est liée à son problème par un indice de qualité (94) et que seules les meilleures solutions (i.e. avec le meilleur indice de qualité) doivent être sélectionnées.

Nous détaillerons rapidement les plus courantes : les essais particuliers, la colonie de fourmis, les algorithmes génétiques, les algorithmes mémétiques puis les algorithmes tabous.

1.4.2.5.1. Le recuit simulé

Le recuit simulé a été développé en métallurgie, où sont utilisés des cycles contrôlés de refroidissement lent et de recuit (réchauffage) d'un matériau afin d'en minimiser l'énergie. Certains métaux ne se refroidissant pas naturellement dans leur configuration la plus solide, cette dernière n'est atteignable que par un ralentissement contrôlé du refroidissement. Le recuit simulé

est donc une méta-heuristique de descente : elle part d'une solution élevée pour descendre progressivement à la solution minimale.

Le recuit simulé dépend de nombreuses contraintes, telles que la température, de la loi de décroissance thermique, la durée des paliers de température, les critères d'interruption etc. À chaque itération, l'état de base est modifié, entraînant une variation de l'énergie du système étudié. Après un nombre donné d'itérations, l'algorithme s'arrête en cas d'obtention d'une température cible préalablement fixée.

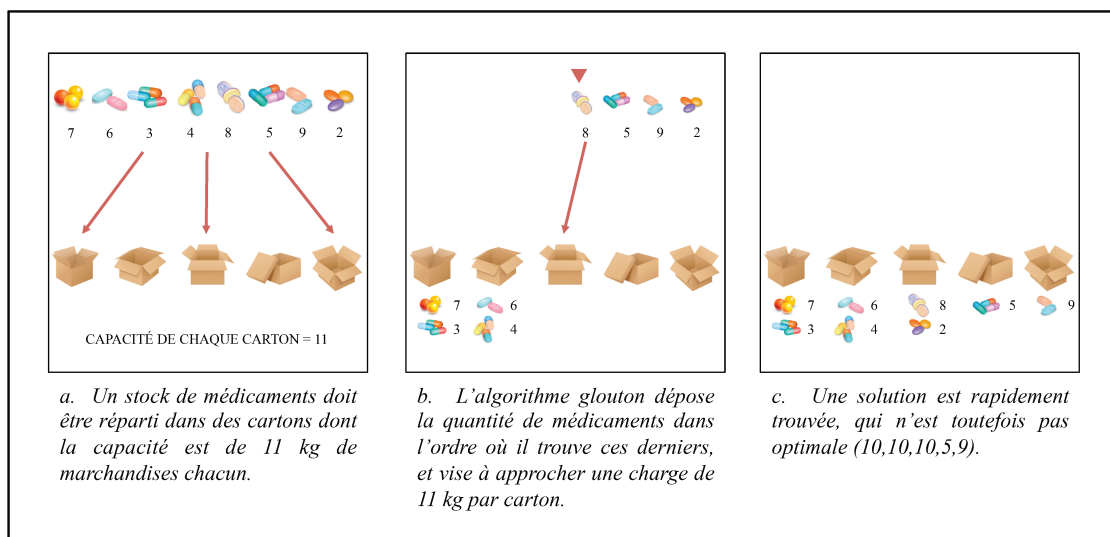
Le recuit simulé est capable de converger vers un optimum global, mais trop lentement pour des systèmes dynamiques : il n'est pas ou peu adapté aux problèmes d'optimisation de trajet (95) et n'est donc globalement pas utilisé dans ce domaine.

1.4.2.5.2. *Les algorithmes gloutons*

Les algorithmes gloutons sont des méta-heuristiques dites « de choix » : elles sélectionnent un choix particulier et en traitent seulement le sous-problème associé. Elles n'étudient pas l'ensemble des sous-problèmes d'un choix donné. Elles sont dites « intuitives », sont peu coûteuses en opérations (donc en temps de résolution) et ne garantissent pas l'optimalité globale.

La solution donnée par un algorithme glouton est construite « pas à pas », sans retour sur une décision, en faisant le meilleur choix à chaque étape de sa conduite, vers un optimum global qui n'est pas forcément atteint. Ces méthodes sont très utiles dans des problèmes difficiles, coûteux (en temps) et où l'optimum n'est pas un critère majeur (Figure 14). La première heuristique gloutonne relative à un problème d'optimisation de trajet a été développée dans les années 1960 (96).

Figure 14. Exemple de résolution d'ordonnancement par une méthode gloutonne⁴¹



1.4.2.5.3. L'optimisation par essais particuliers

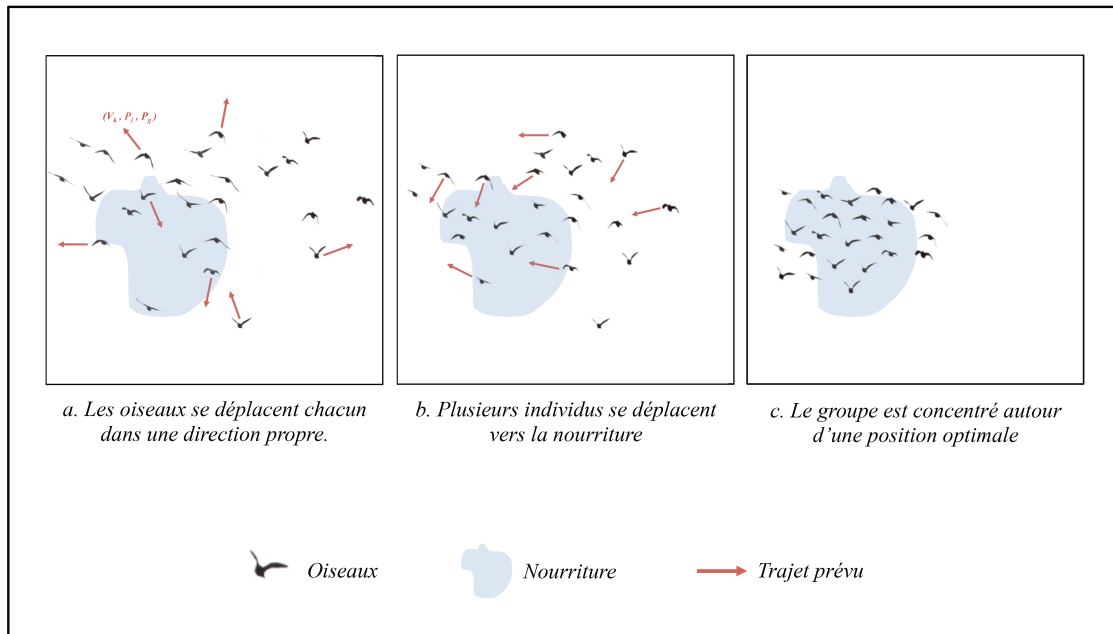
La *particle swarm optimization*, ou optimisation par essais particuliers, s'appuie sur l'hypothèse suivante : un groupe d'individus peu intelligents est capable de mettre en place, *via* des déplacements simples, une organisation complexe. Cette méthode a notamment été utilisée pour simuler le déplacement d'essaims d'oiseaux et de bancs de poissons (98), ou en sociopsychologie.

Chaque particule est positionnée dans l'espace de recherche, et se déplace à chaque itération en fonction de sa vitesse, sa propre meilleure solution et celle obtenue par ses voisines (V_i, P_i, P_g). Ainsi, les particules sont censées s'auto-organiser puis converger vers la meilleure solution globale (Figure 15).

Cette méthode a pour inconvénient un potentiel blocage des particules autour d'un optimum local qui n'est pas forcément l'optimum global. Elle est régulièrement utilisée en optimisation de trajet (99–101).

⁴¹ D'après S.Grandcolas (97)

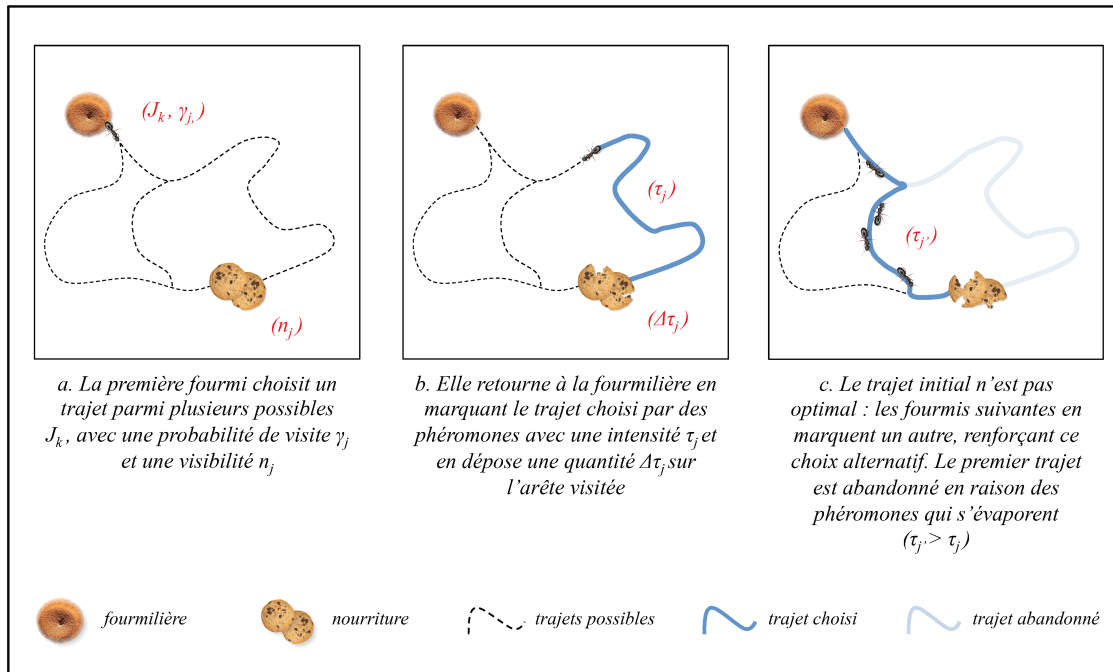
Figure 15. L'optimisation par essaims particulaires



1.4.2.5.4. La colonie de fourmis

Cette méthode, dite ACO (*ant colony optimization*) est tirée de l'observation des colonies de fourmis essayant de trouver le chemin le plus court vers une source de nourriture. L'ACO utilise des fourmis artificielles parcourant l'espace à la recherche d'une solution au problème posé. Le choix du trajet de chaque fourmi est influencé par un facteur aléatoire et par les traînées de phéromones déposées par les autres fourmis : c'est la règle aléatoire de transposition proportionnelle. Elle dépend de la visibilité n_j qu'a chaque fourmi de chaque crête à explorer (plus une visite ou crête est lointaine, plus sa probabilité de visite γ_j est faible), et de l'intensité τ_j de la piste ou de l'arête (en fonction de la solution, chaque fourmi dépose une quantité variable de phéromones $\Delta\tau_j$ sur le trajet exploré). Les phéromones s'évaporent avec le temps pour écarter les mauvaises solutions (les pistes les moins intenses) et ainsi, sélectionner le trajet optimal (Figure 16). L'ACO et ses dérivés sont régulièrement utilisés en optimisation de trajet (102–104).

Figure 16. Théorie de la colonie de fourmis (exemple de choix de trajet pour une seule crête)



1.4.2.5.5. Les algorithmes génétiques

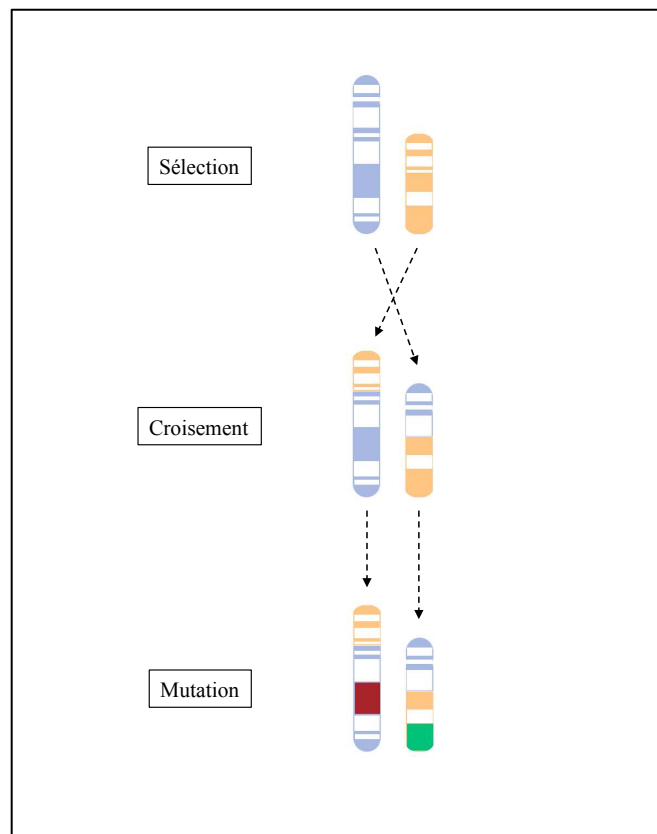
Les algorithmes génétiques sont tirés des lois de la génétique, menant à la sélection des enfants qui bénéficient des meilleures caractéristiques, héritées de leurs parents, pour survivre aux contraintes d'un système donné.

Ils ne nécessitent aucune connaissance *a priori* du problème, c'est-à-dire que la méthode de résolution du problème peut leur être inconnue. Ils génèrent initialement un jeu de solutions aléatoires qui sont ensuite soumises au processus d'évaluation évolutionnaire : les solutions les plus pertinentes sont sélectionnées, mutent, puis sont croisées avec celles issues d'une autre évaluation, générant successivement la meilleure population de solutions (i.e. les solutions optimales) (Figure 17). Chaque individu de la population initiale est représenté sous forme de chromosome, comportant des allèles (des sous-parties codant l'information). Dans un problème d'optimisation de trajet, un chromosome représente par exemple une liste de visites à effectuer et l'attribution de ces dernières à l'un des effecteurs de la flotte en question.

Les opérateurs utilisés sur la population initiale, après évaluation de cette dernière, sont :

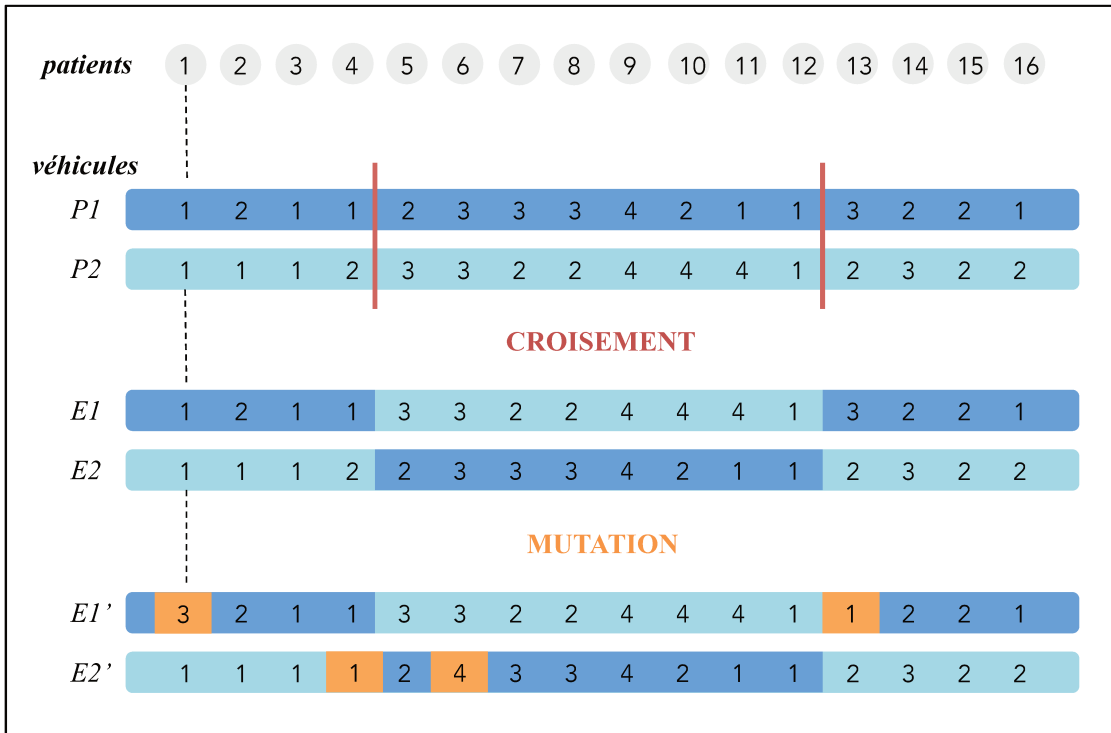
- sélection : processus de choix des individus à dupliquer dans la nouvelle population et qui serviront de parents (objets du croisement) ; cet opérateur permet la survie de la population (ou entraîne sa mort)
- croisement : recombinaison des informations présentes chez les parents. La probabilité de croisement et le nombre de points de croisement font varier la diversité génétique de la population des descendants
- mutation : modification du contenu de l'information d'un allèle. Sa probabilité de survenue est faible. Elle garantit la diversité de la population, contrôle la dérive génétique (développement aléatoire de gènes au détriment des autres), limite les risques de convergence prématurée (individus identiques n'étant pas des optimums globaux) et permet d'atteindre l'ergodicité (possibilité d'atteinte de tous les allèles de la population, donc de tous les points de l'espace de recherche)
- remplacement : c'est le remplacement d'une partie variable des parents par leurs descendants (c'est le *generation gap*)

Figure 17. Processus évolutif de type génétique sur une population de chromosomes



La Figure 18 schématise l'application d'un algorithme génétique sur une tournée d'une flotte de quatre véhicules médicaux effectuant des visites au domicile de seize patients.

Figure 18. Exemple de processus génétique sur tournée de véhicules



L'ordre des visites (la séquence des patients) est alloué aux quatre véhicules, d'abord aléatoirement selon les solutions parentes (P_1 et P_2), puis à chaque étape du processus d'évolution génétique jusqu'aux solutions enfantées après mutation (E_1' et E_2'). Ces dernières sont les solutions optimales.

À chaque étape, la séquence des visites à réaliser se lit par intersection « patient x véhicule ». Ainsi, les séquences parentes P_1 et P_2 sont, avant toute application des opérateurs génétiques (pour chacun des quatre véhicules v) :

$$P_1 \begin{cases} v_1 = (1,3,4,11,12,16) \\ v_2 = (2,5,10,14,15) \\ v_3 = (6,7,8,13) \\ v_4 = (9) \end{cases} \quad P_2 \begin{cases} v_1 = (1,2,3,12) \\ v_2 = (4,7,8,13,15,16) \\ v_3 = (5,6,14) \\ v_4 = (9,10,11) \end{cases}$$

Après croisement puis mutation, les séquences enfantées sont E_1' et E_2' :

$$E_1' \begin{cases} v_1 = (3,4,12,13,16) \\ v_2 = (2,7,8,14,15) \\ v_3 = (1,5,6) \\ v_4 = (9,10,11) \end{cases} \quad E_2' \begin{cases} v_1 = (1,2,3,4,11,12) \\ v_2 = (5,10,13,15,16) \\ v_3 = (7,8,14) \\ v_4 = (6,9) \end{cases}$$

Ces séquences sont plus efficaces que celles des générations précédentes.

Il est important de préciser que ni la sélection ni l'évolution ne dépendent du problème à résoudre. En effet, les algorithmes génétiques n'ont besoin, pour fonctionner, que d'une fonction de codage et/ou d'échantillonnage des informations comprises dans chaque solution à traiter (ici, une séquence de visites), d'une fonction inverse (solution vers information) et d'une fonction d'évaluation de la solution (par un indice de qualité ou de pertinence, par exemple : le délai de réalisation d'une visite à domicile). Les performances d'un algorithme génétique dépendent notamment de la taille de la population initiale (chromosomes et allèles), du nombre et de la nature des opérations génétiques, ainsi que du nombre d'itérations (ou du temps d'évolution alloué).

Les algorithmes génétiques représentent ainsi des méthodes pratiques et rapides fournissant des solutions mesurables. Ils sont souvent utilisés dans les problèmes d'optimisation, d'apprentissage, de systèmes complexes ou de programmation automatique, et particulièrement en optimisation de trajet, en raison à la fois de leur grande adaptabilité et de leur relative facilité de codage, ainsi que de leur efficacité largement prouvée dans ce type de problème (105).

1.4.2.5.6. Les algorithmes mémétiques

Ils ont été initialement développés dans les années 1980 pour répondre au problème du voyageur de commerce (106). Ce sont des méthodes hybrides, issues du mélange entre algorithmes génétiques et algorithmes de recherche locale (l'opérateur de mutation est remplacé par une procédure de recherche locale). La recherche locale est un processus d'apprentissage consistant à se déplacer de façon itérative d'une solution locale à une autre, proche dans l'espace de recherche. Elle peut être interrompue selon plusieurs critères ; généralement, elle s'arrête lorsqu'aucune solution voisine optimale n'a été trouvée après un nombre d'itérations donné, ou dans un temps limité. Le défaut majeur des algorithmes mémétiques est que la dernière solution trouvée peut ne pas être l'optimum global, en raison de l'enfermement local progressif (la solution optimale est éloignée sur l'espace de recherche).

Comme les autres méthodes évolutionnaires, les algorithmes mémétiques sont utilisés dans la résolution de problèmes NP-difficiles, et particulièrement en intelligence artificielle. Dans un problème de type voyageur de commerce, ils sont efficaces si l'espace de recherche est un cycle (une boucle de visites) et si l'objectif est de minimiser la distance de trajet (107–110).

1.4.2.5.7. Les algorithmes tabous

La recherche tabou (*tabu search*) est une méthode de recherche locale : à partir d'une position donnée dans l'espace de recherche, elle explore l'environnement immédiat pour trouver

une nouvelle position minimisant (ou maximisant) la fonction-objectif. Lorsque toutes les positions voisines vont à l'encontre de l'objectif (minimisation ou maximisation), et tant que l'optimum global n'a pas été trouvé, il faut donc sortir d'un optimum local pour progresser. Or, pour éviter de revenir à cet optimum local lors de l'étape suivante, il faut que la méthode de recherche en interdise l'accès. Pour ce faire, elle crée une liste de positions déjà explorées et interdites d'accès pendant un temps donné : c'est la liste tabou.

Les algorithmes tabous ne sont efficaces que dans des espaces discrets : les espaces continus possèdent un trop grand nombre de points à explorer. Le défaut principal de ces méthodes est qu'en cas d'espace de grande taille, elles risquent de ne chercher que dans un voisinage étroit et de ne pas parvenir à identifier l'optimum global.

Les algorithmes tabous ont démontré leur efficacité sur de nombreux problèmes NP-difficiles, notamment dans les tournées de véhicules (111,112).

1.4.3. Les méthodes non linéaires

L'optimisation non linéaire traite de fonctions et d'ensembles non linéaires. On distingue schématiquement deux grands types de problèmes non-linéaires : les problèmes sans contraintes, et ceux avec contraintes (de type égalité ou inégalité). L'optimisation non-linéaire est, à ce jour et à notre connaissance, mal définie et peu standardisée. Nous ne la détaillerons pas plus avant.

1.5. L'optimisation de trajet : généralités et méthodes

L'optimisation de trajet est un vaste domaine d'application, largement décrit et étudié depuis les années 1960. Son objectif général est de déterminer tout ou partie d'une liste de trajets, effectués dans un ordre donné par une flotte de véhicules disponibles, avec une affectation précise, et à un coût minimal (113).

Ses premières applications, purement commerciales, ont été élargies à tous les domaines de transport (y compris sanitaires), tant sur le plan privé qu'académique : il existe plusieurs sociétés savantes, dont la TSL⁴² aux Etats-Unis et l'EURO⁴³ en Europe, qui travaillent spécifiquement sur le sujet.

De nombreuses méthodes et applications ont été développées, y compris après hybridation. Nous exposerons les grands cadres théoriques et les données actuelles, puis nous discuterons particulièrement des problèmes appliqués au domaine de la santé (urgente ou non). Ceci nous permettra de mieux appréhender le problème de l'optimisation de trajet des MPDSA et d'ouvrir la discussion sur le choix de la méthode choisie dans ce travail.

1.5.1. Le voyageur de commerce

Le problème du voyageur de commerce est le plus célèbre des problèmes d'optimisation combinatoires (114) ; il s'appuie sur une méthode de résolution de type *branch and bound* (cf. 1.4.2.2, p.60). Largement décrit dans les années 1950, il stipule qu'un voyageur de commerce doit visiter plusieurs clients (ou plusieurs villes), une fois chacun, tout en minimisant la distance totale parcourue (donc les frais de déplacement) (115). La solution de ce problème est celle d'un cycle dit hamiltonien, c'est-à-dire un cycle de longueur minimale passant une seule fois par chaque sommet et pouvant négliger d'emprunter certaines crêtes.

Chaque client représente un point ou sommet d'un graphe⁴⁴ et est relié aux autres par des liaisons (crêtes). La distance séparant chaque sommet pondère les frais de déplacement, donc le choix de l'ordre des visites.

Le problème du voyageur de commerce est un problème NP-difficile, c'est-à-dire que sa complexité est polynomiale (ici, factorielle du type $\frac{(n-1)!}{2}$ avec n le nombre de clients) et qu'il existe une méthode de vérification rapide d'une solution candidate.

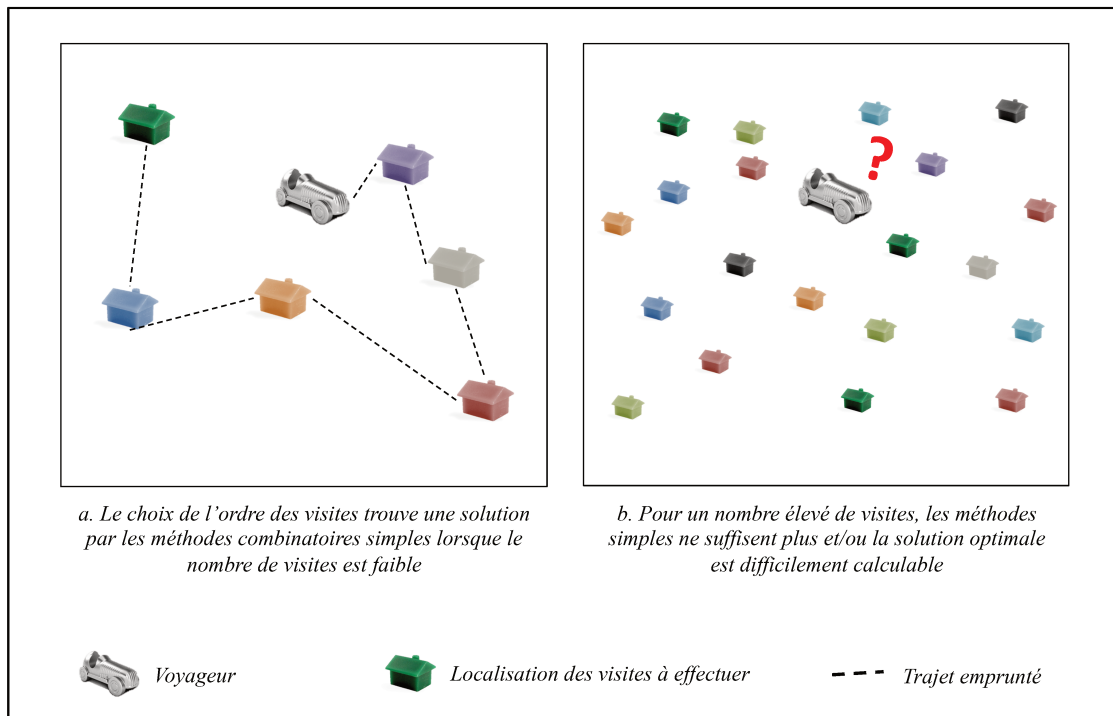
⁴² Transportation science and logistics society

⁴³ European operational research societies

⁴⁴ En mathématiques, un graphe est un ensemble de nœuds reliés par des crêtes (ou arêtes) et formant un réseau. Les graphes peuvent être ouverts ou fermés, et orientés (avec un sens de relation unique entre les nœuds) ou pas.

En raison de sa complexité factorielle, l'optimisation du problème du voyageur de commerce, au-delà d'un faible nombre de clients à visiter, ne peut plus être résolu par des méthodes exactes et nécessite l'emploi de méthodes heuristiques spécialisées ou de méta-heuristiques (Figure 19).

Figure 19. Problème du voyageur de commerce



1.5.2. Le postier chinois

Le problème du postier chinois est une variante du voyageur de commerce. La différence principale entre les deux problèmes réside dans les objectifs et donc, la cible de l'optimisation : tandis que le voyageur de commerce doit emprunter des crêtes ou liaisons (routes) pour visiter chaque sommet (client), le postier doit, lui, passer par toutes ces liaisons au moins une fois tout en minimisant la distance totale parcourue. Ce cycle est dit eulérien.

Le problème du postier chinois appartient à la catégorie des *arc routing problems* (problèmes relatifs aux liaisons) contrairement au voyageur de commerce (*vertex routing problems*) : les visites sont réparties le long des liaisons/crêtes, et non sur les nœuds. Il n'est pas applicable au problème des MPDSA, qui doivent se rendre aux nœuds d'un graphe.

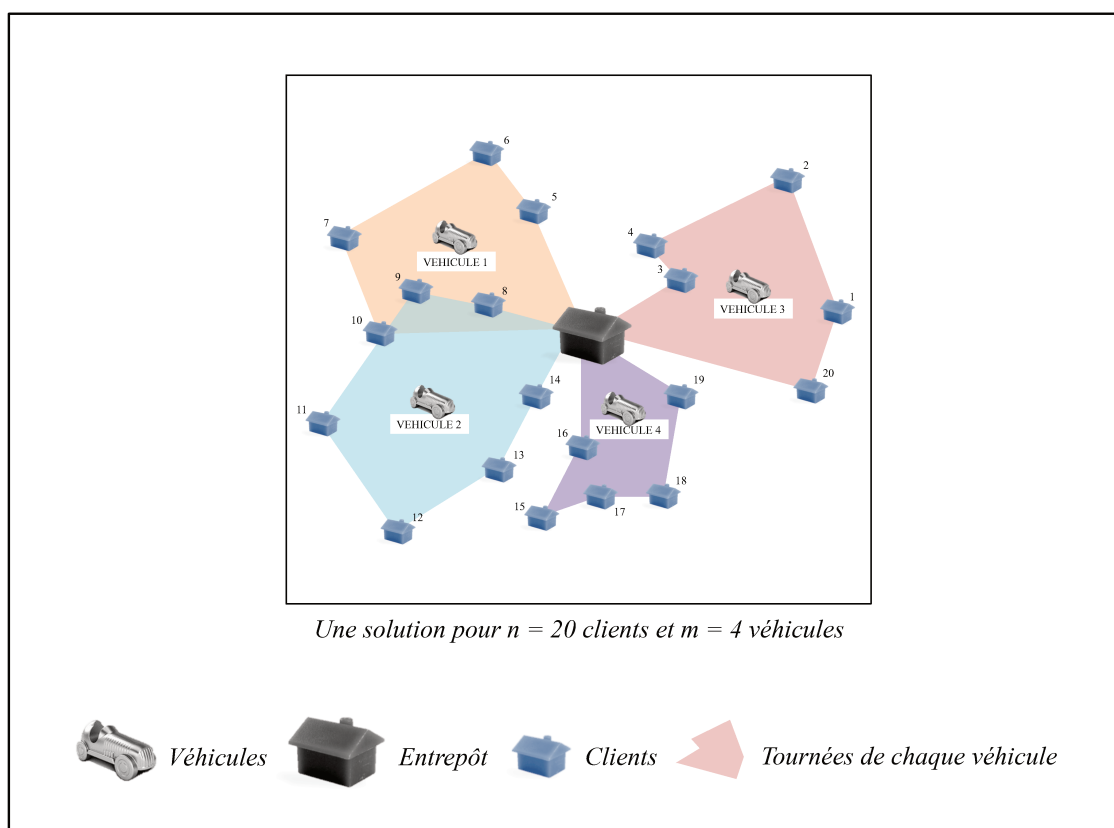
1.5.3. Le « vehicle routing problem » ou VRP

Le problème de tournées de véhicules (en anglais, *vehicle routing problem*, VRP) est une extension du problème du voyageur de commerce. Il cherche à optimiser l'ordre des visites à effectuer en fonction d'un nombre variable de contraintes (effectif de voyageurs, flotte de

véhicules, charge, carburant, disponibilité des clients, retour au local, coûts etc.). Il est basé sur l'optimisation combinatoire analytique, c'est-à-dire l'étude des combinaisons possibles dans un ou des ensembles finis pour atteindre des résultats dits asymptotiques (au voisinage d'une solution).

La version basique du VRP est le CVRP (*capacitated VRP*), soumis à des contraintes de capacité : un commerçant possède une flotte de véhicules basée dans un entrepôt et devant assurer une tournée de visites à des clients ayant chacun commandé une quantité de marchandises donnée (116). Ainsi, tout en minimisant la distance et les coûts de la tournée, la quantité de marchandises livrée ne doit pas excéder la capacité de charge de chacun des véhicules missionnés (Figure 20).

Figure 20. Le CRVP⁴⁵



La modélisation mathématique du VRP (et dérivés) est classiquement réalisée par programmation linéaire en nombres entiers (118) telle que décrite au 1.4.2 (p.58). Nous le synthétisons ci-après.

Soit le graphe de tournées $G = (V, E)$ défini par ses sommets $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$, avec v_0 correspondant au dépôt, et ses crêtes $E\{(v_i, v_j) : i \leq j; v_i, v_j \in V\}$. G est supposé complet (tous ses sommets sont reliés entre eux, c'est-à-dire que la tournée est complète et que tous les clients ont reçu leur visite/livraison).

⁴⁵ D'après Ben Ismail S. *et al.*(117)

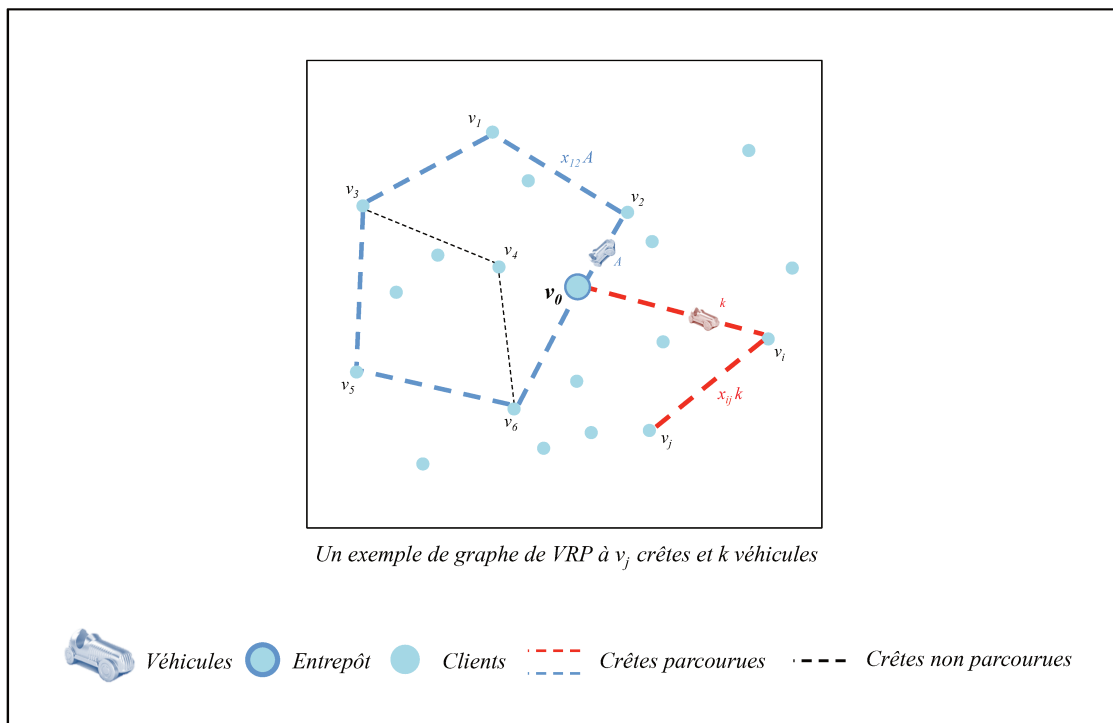
Les contraintes associées sont : n le nombre de sommets (clients), m le nombre de véhicules et Q leur capacité en charge, q_i la demande du client i et c_{ij} le coût de la crête entre les sommets v_i et v_j .

Les variables du problème sont binaires. Elles s'écrivent x_{ijk} et représentent le parcours de la crête (v_i, v_j) par le véhicule k (Figure 21).

Elles prennent comme valeurs :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_i, v_j) \text{ est parcouru par le véhicule } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Figure 21. Graphe de tournées d'un CVRP



Le CVRP cherche donc à minimiser le coût de l'ensemble des crêtes empruntées :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \sum_{k=1}^m x_{ijk}$$

Ben Ismail et al. décrivent les contraintes minimales d'un CVRP, que nous développons en ce qu'il représente la base commune à tous les dérivés du VRP, comme suit (117) :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall 1 \leq j \leq n \quad [1]$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad [2]$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n x_{ilk} = \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ljk} \quad [3]$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq m \quad [4]$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq m \quad [5]$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq Q \quad \forall 1 \leq k \leq m \quad [6]$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall 0 \leq i, j \leq n ; 1 \leq k \leq m \quad [7]$$

Les contraintes [1] et [2] imposent une visite unique pour chaque client. [3] décrit la conservation de flot (les véhicules qui partent d'un sommet v_i arrivent au sommet v_j) tandis que [4] et [5] imposent que chaque tournée débute et finisse au dépôt v_0 . [6] décrit les contraintes de capacité maximale et [7] impose le caractère binaire des variables du modèle.

Ce modèle classique du CRVP repose sur un modèle dit de flot à trois indices (*three-index vehicle flow formulation*) composé de deux sommets (v_i, v_j) et d'un véhicule k . Lorsque l'information k n'est pas indispensable, par exemple lorsque le type de véhicule est constant pour toutes les visites (comme pour les véhicules des MPDSA), on peut utiliser un modèle à deux indices.

Le CVRP ne suffit pas à décrire le problème des MPDSA, en raison de l'absence de gestion de fenêtre temporelle ou du degré d'urgence de chaque visite.

1.5.4. Le VRP à fenêtre temporelle (VRPTW)

Cette variante du VRP (à fenêtre temporelle ou *time window*, VRPTW) est soumise à une contrainte d'intervalle de temps $[a_i, b_i]$ durant lequel chaque client peut être livré. Le VRPTW

est dit « dur » si la fenêtre temporelle ne peut pas être contournée ; sinon, il est dit « souple ». Le modèle à fenêtre temporelle dure est de loin le plus étudié. La fenêtre temporelle peut être unilatérale (une seule borne), le plus souvent avec une limite inférieure. Plus elle est étroite, plus sa contrainte est forte et influence le choix des solutions. Le VRPTW est d'autant plus complexe que les fenêtres temporelles et les contraintes géographiques (par exemple le trafic routier) varient. Dans la littérature existante, il est largement considéré que la flotte de véhicules disponibles est illimitée.

Le moment de livraison est noté s_{ik} et est contraint par :

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i$$

Par ailleurs, la fenêtre temporelle entraîne l'ajout d'une autre contrainte relative au temps de trajet entre deux clients consécutifs, noté t_{ij} :

$$x_{ijk}(s_{ik} + t_{ij} - s_{jk}) \leq 0$$

L'effectif mobile des MPDSA peut être envisagée comme un type de VRPTW en ce sens que chaque visite se voit attribuer un délai cible de réalisation, en fonction de la gravité suspectée et du degré de priorité associé. De nombreuses méthodes de résolution exactes ont été développées, et particulièrement des méthodes arborescentes (119). Parmi les méthodes inexacts, les algorithmes évolutionnaires de type génétique ou mémétique ont montré des résultats satisfaisants (120).

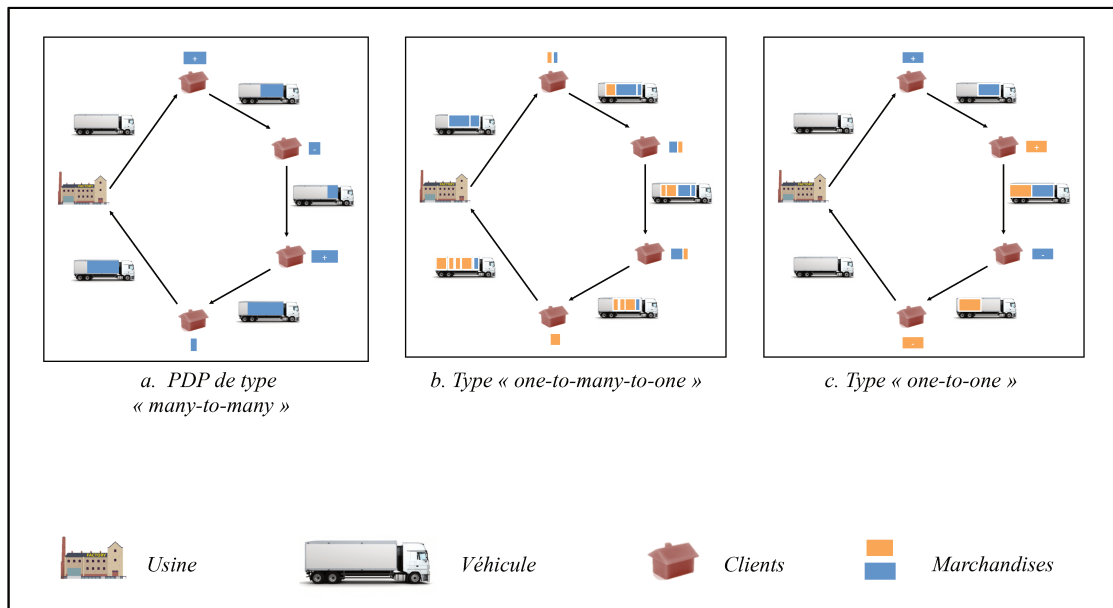
1.5.5. Le VRP avec chargement-livraison (VRPPD)

Le *vehicle routing problem with pickups and deliveries* (VRPPD), ou *pickup delivery problem* (PDP), est une variante du VRP où les véhicules assurent, durant leur tournée, des livraisons aux clients (*deliveries*) et des ramassages de marchandises chez ces derniers (*pickups*). Chaque livraison à un client v_i est précédée d'un ramassage chez le client d'origine O_i et suivie d'une autre livraison chez le client de destination D_i . Ainsi, les ramassages ajoutent une contrainte de capacité supplémentaire aux véhicules.

Il existe trois grands types de PDP : le *many-to-many*, où chaque marchandise peut provenir de plusieurs origines et être destinée à plusieurs nœuds du graphe, le *one-to-many-to-one*, où chaque marchandise provient d'une origine précise et peut être acheminée vers plusieurs nœuds (ou provient de plusieurs origines et est acheminée vers un nœud précis), et le *one-to-one*

(une origine vers un nœud) (Figure 22). Ce modèle ne semble pas adapté à l'effection mobile des MPDSA (121).

Figure 22. Types de VRPDP⁴⁶

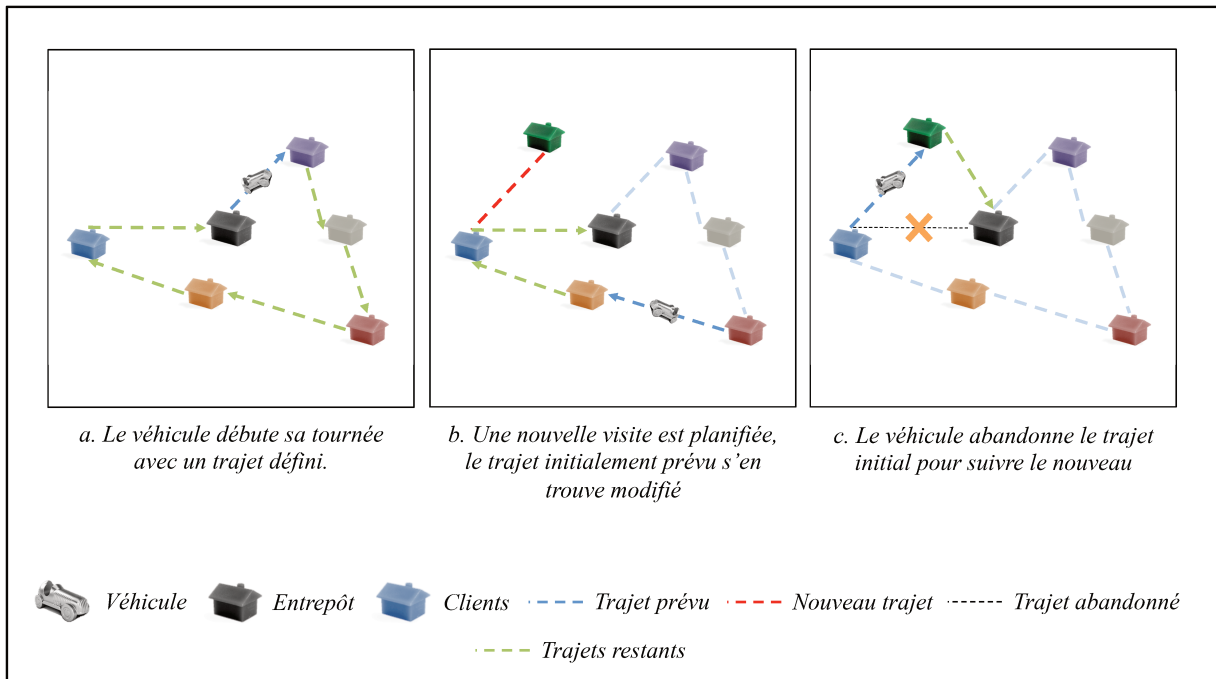


1.5.6. Le VRP dynamique (dVRP)

Le problème dynamique de tournées de véhicules (*dynamic VRP*, *dVRP*) a connu un développement rapide depuis la commercialisation de systèmes de géolocalisation en temps réel (tel que le GPS) et de traitement des données géospatiales (systèmes d'information géographique, SIG) (Figure 23). Ses premières applications, commerciales, tendaient à réduire les coûts de tournées au cours desquelles les clients s'ajoutaient de façon dynamique à la liste des visites à effectuer, d'abord sans (122) puis avec fenêtre temporelle (pour livraison immédiate) (123). Plus tard, d'autres modèles sont apparus pour répondre à de nouvelles contraintes, telles que le temps de trajet total ou la modification de l'effectif de la flotte de véhicules en tournée (124).

⁴⁶ D'après Battara M. (121)

Figure 23. Exemple de dVRP avec planification d'un nouveau trajet



Le dVRP est très proche du problème des MPDSA. Dans sa forme typique, il manque cependant d'une contrainte « degré d'urgence » ou « degré de priorité », puisque chaque nouvelle visite y est également pondérée.

1.5.7. Les visites des MPDSA : un dVRPTW ?

La spécificité d'un VRPTW dynamique (dVRPTW) réside dans l'ajout de plusieurs contraintes par rapport à un VRPTW classique :

- l'information évolue de façon dynamique (modifications en temps réel de la liste des visites à effectuer)
- en plus de la fenêtre temporelle, les caractéristiques des patients diffèrent potentiellement à chaque visite, en ce qu'il existe différents degrés de priorité ; cette contrainte peut également s'appliquer aux effecteurs (par exemple, on peut décider de ne pas missionner un effecteur dans un lieu dans lequel il a préalablement vécu une expérience négative)
- la liste des visites les plus prioritaires doit être complétée avant la fin de la fenêtre temporelle globale (les visites ne doivent théoriquement pas être reportées au lendemain)
- les effecteurs peuvent ne pas partir du même point (contrairement à la version où chaque effecteur part de et rentre à un dépôt unique)

Le problème des MPDSA, dont nous détaillons au chapitre suivant le contenu en termes d'information, peut donc, pour certains auteurs, être vu comme un dVRPTW (125).

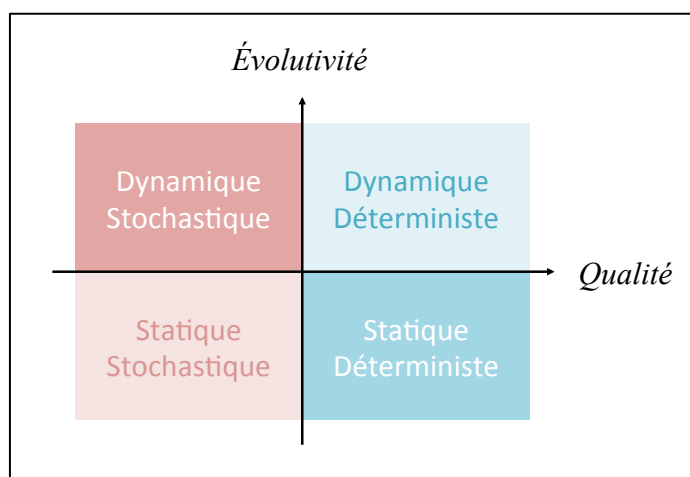
1.6. Le cœur du problème à optimiser : l'information et son évolution

1.6.1. L'information : généralités

Le choix d'un modèle pour mise en application pratique dépend de deux paramètres principaux : la qualité et l'évolutivité de l'information utilisée. L'évolutivité traduit la possibilité de modification de l'information disponible pour l'effecteur de visites à un temps donné (modification de la liste des visites à effectuer, ajout de nouvelles visites etc.) ; la qualité traduit le degré d'imprécision affecté à tout ou partie de la tournée (par exemple, la quantité de marchandise à livrer à chaque client n'est pas fixe mais estimée). Il est à noter qu'une liste de visites dynamique, contrairement à une liste statique (ou à priori), possède une faible qualité d'information, ainsi qu'une forte évolutivité (126).

Les domaines d'application du VRP et des ses dérivés doivent donc schématiquement choisir entre quatre types de problèmes d'optimisation : dynamique ou statique, et stochastique ou déterministe (Figure 24).

Figure 24. Types de modèles d'optimisation des trajets d'après l'information traitée



Ainsi, dans un modèle statique déterministe, toutes les informations sont connues à l'avance et ne varient pas au cours de la tournée dès lors qu'elle est enclenchée (127). Les modèles statiques stochastiques possèdent des variables aléatoires dont la réalisation n'a lieu que lors de l'exécution des visites programmées à priori (exemple : la quantité de marchandises à livrer peut ne pas être connue au départ mais plutôt définie une fois le livreur arrivé chez le client) (128).

Les modèles dynamiques déterministes permettent la modification des trajets entre les lieux de visite, dont la liste est fixée à priori et peut évoluer au cours de la tournée. Ces modèles dits « en temps réel » nécessitent des systèmes de communication rapides et centralisés, entre les véhicules et l'entrepôt (ou un service de gestion et de traitement de l'information) (129). Dans cette configuration, le centre de coordination doit pouvoir géolocaliser les véhicules en tout temps et leur transmettre facilement, en temps réel, de nouveaux ordres de visite *via* une interface partagée. L'effectif mobile des MPDSA missionnés par le SAMU-Centre 15 rentre donc théoriquement dans cette définition, notamment parce qu'une première liste de visites est constituée avant chaque début de garde et se voit potentiellement modifiée en fonction des appels suivants.

Les modèles dynamiques stochastiques associent le plus faible niveau de qualité d'information à la plus haute évolutivité. Tout ou partie de leurs variables sont inconnues au début de la tournée et évoluent en temps réel. Ces modèles répondent aux mêmes contraintes de mise en application que les précédents.

1.6.2. L'optimisation de trajet en santé : quelles informations ?

La tournée d'un effecteur de santé dépend de la nature de celle-ci (soins médicaux ou paramédicaux) et du contexte dans laquelle elle s'inscrit (soins programmés, fonctionnement normal, situation de catastrophe ou de réponse opérationnelle altérée) (130,131).

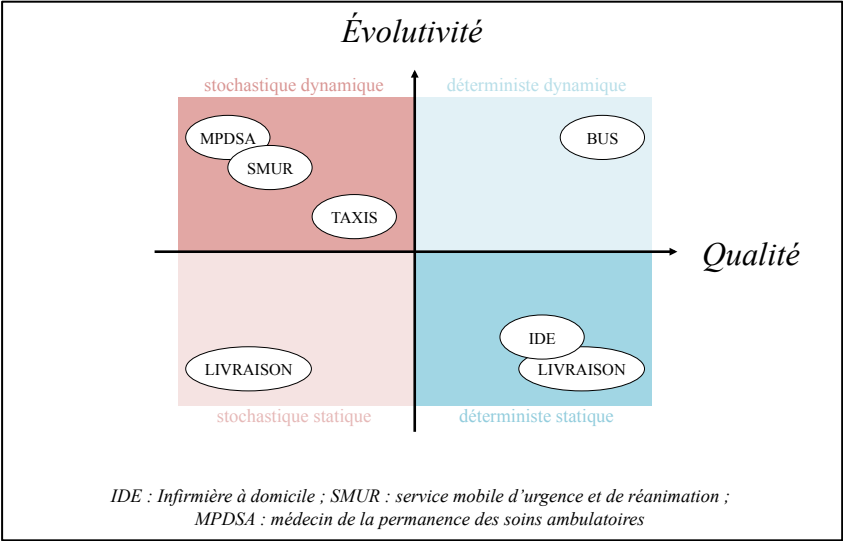
La qualité de l'information disponible est ainsi très hétérogène et varie selon le champ d'application. Les soins programmés à domicile, de type soins infirmiers ou hospitalisation à domicile, sont des modèles déterministes, le plus souvent statiques (chaque effecteur possède, dès sa prise de fonction, une liste de patients à visiter, avec des motifs clairs), parfois dynamiques (ajout d'un nouveau patient).

Les soins non programmés sont, par définition, stochastiques (les effecteurs ne possèdent pas de liste de visites pré-établie) et dynamiques (la liste peut changer à tout moment). Le degré d'urgence imprimé aux effecteurs altère davantage la qualité de l'information de ce type de modèle, et en augmente la complexité. Les fenêtres temporelles dans lesquelles les réponses doivent être apportées (et les visites effectuées) peuvent être fixes (interventions SMUR ou VSAV⁴⁷ pour motifs d'urgence vitale) ou variables (effectif mobile de type MPDSA). Ainsi, les soins non programmés représentent les modèles d'optimisation les plus complexes (Figure 25).

Les méthodes d'optimisation de trajet dans les soins non programmés sont schématiquement réparties en deux classes : celles reposant sur la modélisation stochastique, et celles reposant sur l'échantillonnage.

⁴⁷ Véhicule de secours et d'assistance à victime

Figure 25. Exemples de systèmes à optimiser selon l'information disponible



2. L'EFFECTION MOBILE : PROBLEMATIQUES DU CHOIX DE TRAJET

Dans ce chapitre, nous détaillons le processus menant à la prescription puis à la réalisation d'une visite par les MPDSA en général, et dans le Val-de-Marne en particulier. Dans un premier temps, nous exposons le processus actuel et les solutions déjà existantes. Ensuite, nous discutons des contraintes du problème d'optimisation du trajet des MPDSA.

2.1. Le processus actuel

Comme décrit au 3.1.3 (p.39), le processus d'envoi d'un MPDSA au domicile d'un patient débute par la réception de l'appel par un.e ARM qui, après recueil des informations nécessaires, transmet la communication à un médecin régulateur (urgentiste ou médecin généraliste). Ce dernier, après interrogatoire médical, peut prescrire une visite MPDSA. Il en précise le motif, puis convient d'un délai d'effection cible avec le MPDSA qui accepte la visite et organise sa tournée en fonction.

Après réalisation de la visite, le MPDSA peut transmettre un bilan clinique au médecin régulateur, et s'accorder avec lui sur la décision finale (patient laissé à domicile, transféré aux urgences par un moyen non médicalisé, envoi d'un moyen de secours, voire d'un SMUR).

2.1.1. Un modèle intuitif

En l'absence de méthode formalisée et standardisée, les MPDSA procèdent à une optimisation intuitive de leur liste de visites. Le CRRRA transmet l'ordre de visite, que les MPDSA évaluent dès qu'ils se rendent disponibles (après la visite qu'ils sont en train d'effectuer, ou après leur période d'indisponibilité). Les contraintes qu'ils utilisent pour décider de l'acceptation d'une visite, puis de son ordonnancement dans la liste restante, sont nombreuses et parfois mal définies, car dirigées par un système de décision intuitif : position géographique au moment de la réception de l'ordre de visite, motif de visite et degré d'urgence ressenti, délai cible consenti, estimation du meilleur délai d'arrivée sur les lieux de la visite, ressenti de la difficulté ou de la décision finale, intégrabilité de la visite à la liste restante, limites temporelles, contraintes matérielles, connaissance du territoire d'effection et du quartier de la visite, expérience personnelle, trafic routier, état de la voirie, disponibilité de convenance (besoins de base), etc.

Ce modèle intuitif, éprouvé par l'expérience du terrain, mène à la possibilité de refus de la visite. Dans ce cas, la liste des visites restantes n'est pas modifiée ; le MPDSA poursuit sa tournée, et le patient est adressé aux urgences (ou attend la réouverture des cabinets de ville). En cas d'acceptation, le MPDSA intègre le plus souvent la nouvelle visite d'après le problème du plus court chemin : elle est positionnée de façon à réduire la distance parcourue. Si la visite est plus

proche que la suivante, alors elle est effectuée à la place de celle-ci. Sinon, elle est intégrée dans le graphe de tournée à une position que le MPDSA estime compatible avec le problème du plus court chemin (Figure 26).

Or, une telle fonction-objectif peut mener à des résultats sous-optimaux en termes de délais d'effection ou de nombre de patients vus pendant une garde : en visant à raccourcir la distance parcourue dans son graphe de visites, le MPDSA peut mettre plus de temps que prévu pour arriver sur une crête prioritaire (Figure 27).

À ce jour et à notre connaissance, il n'existe pas d'étude ayant évalué l'efficacité du modèle intuitif des tournées MPDSA en France, en termes de respect des délais cibles. Les données dont nous disposons au début de ce travail ne permettaient pas la conduite d'une telle analyse, et l'hypothèse d'une organisation actuelle sous-optimale ne repose que sur l'observation des pratiques actuelles.

Figure 26. Processus actuel de réalisation des visites MPDSA

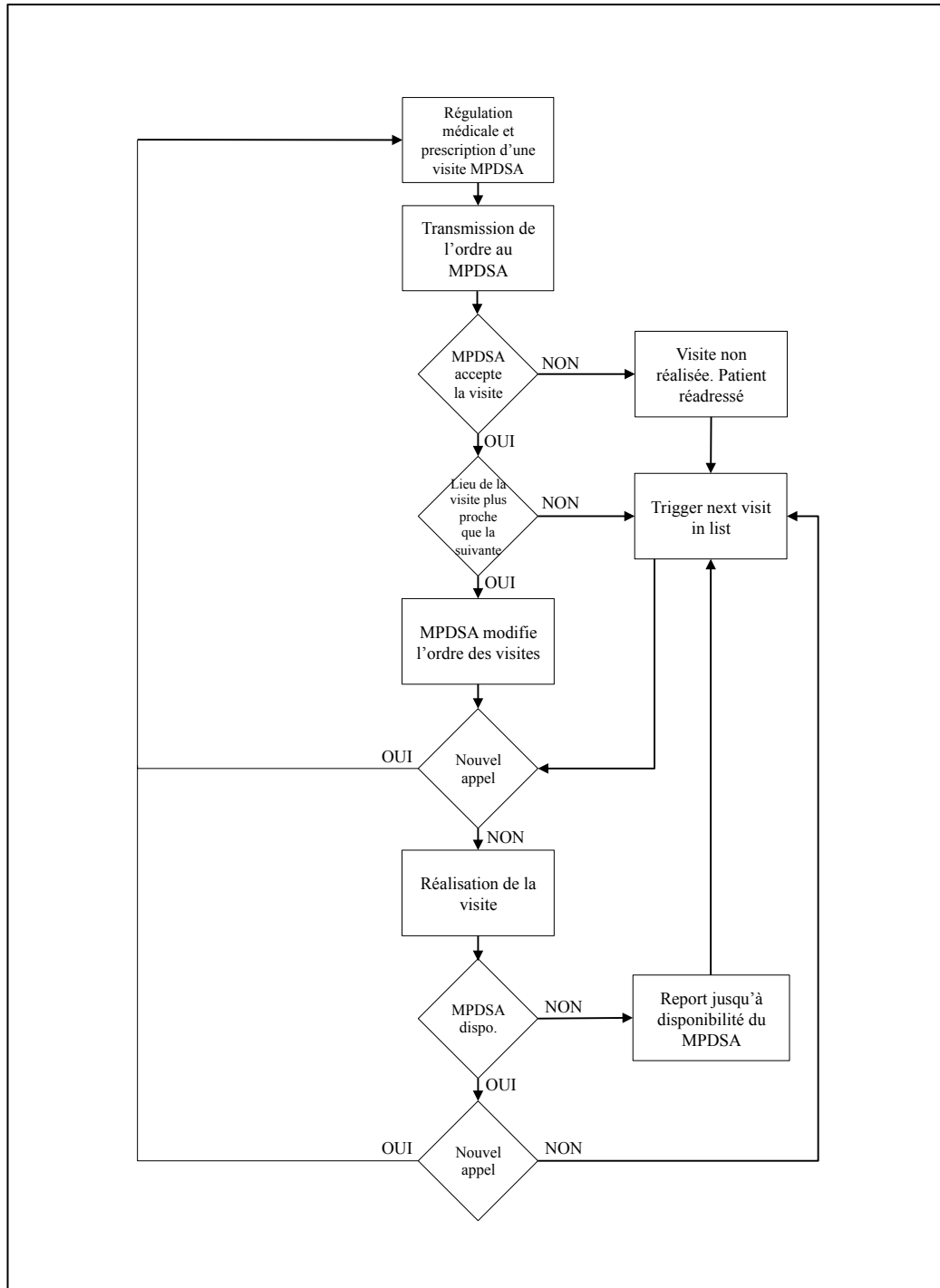
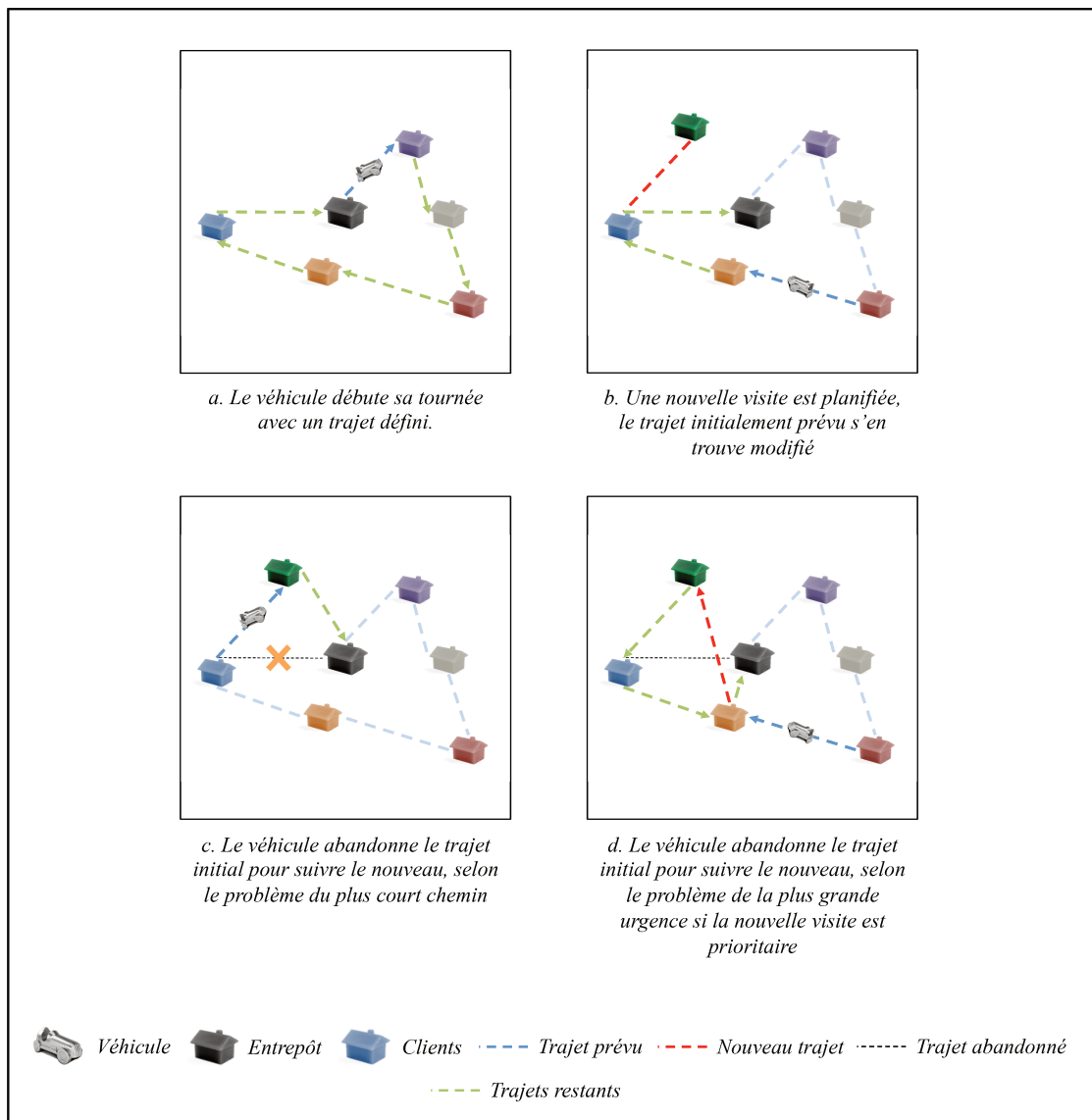


Figure 27. Exemples de méthodes de réorganisation d'une tournée de visites MPDSA



2.1.2. Les solutions existantes

Il existe quelques solutions d'optimisation du trajet des MPDSA.

L'association SOS Médecins possède un standard téléphonique au sein duquel une répartitrice évalue la position géographique des effecteurs, qu'elle contacte par téléphone, puis les missionne en fonction de leur disponibilité, de leur proximité à la nouvelle visite, ainsi que du degré de priorité. À notre connaissance, ce système n'est pas automatisé et ne bénéficie ni de modélisation mathématique, ni de procédures de calcul informatisé, ni d'applications partagées par les effecteurs. En ce sens, il ne constitue probablement pas une organisation optimisée de réalisation des visites MPDSA (mais seulement optimisée par méthodes intuitives).

La *startup* Medadom, créée en 2017, a testé puis lancé une application de visites MPDSA en Île-de-France. Cette application n'est actuellement pas utilisée par les CRRA et ne transite pas par eux. Elle met en relation les patients qui en font la demande spontanée avec les MPDSA

disponibles les plus proches. Les patients peuvent préciser, au-delà du motif de recours, la fenêtre temporelle de leur choix. Les MPDSA disponibles évaluent le degré de priorité de la visite sur la base des informations disponibles et peuvent proposer de modifier le délai souhaité par les patients. À ce jour, aucune régulation téléphonique n'est assurée de manière systématique par Medadom. La méthode d'optimisation utilisée pour répondre à ce problème de type dVRPTW ne nous a pas été communiquée à ce jour. Aucune donnée d'évaluation de l'efficacité de cette application n'est disponible au moment de la conduite de notre travail.

2.2. Les contraintes du problème

Pour rappel, notre problème est de type stochastique (l'information est aléatoire) et dynamique. Il est soumis à plusieurs contraintes, et ses variables de décision sont en nombres entiers. Il peut être vu comme un dVRPTW dont la fonction-objectif est représentée par les délais d'intervention des MPDSA (cf. 1.5.7, p.79).

2.2.1. Une liste dynamique

L'information disponible pour chaque MPDSA évolue de façon dynamique au fur et à mesure de la garde : la prescription de chaque nouvelle visite modifie le nombre de patients à visiter et leur localisation respective, donc le trajet à effectuer, ainsi que les motifs de visite et les délais cibles associés.

De plus, après l'acceptation d'une visite par un MPDSA, il n'est pas rare que la visite soit annulée par le patient, soit en raison d'un changement d'avis, soit en raison d'une consultation spontanée dans une structure de soins de la PDSA (SAMI, urgences) ou *via* une autre solution de MPDSA.

Enfin, la décision « visite MPDSA », telle que prise par le médecin régulateur du CRRA, peut évoluer et changer vers une autre modalité de réponse, comme son annulation ou une majoration (transfert au SAU, envoi d'un moyen secouriste voire d'un SMUR).

2.2.2. Une grande variabilité

L'attribution d'une visite à un effecteur donné dépend notamment de la qualité d'information disponible au moment de sa transmission. Ainsi, la variabilité du modèle en définit son incertitude : une visite pouvant théoriquement être attribuée à un effecteur proche du lieu d'intervention, mais indisponible, est transmise à un autre MPDSA.

Par ailleurs, la taille de la flotte des MPDSA est variable en fonction des dates et des horaires, soit de façon absolue (le nombre d'effecteurs sur le terrain pouvant changer d'un jour à

l'autre et d'une tranche horaire à l'autre, soit de façon relative (indisponibilité temporaire ou définitive d'un ou de plusieurs effecteurs).

2.2.3. Plusieurs degrés de priorité, donc plusieurs délais cibles

La population des patients pour lesquels un MPDSA est missionné n'est pas homogène, tant sur le plan de leur terrain (caractéristiques, antécédents, traitements de base) que de leur présentation aiguë. Ainsi les MPDSA doivent-ils intervenir pour des motifs variés, allant de la symptomatologie cardiovasculaire ou respiratoire (douleur thoracique, dyspnée), à la fièvre de l'enfant. Les délais d'intervention consentis sont alors adaptés à chaque visite, et varient de moins de 30 minutes à près de huit heures.

3. LE PROCESSUS CIBLE : VERS LE MODELE NUMERIQUE

Dans ce chapitre, nous détaillons la démarche employée au développement de notre solution d'optimisation. Dans un premier temps, nous précisons l'architecture théorique du processus d'effectation cible. Ensuite, nous justifions les choix de la méthode d'optimisation, puis des contraintes imprimées au modèle mathématique, notamment à travers les résultats d'une analyse des déterminants opérationnels de la qualité du dossier de régulation médicale en cas de prescription d'une visite MPDSA dans le Val-de-Marne.

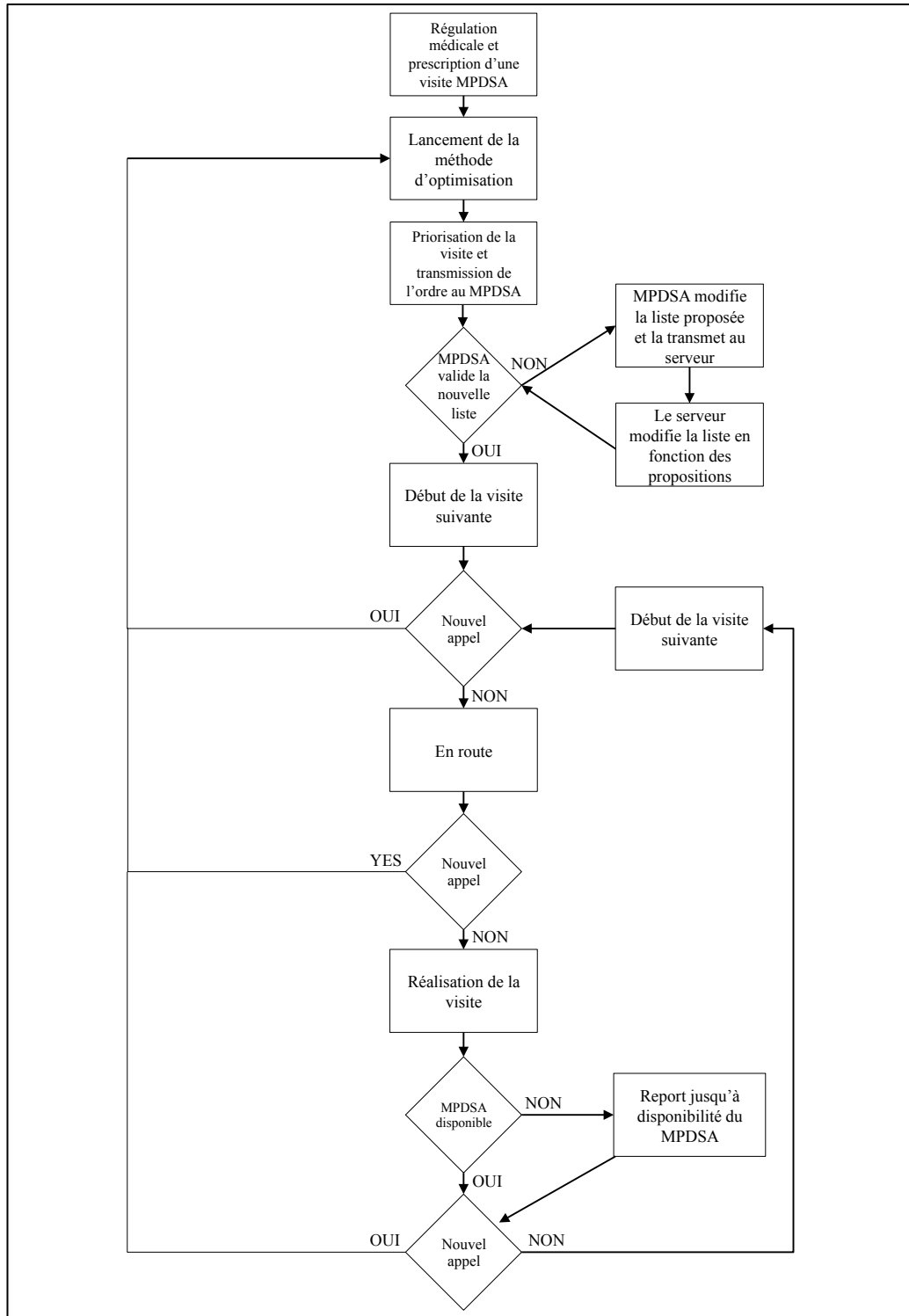
3.1. Le processus d'effectation cible

Ce processus partage ses premières étapes avec l'actuel (réception de l'appel au CRRA et traitement par l'ARM puis régulation médicale par le régulateur), mais s'en démarque ensuite par plusieurs points :

- la méthode d'optimisation est lancée dès la prescription de la visite par le médecin régulateur, qui en précise le degré de priorité et le délai cible via une application/une interface intégrée au logiciel de régulation du CRRA
- la nouvelle liste de visites est transmise par téléphonie mobile au MPDSA, tel que choisi par la méthode d'optimisation
- le MPDSA est notifié de toute modification (ajout d'un patient et d'un motif/de son délai cible associé, modification de l'ordre de réalisation des visites), qu'il est libre d'accepter ou pas
- en cas d'acceptation de la proposition faite par la méthode d'optimisation, le MPDSA s'engage à effectuer les visites dans l'ordre fourni
- en cas de refus, la méthode est relancée à chaque nouvel ordre de visite, et après chaque visite effectuée
- la transmission et la validation de la nouvelle liste de visite sont possibles si le MPDSA est disponible (statut « disponible » dans le système)

La Figure 28 synthétise ce processus cible.

Figure 28. Processus cible de réalisation des visites MPDSA



3.2. L'optimisation de trajet en santé : état des lieux

Dans ce chapitre, nous synthétisons les principales situations s'inscrivant dans un contexte d'optimisation de trajet en santé, et les méthodes développées pour répondre aux problèmes posés.

Bien que le problème d'optimisation du trajet des MPDSA n'ait pas été spécifiquement étudié à notre connaissance, il peut être comparé à deux problèmes voisins bien décrits : les soins programmés à domicile et la réallocation dynamique des ambulances de secours.

3.2.1. Les urgences vitales

3.2.1.1. En situation de fonctionnement normal

Les systèmes de secours préhospitalier reposent sur une organisation visant à réduire les délais de prise en charge des patients les plus graves, atteints de pathologies dont le pronostic vital ou fonctionnel est directement lié au temps écoulé depuis l'apparition des symptômes jusqu'à la mise en route du traitement (en cas d'arrêt cardiaque, il est globalement admis que chaque minute écoulée sans manœuvre de réanimation diminue les chances de survie de 10 %) (132). Ces délais de prise en charge font par exemple l'objet de recommandations professionnelles : aux États-Unis d'Amérique, la NFPA⁴⁸ préconise l'arrivée des premiers secours au maximum quatre minutes après leur activation, et des secours dits « avancés » (spécialisés) au bout de huit minutes supplémentaires (soit un délai total de douze minutes pour ces derniers)⁴⁹ (134) ; au Royaume-Uni, le délai d'arrivée des ambulances de prompt secours doit être inférieur à sept minutes (135). En France, en raison des spécificités du système médicalisé, le pacte santé territoire stipule que chaque patient doit pouvoir bénéficier de l'intervention d'un SMUR dans les 30 minutes suivant son appel (136). Afin de respecter ces délais cibles, et dans un souci d'amélioration de la qualité de service aux patients (sécurité, efficacité), l'optimisation de la réponse préhospitalière urgente a fait l'objet d'une littérature abondante, que ce soit d'après des stratégies dites classiques (activation de l'équipe disponible la plus proche) ou hybrides.

En effet, le problème de la réallocation des ambulances vise à réduire les délais d'arrivée des équipes sur les lieux d'une intervention urgente, en choisissant ou en positionnant les véhicules de façon optimale. Deux approches sont alors possibles : 1) la planification hors-ligne (*off-line planification*), dans laquelle l'ambulance activée est choisie de proche en proche parmi les véhicules disponibles, et 2) la planification dynamique en ligne (*dynamic on-line planification*).

⁴⁸ National Fire Protection Association

⁴⁹ Largement repris comme standard de fonctionnement en Amérique du Nord, ce délai de 8 minutes repose sur une étude de Eisenberg M.S. et al, publiée en 1979, qui suggérait l'existence d'un seuil critique de survie à un arrêt cardiaque extra-hospitalier (133).

3.2.1.1.1. Activation de l'équipe la plus proche (off-line)

Cette stratégie est historiquement la plus utilisée par les centres de régulation des moyens de secours urgents. Elle repose sur le choix le plus logique d'un point de vue intuitif : l'équipe la plus proche du lieu d'intervention est censée être la plus rapide à arriver. Ce type de réponse basée uniquement sur la proximité spatiale ne doit cependant pas omettre de prendre en compte de nombreuses contraintes, comme la disponibilité de l'équipe en question, ses modalités d'activation et de cheminement jusqu'au lieu d'intervention (mode de trajet, contraintes géographiques (terrain urbain, rural, montagnard, milieu urbain hyperdense ou milieu périlleux) contraintes géomatiques (i.e. trafic routier), capacités pratiques, qualification du personnel, adaptation au motif d'intervention, etc.

Bien que cette stratégie ait été mise en doute depuis les années 1970 (137), et démontrée comme étant largement sous-optimale par rapport à d'autres, comme des heuristiques testées sur données réalistes (138), elle reste encore largement usitée à ce jour, notamment en raison de sa facilité de mise en pratique (bases opérationnelles fixes, géolocalisation des véhicules). Elle semble être la méthode la plus répandue en France (VSAV, SMUR⁵⁰).

3.2.1.1.2. La réallocation dynamique des ambulances (on-line)

La relocalisation dynamique des ambulances prend en compte l'incertitude des scénarii envisagés (modification dynamique de la liste des visites ou de la flotte, indisponibilité du véhicule après son activation, etc.). Elle vise à gérer la flotte des véhicules *via* des systèmes de communication et de géolocalisation en temps réel (GPS⁵¹, SIG). Plusieurs méthodes, exactes ou approchées, ont été décrites dans cette optique.

Par exemple, la *cooperative receding horizon control* ou CRH (qu'on pourrait traduire par « commande adaptative à horizon variable ») (139) repose sur un horizon d'action court, i.e. une gestion des objectifs à court terme, dont on suppose qu'ils peuvent changer souvent et rapidement. Cette méthode fait partie des méthodes dites *hedge-and-react* (se couvrir et réagir). Elle diffère des méthodes aux horizons d'action éloignés, qui conduisent à la modification globale des trajets de l'ensemble de la flotte (*estimate-and-plan*) (140). Il existe plusieurs dérivés de la CRH, visant à répondre aux variantes d'un problème de relocalisation dynamique des ambulances (*targeted* CRH ou tCRH, dont la résolution est focalisée sur les cible (les visites) et non sur les vecteurs (véhicules); *adaptive* CRH ou aCRH, hybridant CRH et tCRH; CRH à bascule) (141,142).

⁵⁰ Service mobile d'urgence et de réanimation (SAMU)

⁵¹ Global positioning system

D'autres méthodes ont été décrites, comme des méthodes stochastiques (143,144), des heuristiques et méta-heuristiques (algorithmes tabous (112,145) et génétiques (146), méta-heuristiques de voisinage (147)). Parmi elles, le projet français MERCURE décrit le problème de la demande de soins urgents non programmés comme un dVRPTW. Ses auteurs ont développé une méthode de résolution mixte de réallocation dynamique des véhicules, mélangeant des méta-heuristiques (algorithmes de recherche locale et algorithmes mémétiques) à de l'intelligence artificielle de type système multi-agents (SMA⁵²) (148).

3.2.1.2. En situation de fonctionnement altéré

En situation de catastrophe, le fonctionnement des services de secours est par définition altéré (dégâts infrastructurels, capacités de réponse saturées, contraintes climatiques etc.). Dans le cas d'un afflux massif de victimes à évacuer rapidement vers les hôpitaux les plus proches, des métaheuristiques (algorithmes génétiques) ont montré leur efficacité sur la gestion d'une flotte de véhicules d'urgence, tant sur données réelles (149) que simulées (150).

D'autres problèmes ont été résolus, tels que la gestion des véhicules livrant du sang aux hôpitaux (par une MILP) (151), la gestion des moyens de secours en cas d'inondation (par une programmation stochastique) (152), la planification de la distribution des vivres en cas de catastrophe (eau, nourriture, sang) (153), ou la réponse d'une flotte de véhicule dépassée par un grand nombre de victimes (par une MIP) (154).

3.2.2. Les soins primaires

La demande de soins à domicile (*home health care, HHC*) est en constante augmentation depuis vingt ans (cf. 2.1.5, p. 31) (155). En cas d'hospitalisation à domicile, mise en place en post-hospitalisation conventionnelle immédiate ou dans les situations de grande dépendance ou de fin de vie, les patients reçoivent la visite d'effecteurs adaptés à leur situation. Ce type de problème a conduit à la création de deux grands types de méthodes d'optimisation : celui de l'attribution du soignant ou de la ressource les plus adaptés à un temps donné (infirmière, kinésithérapeute, médicaments, matériel médical etc.), et celui du choix du trajet des effecteurs missionnés. Dans la littérature, le HHC regroupe indifféremment les réseaux de soins dont bénéficient les patients

⁵² Les SMA fournissent des solutions aux problèmes de planification de transport et d'organisation, y compris dans le domaine de la santé (131). Ils décrivent des environnements partagés dans lesquels des agents peuvent interagir, soit de façon isolée avec l'environnement, soit de façon partagée (agents-agents et agent-environnement). Pour fonctionner, un SMA impose 1) que les agents partagent un système de décision et/ou de planification, 2) que les agents aient des intentions d'action, 3) que les agents soient équipés d'un système de communication, et 4) que les agents soient capables de s'adapter en temps réel.

dits chroniques (âgés, dépendants et/ou soumis à surveillance biologique ou médicale régulière) ou aigus (post-hospitalisation, hospitalisation ambulatoire, affection aiguë etc.).

Les patients pris en charge de façon régulière par ce type de système ne requièrent pas d'intervention urgente, mais peuvent nécessiter des soins à une date ou une heure donnée (existence d'une fenêtre temporelle). De plus, les tournées des effecteurs, prévues à l'avance et ordonnancées pour répondre aux contraintes du problème, sont potentiellement soumises à des modifications dynamiques de planning (indisponibilité des effecteurs, contraintes personnelles etc.).

De fait, plusieurs méthodes d'optimisation de planification, de gestion de flotte, de maximisation du nombre de visites (156,157), d'équilibrage de charge de travail par effecteur (158–160), de choix de trajet ou à objectifs multiples (réduction de la distance parcourue et augmentation du nombre de patients vus) (161) ont été développées pour répondre au problème du HHC. On compte parmi ces méthodes des méta-heuristiques dont des algorithmes évolutionnaires (159,160,162–165), des méthodes de programmation linéaire par contraintes, de programmation en nombre entiers ou de programmation stochastique (166).

3.2.3. *Les visites médicales à domicile*

L'optimisation des soins médicaux primaires, urgents ou non, est décrite et modélisée depuis une trentaine d'années. Plusieurs solutions ont été développées, visant à réduire les pertes de temps (enchaînement des consultations, articulation des actes), de ressources humaines (constitution des équipes d'une structure de soins) et financières (consultations non honorées, gestion des stocks). Ces solutions sont tirées de modèles industriels, et ont pour but de gérer le fonctionnement global d'une structure donnée, comme des cabinets médicaux, des cliniques ou des hôpitaux (167).

Dans le cadre du problème de l'organisation des soins à domicile, de nombreuses méthodes ont été proposées pour gérer les flottes d'effecteurs en fonction de la demande (dont des effecteurs médicaux), y compris dans des configurations dynamiques avec fenêtres temporelles (168,169), ou dans des SMA (170). Il semble cependant qu'aucune d'entre elle n'ait tenté de résoudre le cas particulier du problème d'optimisation du trajet des effecteurs médicaux réalisant des visites urgentes, tant à l'international qu'en France (MPDSA). Ceci ajoute à la justification de notre travail.

3.2.4. Le trajet des MPDSA : un modèle hybride

Le problème de l'optimisation du trajet des MPDSA partage ainsi les caractéristiques des deux grands types de problèmes que nous venons d'exposer (HHC et *ambulance relocation*) (Tableau 2). La méthode d'optimisation que nous développons doit être rapide et fournir des résultats dans des délais courts, mais n'est cependant pas censée s'inscrire dans un système de réponse aux urgences vitales, et elle doit être capable de gérer plusieurs flottes de MPDSA de grande taille en vue d'une éventuelle intégration à un système de gestion centralisé.

Tableau 2. Comparaison des caractéristiques principales des trois principaux modèles d'optimisation de trajet en santé

	Soins à domicile (HHC)	Trajet MPDSA	Réallocation ambulances
Niveau d'urgence	Bas	Intermédiaire	Élevé
Fenêtres temporelles	Larges	Larges à intermédiaires	Étroites
Planification†	Mixte	Mixte	Mixte
Fenêtres temporelles	Larges	Larges à intermédiaires	Étroites
Dépôt central [◇]	Non	Non	Oui / non
Incertitude	Oui	Oui	Oui
Effecteurs multiples	Oui	Oui	Oui
Optimisation par AG*	Oui	?	Oui

† Ordonnement de la liste des visites/missions (déterministe, stochastique ou mixte)

◇ Base centrale de départ (et de retour) des effecteurs

* Algorithmes génétiques (AG) testés sur ce type de problème, et dont la performance d'optimisation a été montrée

3.3. Le modèle numérique

3.3.1. Le choix de l'algorithme génétique

Nous l'avons vu précédemment, l'optimisation du trajet des MPDSA missionnés par le SAMU-Centre 15 est un dérivé du problème du voyageur de commerce (dit NP-difficile) (cf.1.5.172), que l'on considère comme un dVRPTW. Nous avons également vu que la résolution exacte d'un tel problème (par des méthodes combinatoires simples) prenait un temps augmentant de façon exponentielle avec la complexité du problème, de type $\frac{(n-1)!}{2}$: si le calcul d'une crête prend une microseconde, il prend 0,18 seconde pour dix points mais plus de 12 heures pour 15 points, et plus de 1900 ans pour 20 points.

Parmi les méthodes d'optimisation linéaire, décrites comme les plus adaptées à la résolution des problèmes du VRP (et de ses dérivés), les algorithmes évolutionnaires sont les plus étudiés. En tête figurent les algorithmes génétiques (93,117,126), qui sont encore plus performants sur des problèmes du type VRPTW. Leur relative facilité de codage, leur adaptabilité, leurs performances mathématiques et calculatoires (temps de calcul, problèmes de grande taille) en font des méthodes de choix pour ce genre de problème, appuyée par une littérature abondante (171,172).

3.3.2. La définition des contraintes

Devant le manque de données et de consensus sur les critères de classification des différents motifs de visite MPDSA et de leurs délais cibles, nous avons suivi une méthodologie par consensus d'experts : la RAND/UCLAM *appropriateness method* (RAM). Celle-ci nous a permis de constituer un thésaurus de motifs de consultation, auquel nous avons associé des degrés de priorité et des délais cibles compatibles avec les contraintes de la vie courante.

Ces données ont ensuite servi à la définition des contraintes du modèle mathématique puis de celles du modèle numérique évalué.

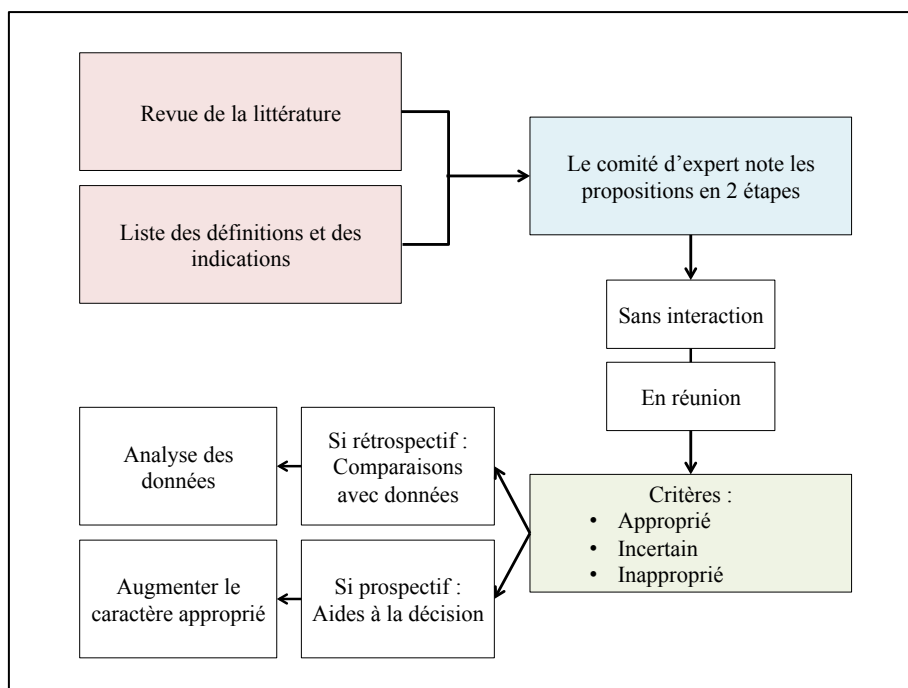
3.3.3. Déroulé du consensus

La méthode de consensus par comité d'expert RAND/UCLA a été créée dans les années 1980. Après le choix du sujet d'application, elle se déroule en quatre grandes étapes (Figure 29) :

- une revue de la littérature et des données existantes
- la création d'une liste de définitions/d'indications
- la constitution d'un comité d'expert
- l'attribution d'une note à chaque proposition

Chaque proposition formulée est étudiée par le comité puis notée de 1 à 9 par chacun des experts. Au décours du premier tour, les experts ont la possibilité de suggérer l'ajout d'une nouvelle proposition. Après le deuxième tour, chaque proposition associée à une note médiane supérieure ou égale à 7 est retenue.

Figure 29. La RAM



3.3.3.1. Constitution du comité d'experts

La composition comité d'expert, tel que recommandé par la RAM, dépend du contexte, du domaine, de la thématique et du sujet de l'étude conduite, en plus des spécificités locales (pays, région, etc.). Les membres du comité sont choisis d'après leur degré d'expertise, leur appartenance aux sociétés savantes (ou avec l'aide de celles-ci). Les critères de sélection des membres d'un comité expert sont, de façon non limitative :

- le degré d'expertise dans la spécialité
- l'absence de conflits d'intérêt
- la diversité géographique
- la diversité d'exercice et d'appartenance professionnelle

Le comité d'experts de notre étude était constitué de médecins régulateurs exerçant soit pour l'aide médicale urgente (AMU) soit pour la médecine générale (PDS) au SAMU 94. La majorité d'entre eux partagent leur activité entre régulation téléphonique et effecton (AMU :

SMUR, PDS : MPDSA), et entre différents CRRA (ou structures de régulation médicale). Parmi les régulateurs de la PDS, plusieurs appartenait à l'association départementale des médecins libéraux pour le regroupement de la régulation médicale et de la PDSA (ARPS 94), au sein de laquelle siègent des représentants de chaque association de PDSA du département (Médecins à domicile, Médigarde, S.O.S Médecins).

Enfin, les régulateurs de la PDS ayant une activité d'effectation mobile avaient des territoires départementaux différents.

3.3.3.2. Données existantes

À ce jour et à notre connaissance, il existe peu de données relatives à l'effectation mobile des MPDSA en France en général, et dans le Val-de-Marne en particulier, tant sur les motifs de visite que sur les délais d'effectation. Pour plus de détails, nous renvoyons à la lecture du paragraphe 3.2 (p.42-45).

3.3.3.3. Motifs de visite et degrés de priorité

3.3.3.3.1. Degrés de priorité

La définition retenue des degrés de priorité des visites MPDSA, à l'issue des deux tours de la RAM, était la suivante :

- priorité élevée : motif nécessitant la réalisation de la visite MPDSA dans les délais les plus courts
- priorité normale
- priorité basse : motif autorisant une réalisation de la visite MPDSA « sans délai » (mais avant la fin de la plage horaire de la PDSA)

Le terme « urgent » n'a pas été retenu en ce qu'il a été estimé ne pas relever de la PDS, mais plutôt de l'AMU (pompiers, SMUR).

3.3.3.3.2. Motifs de visite : classifications

Les motifs de consultation en soins primaires peuvent être classés selon plusieurs nomenclatures.

La CIM-10 (classification internationale des maladies, dixième révision) est une classification publiée par l'organisation mondiale de la santé (OMS). Elle permet de classer des diagnostics, des symptômes, des maladies et des circonstances (dont psycho-sociales), ainsi que d'établir des statistiques globales, standardisées. La CIM est considérée comme le standard

international de classification des maladies, notamment en ce qui concerne la recherche (173). Elle est organisée sous forme de liste hiérarchique. Sa dixième révision (CIM-10), établie en 1990, a été remplacée par une onzième (CIM-11) en juin 2018 (174). Elle est, à ce jour, la classification utilisée par le logiciel de régulation commun aux quatre SAMU de l'assistance publique – hôpitaux de Paris, dont fait partie le SAMU 94.

En raison de son caractère universel et généraliste, d'autres classifications spécialisées ont vu le jour afin de coller davantage aux contraintes de structure et de classification. C'est le cas de la classification internationale des soins primaires (CISP), développée en 1983 par la WONCA⁵³. Cette classification, dont la deuxième révision date de 1998, devrait être privilégiée en soins primaires/médecine générale, en ce sens que seul un tiers de ses rubriques possèdent une correspondance dans la CIM-10 (175).

3.3.3.3.3. *Motifs de visite : les données du Val-de-Marne*

Afin de classer les motifs de visite et de leur attribuer des délais cibles, nous avons d'abord réalisé une analyse descriptive des données du CRRA 94 en 2016. Pour ce faire, nous avons extrait tous les dossiers de régulation médicale (DRM) traités en 2016 (du 01/01 au 31/12), et conclus par l'envoi d'un MPDSA (logiciel Centaure 15, SIS, France). Chaque appel traité par le CRRA 94 génère un DRM auquel est associé un identifiant unique. Toutes les données collectées sont elles-mêmes attribuées à cet identifiant (identité du patient, de l'appelant, de l'ARM, du médecin régulateur et, le cas échéant, du MPDSA, antécédents du patient, motif d'appel, interrogatoire, motif final retenu, type de décision). Les motifs sont classés d'après la CIM-10.

Les DRM étaient donc extraits dès lors qu'ils étaient conclus par l'envoi d'un MPDSA. Afin de limiter l'inexactitude des codes CIM-10 (qui pouvaient attribuer au motif libre « fièvre sur rhinopharyngite de l'enfant » le code « pédiatrie », nous avons effectué un codage manuel (après *data mining* et relecture de chaque DRM extrait) pour affiner le motif de visite retenu et le classer selon l'ICPC-2 (176). Ensuite, les motifs d'appel ont été associés à des degrés de priorité correspondants. Ceux-ci ont été répartis selon les trois classes définies au paragraphe 3.3.3.3.1 (p. 98) : priorité élevée, priorité normale, priorité basse.

⁵³ *World organization of national colleges, academies and academic associations of general practitioners/family physicians.*

C'est l'organisation mondiale des médecins généralistes.

Les motifs à priorité élevée étaient :

- les atteintes cardiovasculaires (douleur thoracique, hypertension, palpitations et autres troubles du rythme cardiaque, malaise)
- les atteintes respiratoires (dyspnées, dont asthme)
- les allergies
- les atteintes neurologiques (dont confusion)
- les syndromes hyperalgiques (lombo-sciatalgies, coliques néphrétiques)

Les motifs à priorité basse étaient :

- les certificats de décès
- les autres demandes administratives
- les atteintes dermatologiques isolées

Tous les autres motifs étaient classés à priorité normale.

3.3.3.4. Délais cibles

Après avoir défini les motifs de visite et les degrés de priorité, le comité d'expert a procédé à l'établissement des classes de délais cibles correspondants. De façon superposable aux degrés de priorité, les notions de « visite urgente » ou de « délai urgent » n'ont pas été retenues. Ainsi, alors qu'il est communément admis que l'accès aux soins d'urgence doit être possible dans les 30 minutes en France (136,177), le comité a estimé que toute visite devant être effectuée dans cet intervalle relevait des services de secours urgents spécialisés (SMUR, VSAV) mais pas de la PDS. Les délais cibles retenus (entre l'heure d'activation du MPDSA et l'arrivée au domicile du patient) étaient donc les suivants (en minutes) :

- priorité élevée : < 90
- priorité normale : [90-240[
- priorité basse : [240-480[

3.3.3.5. Sélection des dossiers à analyser

En accord avec les recommandations françaises émises par la HAS, et devant le grand nombre de DRM éligibles, nous avons effectué une sélection pondérée et stratifiée de 30 pages non consécutives de MPDSA entre le 01/01/2015 et le 31/12/2015.

3.3.3.5.1. Déterminants du nombre d'appels

Afin d'assurer une représentativité satisfaisante de l'échantillon et limiter les biais de sélection, la constitution de l'échantillon a été stratifiée selon certains déterminants du nombre d'appels entrants (connus ou suspectés d'être responsables d'une augmentation du nombre d'appels, du nombre d'appels relevant de la PDS, ou du nombre de visite MPDSA, comme les périodes épidémiques, les saisons, les vacances, les événements ponctuels etc.) et/ou des motifs de visite MPDSA les plus fréquents.

Les déterminants retenus au décours de l'application de la RAM étaient ceux qui, après deux tours, étaient associés à une note médiane supérieure ou égale à 7 : week-ends et jours fériés, saison, vacances, grippe, gastro-entérite, bronchiolite, allergies, chaleur, pollution. La fraction d'échantillonnage de chaque strate était de 5 %, excepté pour les strates « vacances » et « jours fériés », où elle était de 20 % en raison de la justification même du système de la PDSA.

3.3.3.5.2. Extraction des données

Les DRM étaient extraits de la base de données du CRRRA 94, sur la base de la décision finale « visite MPDSA ». Afin de limiter l'imprécision des codes des motifs d'appel tels que rapportés par la CIM-10 (qui pouvaient attribuer la valeur « pédiatrie » à un tableau du type « fièvre et rhinite chez un enfant »), nous avons procédé à une relecture systématique des cases de texte libre « interrogatoire » de chaque DRM, et avons manuellement recodé les motifs d'appel d'après les intitulés de l'ICPC-2.

3.4. Modèle mathématique (MILP)

L'algorithme génétique que nous développons est supposé être plus rapide qu'une méthode d'optimisation exacte, i.e. une méthode capable de fournir la solution optimale exacte à un problème donné, dans un temps de calcul illimité. C'est le cas des méthodes de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) (cf. 1.4.2, p.58), utilisés pour résoudre des problèmes de type dVRPTW, et dont nous décrivons ici le modèle mathématique.

Les notations utilisées par ce modèle sont les suivantes :

Indices

j : patient

k : séquence/position d'un patient dans la liste

p : médecin

Paramètres

Q : un très grand nombre

$dist_{jj'}$: distance séparant les patients j et j'

σ_j : heure d'appel du patient j

tt : durée de la visite

due_j : délai cible de visite du patient j

Variables

x_{jkp} : vaut 1 si le patient j est assigné à la position k de la liste du médecin p , sinon vaut 0

d_{kp} : distance à parcourir pour le médecin p jusqu'au patient à la position k dans sa liste

S_{kp} : heure du début de la $k^{\text{ème}}$ visite par le médecin p

T_j : valeur du retard si le patient j est vu après le délai-cible d_j

La fonction-objectif de notre modèle est la minimisation de la somme des temps T (ou délais) de visite pour chaque patient j , pour une tournée donnée : nous voulons que l'ensemble des visites soit réalisé dans le temps le plus court.

Le modèle mathématique s'écrit ainsi :

$$\text{Minimiser } \sum_{\forall j} T_j \quad [1]$$

contrainte par :

$$\sum_{\forall k} \sum_{\forall m} X_{jkm} = 1 \quad \forall j \quad [2]$$

$$\sigma_j \cdot X_{jkm} \leq S_{kp} \quad \forall k, p \quad [3]$$

$$S_{k-1,p} + tt + d_{k-1,p} \leq S_{kp} \quad \forall k, p \quad [4]$$

$$(X_{j,k-1,p} + X_{j'kp} - 1) \cdot \text{distance}_{j,j'} \leq d_{kp} \quad \forall j, j', k, p \quad [5]$$

$$S_{kp} + tt - \text{due}_j - Q(1 - X_{jkm}) \leq T_j \quad \forall j, k, m \quad [6]$$

$$x_{jkm} \in \{0,1\}, S_{kp} \geq 0, T_j \geq 0, d_{kp} \geq 0 \quad [7]$$

La fonction-objectif [1] est contrainte par plusieurs conditions.

La contrainte [2] définit l'assignation d'un patient j à un médecin p , et sa position dans la liste ordonnée de l'ensemble des visites à effectuer par ce dernier. La contrainte [3] date le début de la visite du patient en $k^{\text{ème}}$ position de la liste du médecin p . La contrainte [4] ajoute la durée de la visite tt du patient précédent $k - 1$ et le temps de trajet jusqu'à l'heure du début de la visite suivante, afin d'assurer un délai cible compatible avec l'enchaînement de deux visites par le même médecin. La contrainte [5] détermine la valeur de la distance d_{kp} séparant le médecin p du patient j' (situé en $k^{\text{ème}}$ position dans sa liste) lorsqu'il est chez le patient j . La contrainte [6] définit la valeur du retard sur le délai cible.

Enfin, [7] résume les valeurs pouvant être prises par les variables du modèle.

3.5. L'algorithme génétique : généralités et objectifs

Puisqu'une méthode exacte comme la MILP est susceptible d'entraîner des temps de calcul trop longs pour une configuration nécessitant des résultats rapides, et pour toutes les raisons explicitées précédemment, nous avons développé un algorithme génétique dont l'objectif

est de réduire les délais de réalisation des visites MPDSA. Pour rappel, ce type d'algorithme est basé sur les lois du vivant et de l'évolution, et utilise une population initiale de solutions candidates (appelées « chromosomes »), générées aléatoirement, qu'elle soumet à plusieurs opérations évolutives avant de sélectionner les plus efficaces.

Dans notre travail, chaque chromosome représente une séquence de patients dans une liste de visites. La partitionnement⁵⁴ des patients pour chaque MPDSA est d'abord effectuée par un algorithme de programmation dynamique. La population initiale s'élève à 1000 chromosomes. Après évaluation de chaque chromosome sur la somme des retards (délais d'arrivée au domicile de chaque patient), les opérateurs génétiques sont appliqués afin de produire une nouvelle génération de chromosomes, plus efficace que la génération parente sur les délais de réalisation des visites.

Nous détaillons ce processus dans les chapitres suivants.

3.5.1. Représentation et partitionnement des chromosomes

Les listes parentes, générées aléatoirement, peuvent ne pas être optimales en ce qui concerne la fonction-objectif du problème général (délais d'arrivée chez les patients). Cependant il est possible, dans un premier temps, de répartir les patients de façon optimale entre les MPDSA, afin de résoudre chaque sous-problème. Pour ce faire, nous utilisons dans un premier temps un algorithme de programmation dynamique, qui énumère de façon récursive les patients pouvant être consécutivement assignés à chaque MPDSA. Plus précisément, il évalue de manière récursive tous les cas possibles de traitement de l'ensemble des patients positionnés k et k' ($k < k'$) et affectés au médecin p . Les effectifs totaux sont de n patients et M médecins.

Nous définissons $f[k, p]$ comme la valeur minimale de la somme des retards⁵⁵ de l'affectation partielle des patients, pour chaque médecin p . Le patient k est le prochain patient à visiter ($k \leq n$ et $p \leq M$).

Dans un premier temps, nous établissons $f[0, 0] = 0$ et toutes les autres valeurs à l'infini, puis nous cherchons la valeur minimale de $f[n, M]$. Cette valeur minimale devient ainsi l'optimum de la somme des retards de la tournée.

Nous calculons les valeurs de la fonction à l'aide de la récursion suivante :

$$f[k; p] = \min_{k \in \{0, \dots, k\}} f[k'; p - 1] + \sum T_{j_{k'+1, \dots, k}}$$

⁵⁴ Le partitionnement consiste à diviser un ensemble en sous-ensembles nommés partitions

⁵⁵ Pour un travail donné i , une échéance d_i et une heure de complétude C_i , le retard est noté $T_i = \max\{0, C_i - d_i\}$. La somme des retards est notée $\sum T_i$.

dans laquelle $\sum T_{j_{k'+1, \dots, k}}$ représente la somme des retards de l'affectation des patients $k' + 1, \dots, k$ au médecin p .

3.5.2. Crossover

Une fois les patients répartis entre les MPDSA, ils sont organisés dans l'ordre croissant de la somme totale des retards afin de déterminer les deux meilleures séquences de listes de visites : ce sont les chromosomes parents. Ils sont divisés en 3 parties égales (ou quasi-égales si la liste est indivisible par 3).

Quatre chromosomes enfants sont issus du *crossover*. Les segments 1 et 3 de chaque chromosome parent (notés P1 et P2) sont copiés vers les segments 1 et 3 des enfants 1 et 2 (E1 et E2). Les segments médians de E1 et E2 sont remplis avec les gènes de P2 et P1, respectivement. L'ordre d'agencement des gènes après le *crossover* est établi selon la position de chacun des gènes dans les segments concernés. Si, au moment du *crossover*, un gène est déjà présent dans un segment, l'algorithme de programmation dynamique passe à la lecture du gène suivant et l'insère, si possible, dans l'ordre de lecture (Figure 30 et Figure 31).

Figure 30. Exemple de partitionnement dynamique pendant l'opération « crossover »

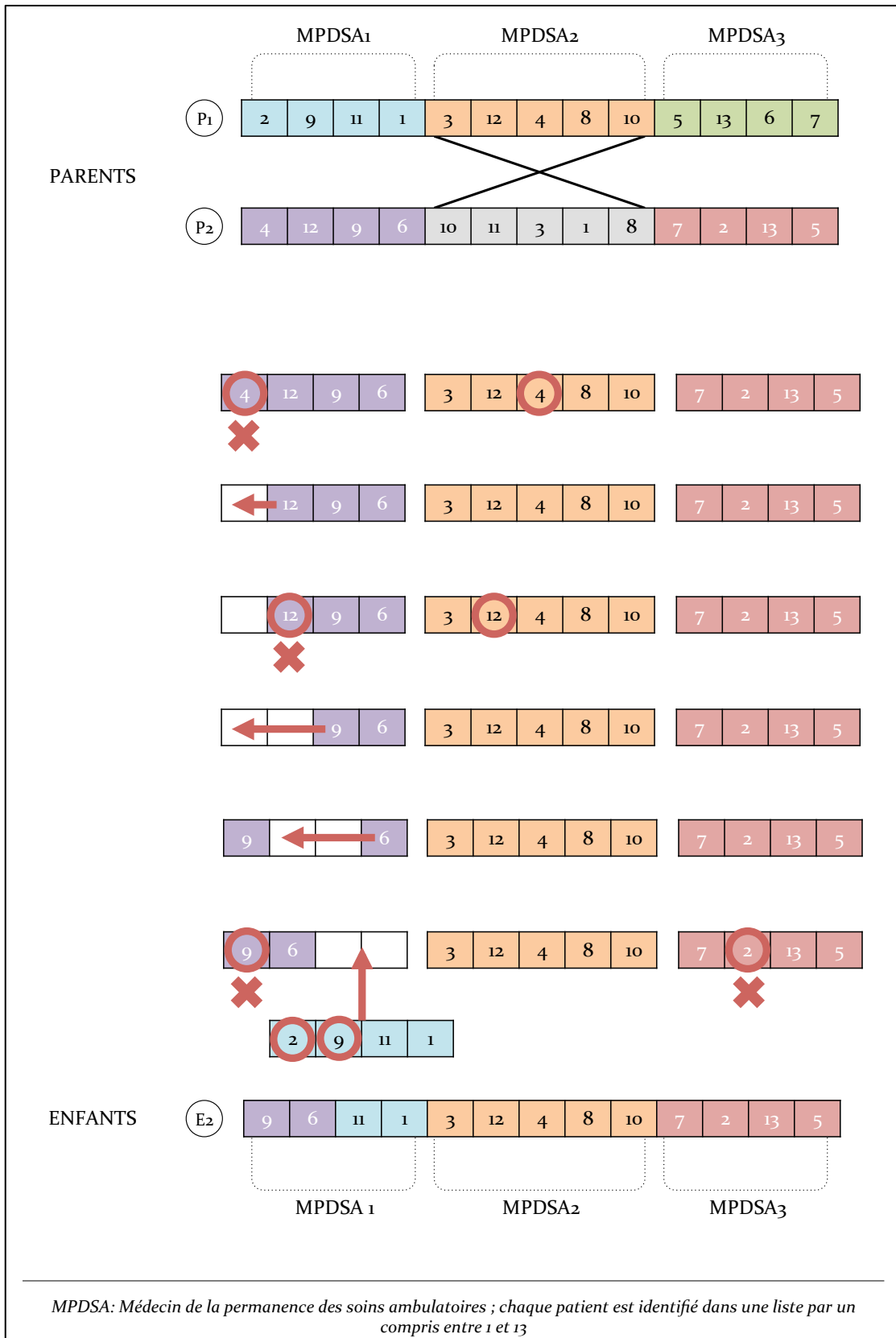
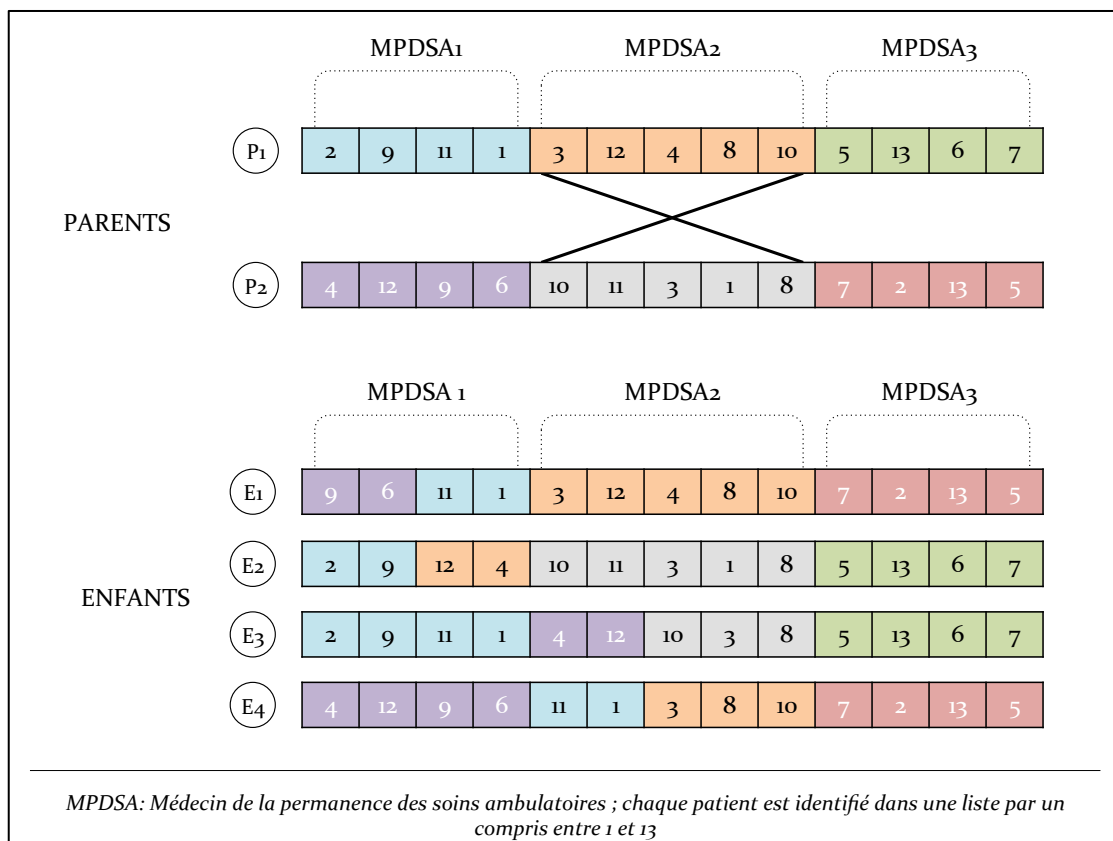


Figure 31. Résultats d'une opération « *crossover* » deux points, sur des listes de 13 patients partitionnées pour 3 MPDSA.



3.5.3. Mutation

L'opérateur mutation altère un ou plusieurs gènes dans la forme initiale d'un chromosome enfant, afin de chercher un ordre de visites plus optimal pour chaque MPDSA. Or, ce problème est rendu complexe par les contraintes d'heure d'appel, de localisation du patient et du degré de priorité attribué à chaque visite. Ainsi, l'algorithme génétique procède à la mutation des gènes selon trois mécanismes aléatoires d'organisation des patients : degré de priorité croissant, heure d'appel croissante, et distance MPDSA-patient décroissante.

3.5.4. Composition de la nouvelle génération et critères d'arrêt

Une fois que les chromosomes parents sont générés puis partitionnés de façon optimale, ils sont classés dans l'ordre croissant de leur somme des retards (de la meilleure séquence à la pire).

Ensuite, l'opérateur *crossover* est appliqué aux 200 premiers chromosomes, l'opérateur mutation aux 400 suivants, et les 200 derniers chromosomes sont aléatoirement remplacés par une nouvelle génération. L'algorithme est terminé à la fin de la limite de temps de calcul, fixée à 60 secondes, ou au bout de 500 itérations. Les étapes-clé du code informatique de l'algorithme sont synthétisées dans la Figure 32.

Figure 32. Synthèse du code de l'algorithme génétique

```
Initialize population with 1000 chromosomes;
Set iterNumber to 0 ;
while iterNumber < 500 do
    Evaluate the total tardiness of each chromosome with
the DP;
    Sort chromosomes in increasing order of their total
tardiness values;
    Crossover;
    Mutation;
    Regeneration;
    if The solution is improved then
        Set iterNumber to 0;
    else
        increment iterNumber by 1;
    end
end
```

3.6. Le langage informatique

Le langage choisi pour coder le modèle numérique développé dans ce travail est Java. Sa programmation est de type orienté objet, c'est-à-dire que son fonctionnement dépend de l'interaction de sous-ensembles logiciels (ou briques) représentant les objets étudiés et leurs interactions (par exemple un MPDSA et les visites à effectuer). Java a été inventé dans les années 1990 et présente de nombreux avantages :

- c'est un langage dit « managé », qui ne change pas avec la plateforme ou l'*operating system* (OS) : grâce à la virtualisation automatique de la machine sur laquelle le code est lancé, le code reste intact (contrairement aux langages non-managés, comme le C/C++, qui sont retranscrits dans des langages propres à l'OS).
- l'orientation objet, bien que plus lourde à la mise en place, garantit une plus grande stabilité et une maintenance plus simple
- la communauté d'utilisateurs est très importante ; de fait, il est constamment enrichi, amélioré, et il dispose d'une grande bibliothèque de ressources (telles que des interfaces de programmation applicatives (API) permettant l'adaptation du logiciel codé en Java à d'autres logiciels, qu'ils soient eux-mêmes codés en Java ou pas)
- il est utilisé par une très grande variété de plateformes (ordinateurs, serveurs, téléphones, systèmes embarqués etc.)
- il entretient une relation étroite avec internet : développé en même temps que le web, il vise à être compris par des machines très variées et à utiliser le moins de

bande passante possible ; il permet ainsi d'excellentes interfaces machines fixes / machines mobiles

- il est mis à disposition en *open source* (licence libre)

Tous ces avantages nous ont conduit à choisir ce langage de programmation pour créer le modèle numérique étudié. Ce dernier, une fois finalisé, pourrait donc être facilement intégré dans les logiciels de régulation des SAMU-Centre 15 et dans ceux des standards d'associations de PDSA (type SOS Médecins, Médecins à domicile, Médigarde etc.), ainsi que dans les interfaces mobiles utilisées par les MPDSA (téléphones, outils de navigation).

TROISIEME PARTIE

Résultats

1. DONNEES DE REGULATION MEDICALE ET VISITES PDSA

L'amélioration de la qualité des visites MPDSA dépend d'abord du processus de régulation médicale, qui doit viser à la juste compréhension du besoin du patient ainsi qu'à l'utilisation optimale des ressources à disposition.

Dans ce chapitre, nous rapportons les résultats descriptifs des visites MPDSA dans le Val-de-Marne, inconnus à ce jour, puis nous analysons les déterminants organisationnels de la qualité des DRM des patients pour qui une visite MPDSA est prescrite.

1.1. État des lieux dans le Val-de-Marne

Les données relatives à l'effectif mobile de la PDSA dans le Val-de-Marne sont issues de deux bases distinctes et complémentaires : celle du CRRA et celle de l'association Médecins à domicile. Les dossiers de régulation médicale du CRRA conclus par l'envoi d'un MPDSA comprennent les informations de base (identité, âge et adresse du patient), auxquelles sont associés le motif d'appel, les deux interrogatoires (ARM et médecin régulateur) et la décision finale.

La base de données de Médecins à domicile compile les visites missionnées par les deux canaux (standard privé et CRRA). Elle contient l'adresse et le motif de visite, mais également les heures de chaque étape, relevées *via* une application mobile (transmission de l'ordre de visite au MPDSA, acceptation, début et fin de visite). En raison de l'hétérogénéité de ces deux bases de données, et pour répondre aux recommandations de la HAS portant sur l'analyse des dossiers de régulation médicale, une analyse globale fine nous a paru difficilement réalisable. Dans ce chapitre, après description de la base de données globale, nous rapportons les résultats issus de l'analyse des dossiers du CRRA sélectionnés après application de la méthodologie RAM (cf.3.3.3, p.96).

1.1.1. Base de données globale

Entre le 01/01/2016 et le 31/12/2016, 15325 visites MPDSA ont été prescrites par le CRRA (65 %, n=9949) ou le standard de Médecins à domicile. Seuls 5090 dossiers (33 %) étaient complets (horaires et motifs). Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 3. On note que la majorité des appels était traitée entre 20h et 05h du matin, pour de la fièvre, des symptômes digestifs, respiratoires (toux) et ORL. Les délais renseignés étaient superposables à ceux décrits dans les études citées précédemment.

Les données disponibles, en raison de l'absence systématique de bilan clinique après réalisation de la visite, ne nous permettaient ni de décrire l'état des patients ni le diagnostic final retenu sur place.

Tableau 3. Typologie des motifs et horaires des appels conclus par une visite MPDSA dans le Val-de-Marne en 2016

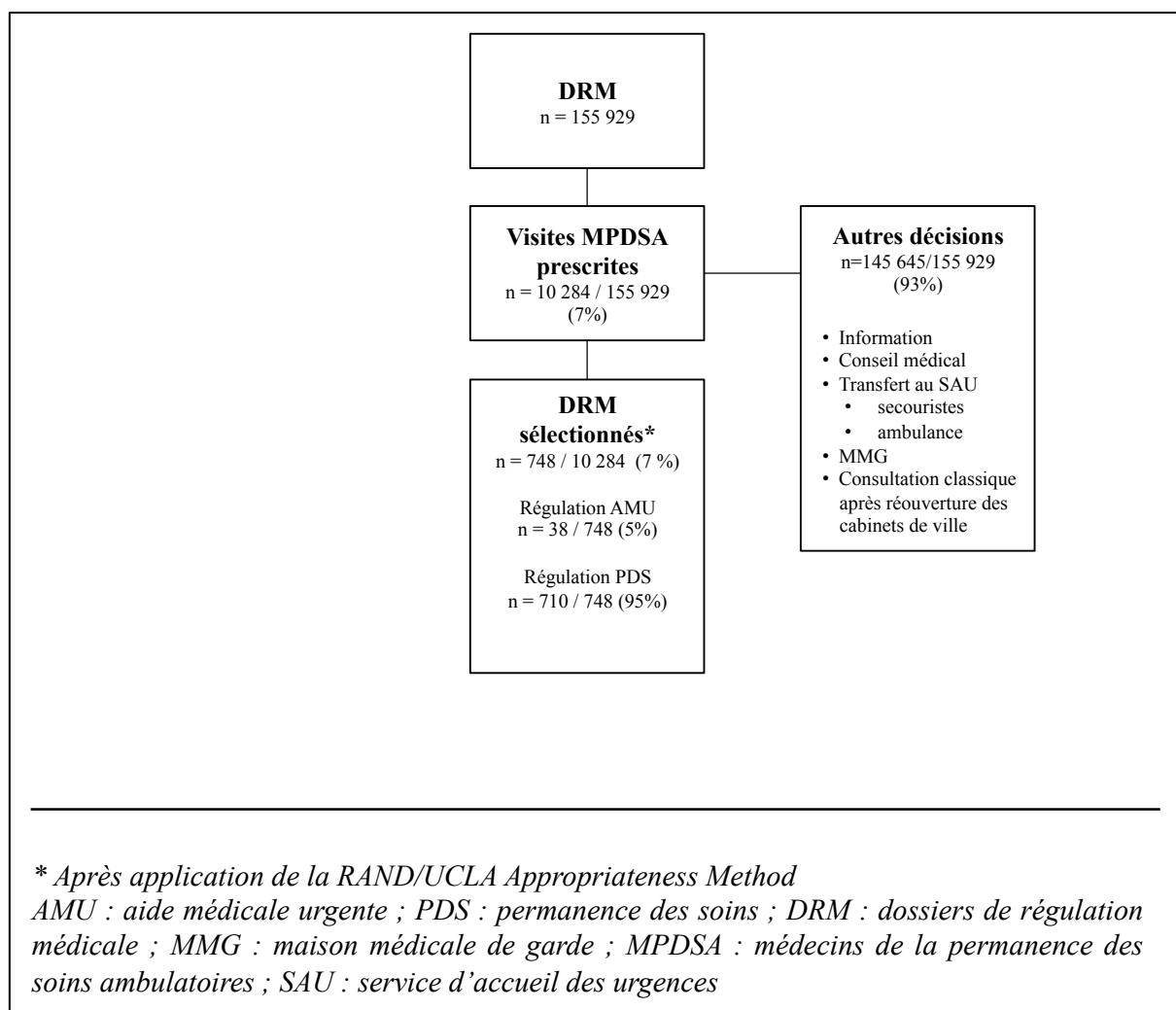
	médiane + IQR	N=5090
		n (%)
Heure d'appel	13h50 [07h45-20h]	
20h-00h		1285 (25)
00h-05h		1576 (31)
05h-13h		723 (14,5)
13h-20h		1500 (29,5)
Délai appel-arrivée (min)	113 [45-191]	
Délai appel-fin visite (min)	152 [123-202]	
Motif d'appel		
Fièvre		1501 (29,5)
Vomissements		387 (7,5)
Toux		382 (7,5)
Abdominal		315 (6)
Douleur de gorge		314 (6)
Otalgie		251 (5)
Diarrhée		164 (3)
Céphalée		142 (3)
Autre/divers		1634 (32)

1.1.2. Dossiers sélectionnés après application de la RAM

Sur 155 929 DRM créés au CRRA 94 en 2015, 10 284 étaient conclus par une décision de visite MPDSA (7 %). Les 5 041 visites restantes étaient réalisées via le standard de Médecins à domicile et ne transitaient pas par le CRRA 94 (cf. 1.1.1, p.111).

Sur les 10 284 DRM du SAMU-Centre 15, l'application de la RAM a conduit à la sélection de 748 dossiers (7 %). La majorité d'entre eux était réglée par des médecins PDS (95 %) (Figure 33).

Figure 33. Sélection des dossiers de régulation médicale conclus par une visite MPDSA en 2015 dans le Val-de-Marne : diagramme de flux



1.1.3. Motifs de visite

L'analyse des 748 DRM sélectionnés montre que les motifs de visite MPDSA les plus fréquents étaient une symptomatologie digestive (22 %), ORL, cardiovasculaire, respiratoire ou dorsolombaire (6 % chacune). La fièvre apparaissait comme motif unique dans 19 % des cas. 5 % des visites étaient effectuées pour malaise (Tableau 4).

Tableau 4. Motifs de visite MPDSA en 2016 dans le Val-de-Marne (après relecture systématique des DRM et recodification d'après l'ICPC-2)

Motif	Code ICPC-2	N=748	%	IC 95%
Symptômes digestifs		163	22	[19-25]
Douleurs abdominales	D01-03;D06	84	11	[9-14]
Vomissements	D10	52	7	[5-9]
Diarrhée	D11	27	4	[2-5]
Fièvre	A03	141	19	[16-22]
ORL		49	6	[5-9]
Cardiovasculaire		49	6	[5-9]
Douleur thoracique	A11	26	3	[2-5]
Palpitations	K04	12	1	[1-3]
Hypertension	K86,KB7	11	2	[1-3]
Symptômes respiratoires		45	6	[4-8]
Toux		25	3	[2-5]
Dyspnée		20	3	[2-4]
Symptômes dorsolombaires		44	6	[4-8]
Sans irradiation	L84	43	6	[4-8]
Avec irradiation	L86	1	<1	-
Malaise		41	5	[4-7]
Lipothymie/syncope	A06	35	5	[3-6]
Asthénie	A04	6	1	[0-2]
Autres ou données manquantes		216	30	[26-32]

MPDSA : médecins de la permanence des soins ambulatoires, ORL: oto-rhino-laryngologie, IC 95% : intervalle de confiance à 95%

1.2. Qualité du dossier de régulation médicale

Les renseignements figurant dans un DRM sont le reflet de la qualité de l'information recueillie puis transmise aux effecteurs, elle-même garante de l'utilisation raisonnée des ressources du système de la PDSA. Les contraintes du problème de l'optimisation du trajet des MDSA requièrent au moins la présence d'un motif de visite, d'un niveau de gravité/de priorité et d'un délai cible. Ces derniers doivent donc figurer dans le DRM pour être implémentés dans une solution d'optimisation telle que le modèle numérique présenté dans notre travail, puis transmis aux effecteurs.

En effet, l'efficacité d'une méthode d'optimisation basée sur la participation active d'intermédiaires humains repose sur son acceptabilité (178), qui dépend elle-même de l'adéquation entre les pratiques réelles et les contraintes imposées. En ingénierie, ceci peut être illustré par les premières étapes de la réalisation d'un projet : état de l'existant, identification et expression des besoins du client, établissement des objectifs, identification des risques de développement et analyse de la faisabilité. Dans notre problème, l'information utilisée par le modèle numérique est majoritairement renseignée par les médecins régulateurs du CRRA, *via* le logiciel de régulation médicale. Le principal risque encouru par notre méthode est de donc ne pas être suffisamment renseignée, soit parce que l'interface serait inadaptée, mal intégrée ou mal acceptée, soit parce que les médecins régulateurs, en pratique courante, ne rempliraient pas suffisamment les DRM, n'autorisant qu'une faible précision au modèle.

Dans cette partie préliminaire, nous décrivons ainsi les résultats de l'analyse de la qualité du contenu des DRM conclus par l'envoi d'un MPDSA dans le Val-de-Marne, et des facteurs associés à une réduction de cette qualité. Cette étude transversale, monocentrique, nous permettra ensuite de discuter les risques liés au développement et à la mise en pratique de notre modèle numérique.

1.2.1. Méthode

Étude transversale, monocentrique, concernant les DRM conclus par une décision « visite MPDSA » au SAMU 94 entre le 01/01/2015 et le 31/12/2015. La sélection des DRM à analyser était effectuée après application de la RAM précédemment décrite. Les modalités de codage des motifs de visite après relecture systématique de l'ensemble des DRM sélectionnés sont reprises au 3.3.3.3 (p.98).

1.2.1.1. Les déterminants de l'efficacité du processus de la PDSA

Les déterminants de l'efficacité des visites MPDSA sont nombreux, et peuvent être schématiquement répartis en deux grands groupes complémentaires : 1) celui lié au processus global de régulation, et 2) celui lié à l'effection mobile.

En ce qui concerne la régulation dans les CRRA ou équivalent, plusieurs déterminants sont suspectés de ou connus pour altérer la qualité du service, au travers d'une augmentation de la charge de travail absolue (nombre d'appels entrants), relative (diminution des effectifs professionnels), d'une demande imprécise ou de la survenue d'événements exceptionnels (179). Certains facteurs temporels sont liés à des fluctuations significatives de la charge de travail, comme les épidémies virales (grippe, gastro-entérite aiguë, varicelle, etc.) ou les périodes non ouvrées (vacances, jours fériés) (180).

1.2.1.2. Variables

Les variables utilisées pour l'analyse de la qualité des DRM étaient les effectifs d'ARM et de MPDSA, le taux de charge et la productivité mensuelle des ARM et des médecins régulateurs (taux de charge = rapport temps de communication sur temps de présence effective ; productivité = nombre d'appels traités par heure par un agent), la durée moyenne d'appel (ARM et médecin régulateur) les données patient (âge [< 15 , $15-64$, > 65 ans], sexe, motif d'appel [cf. Tableau 4]), les données contextuelles (heure [00h-04h, 04h-08h, 20h-00h] et jour d'appel [semaine, week-end, jour férié, vacances]), l'interrogatoire médical, l'hypothèse diagnostique, les critères de gravité et la décision après réalisation de la visite.

1.2.1.3. Critères de jugement

Les critères de jugement étaient définis par l'absence d'interrogatoire, l'absence d'hypothèse diagnostique, et l'absence de critères de gravité dans les DRM.

1.2.1.4. Gestion des données et analyse

Nous avons d'abord réalisé une analyse descriptive des motifs de visite (cf. Tableau 4) et des critères de qualité des DRM. Les variables catégorielles étaient reportées en pourcentages (%) et intervalles de confiance à 95 % (IC95), les variables continues en moyenne \pm déviation standard ou médiane + interquartile [IQR]. Après en avoir testé la linéarité, les variables continues ont été catégorisées. Trois tours d'analyse univariée, par régression logistique, ont été utilisés (un par critère de jugement).

Pour l'analyse multivariée, les odds-ratio (OR) étaient rapportés avec leur IC95. Les modèles de régression logistique multivariée étaient ajustés sur les variables associées à une

p-value < 0.2 après analyse univariée, et sur les variables connues pour (ou être suspectées de) être associées aux critères de jugement, comme les caractéristiques patient (âge, sexe, type d'appelant (patient, proche, autre)) ou les variables contextuelles (jour et heure d'appel).

Après avoir testé la colinéarité des variables d'un même groupe, chaque variable relative au CRRA était incluse dans l'analyse multivariée. De façon superposable à l'analyse univariée, trois modèles de régression logistique multivariée ont été conduits (un pour chaque critère de jugement).

Tous les tests statistiques étaient bilatéraux, au risque alpha 0.05, et effectués par Stata 13 (StataCorp, College Station, TX).

1.3. Résultats

1.3.1. Population et motifs de visite

Les 748 DRM analysés étaient répartis pendant 30 jours aléatoirement sélectionnés d'après les facteurs de stratification décrits au 3.3.3.5.1 (p.101) (19 jours fériés ou vacances, 2 jours de week-end et 9 jours de semaine).

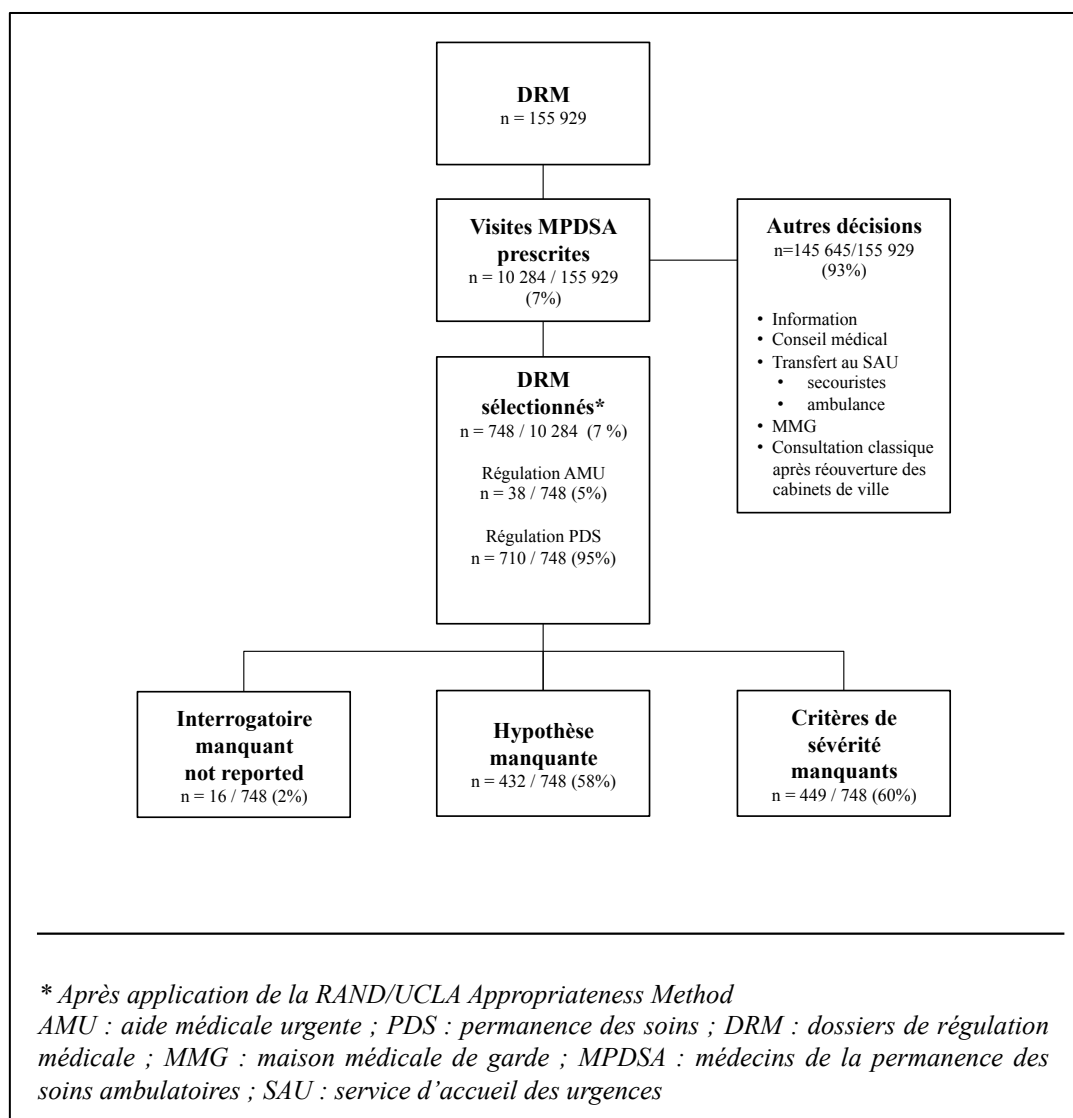
Au total, 455 appelants étaient des femmes (61 %), d'âge médian 33 ans [8-58]. Lorsque les patients étaient âgés de moins de 15 ans, leur âge médian était de 2 ans [1-6]. Les appelants étaient principalement des témoins ou des proches (58 %) ou les patients eux-mêmes (31 %). Seuls 6 % des appels étaient passés par des effecteurs secouristes ou urgentistes. Les appels étaient surtout reçus avant minuit (61 %).

Les motifs de visite sont synthétisés en 1.1.3 (p.113).

1.3.2. Critères de qualité

L'interrogatoire médical était absent dans 16 DRM (2 % [1.2-3.4]). L'hypothèse diagnostique n'était pas explicitement formulée par le médecin régulateur dans 58 % [54-61] des DRM, et les critères de gravité ne figuraient pas dans 40 % [31-49] des dossiers. Seuls 2 % [1-3] des dossiers possédaient tous les critères de qualité, tandis que 1 % [0.5-2.3] d'entre eux n'en présentaient aucun (Tableau 5).

Tableau 5. Critères de qualité des dossiers de régulation médicale conclus par une visite MPDSA en 2015 dans le Val-de-Marne : diagramme de flux



1.3.3. Analyse univariée

En analyse univariée, les facteurs associés au critère « interrogatoire absent » étaient : un appel reçu pendant un jour férié (référence : jour de semaine, OR 14.7 [2.9-73.2]), la durée d'appel pour les ARM (référence $\leq 48s$, OR 1.1 [1.1-1.1]) et le taux de charge des médecins régulateurs (référence $\leq 33.7\%$, OR 0.5 [0.3-0.9]) ($p < 0.02$).

Les facteurs associés au critère « hypothèse diagnostique absente » étaient : un âge < 15 ans (OR 1.5 [1.0-2.1]), un motif de visite digestif (référence : général, OR 1.5 [1.1-2.3]), un nombre d'appels traités par les médecins régulateurs élevé (référence ≤ 9700 , OR 0.8 [0.7-0.9]), la durée d'appel (ARM : référence $\leq 48s$, OR 1.1 [1.1-1.1]), médecins régulateurs : référence $\leq 147s$, OR 1.2 [1.1-1.3]), et le taux de charge des médecins régulateurs (référence $\leq 33.7\%$, OR 0.8 [0.7-0.9]) ($p < 0.05$).

Les facteurs associés au critère « critères de gravité absents » étaient : l'heure de réception de l'appel (référence : 20h-00h, OR 0.6 [0.4-0.8]), un appel reçu pendant le week-end (référence : jour de semaine, OR 0.5 [0.3-0.9]), la taille de l'effectif ARM au CRRA (référence : 3, OR 1.2 [1.1-1.4]), le nombre d'appels traités par les ARM (référence ≤ 30000 , OR 1.2 [1.1-1.3]) et par les médecins régulateurs (référence ≤ 9700 , OR 1.2 [1.1-1.4]), la durée d'appel ARM (référence $\leq 48s$, OR 1.2 [1.1-1.4]) et le taux de charge des ARM (référence $\leq 26.2\%$, OR 1.3 [1.1-1.5]) ($p < 0.05$) (Tableau 6).

1.3.4. Analyse multivariée

En analyse multivariée, la durée d'appel ARM (référence $\leq 47s$) était le seul facteur associé à l'absence d'interrogatoire (OR 12.9 [2.3-72.5]) et à l'absence d'hypothèse diagnostique (OR 2.1 [1.2-3.7]).

Avec le taux de charge des ARM (référence $\leq 26.2\%$, OR 1.8 [1.1-3.1]), la durée d'appel ARM était également associée à l'absence de critères de gravité (OR 1.8 [1.3-2.5]) (Tableau 7).

1.4. Discussion

1.4.1. Résumé

Seuls 2 % des DRM des patients ayant reçu la visite d'un MPDSA au décours d'un appel reçu et traité par le CRRA du Val-de-Marne en 2015 possédaient tous les critères de qualité étudiés. En analyse univariée, les variables individuelles telles que l'âge, le sexe, le type d'appelant ou le motif de visite n'étaient pas associées à une moindre qualité de remplissage des DRM après régulation médicale. Les facteurs associés à un remplissage incomplet des DRM étaient organisationnels (effectifs, nombre d'appels reçus, taux de charge). Seules les variables liées aux ARM restaient significativement associées aux critères de jugement après analyse multivariée.

Tableau 6. Facteurs associés à l'absence d'interrogatoire, l'absence d'hypothèse, et l'absence de critères de sévérité dans les DRM analysés (analyse univariée)

	Interrogatoire absent n = 16/748		Hypothèse absente n = 432/748		Sévérité absente n = 449/748	
	uOR [95% CI] ^x	p ⁺	uOR [95% CI] ^x	p ⁺	uOR [95% CI] ^x	p ⁺
Caractéristiques patient						
Sexe, référence masculin	1.3 [0.4-3.8]	ns	1.1	ns	0.9 [0.7-1.2]	ns
Age, années		ns		ns		ns
Nourrisson < 1	0.9 [0.1-8.2]		0.8 [0.4-1.4]		0.8 [0.5-1.5]	
Enfant < 15	0.9 [0.2-3.5]		1.5 [1.0-2.1]		1.2 [0.8-1.7]	
Adulte 15-64	Ref.		Ref.		Ref.	
Adulte ≥ 65	1.1 [0.3-3.8]		1.3 [0.9-1.8]		1.3 [0.9-1.8]	
Appelant		ns		ns		ns
Patient	Ref.		Ref.		Ref.	
Témoin/proche	0.3 [0.1-1.0]		1.2 [0.8-1.6]		1.1 [0.8-1.5]	
Autre	1.2 [0.3-4.8]		1.3 [0.8-2.3]		1.0 [0.6-1.8]	
Motif de visite		ns		ns		ns
Cardiovasculaire	2.5 [0.3-21.5]		1.2 [0.5-2.8]		0.4 [0.2-0.9]	
Digestif	1.3 [0.3-5.1]		1.5 [1.1-2.3]		0.9 [0.6-1.4]	
Général	(ref)		(ref)		(ref)	
Ostéoarticulaire	0.9 [0.1-7.3]		0.8 [0.5-1.4]		1.3 [0.7-2.1]	
Respiratoire	2.8 [0.5-14.2]		0.6 [0.3-1.1]		1.3 [0.7-2.4]	
Motif potentiellement grave^a	2.3 [0.6-8.2]	ns	0.8 [0.5-1.3]	ns	0.8 [0.5-1.3]	ns
Heure et jour						
Heure d'appel		ns		ns		*
20:00-00:00	Ref.		Ref.		Ref.	
00:00-04:00	1.1 [0.3-3.3]		0.8 [0.6-1.2]		0.6 [0.4-0.8]	
04:00-08:00	0.8 [0.2-3.6]		1.1 [0.7-1.6]		0.8 [0.5-1.3]	
Jour		*		ns		ns
Semaine	Ref.		Ref.		Ref.	
Weekend	0.8 [0.1-7.2]		1.1 [0.6-1.9]		0.5 [0.3-0.9]	
Jour férié	14.7 [2.9-73.2]		0.8 [0.3-2.2]		0.8 [0.3-2.3]	
Vacances	1.1 [0.3-3.8]		0.9 [0.7-1.3]		0.7 [0.5-1.1]	
CRRA						
Effectifs						
ARM, n						
3	Ref.		Ref.		Ref.	
>3	0.9 [0.6-1.4]	ns	0.9 [0.8-1.1]	ns	1.2 [1.1-1.4]	*
Charge de travail						
Appels reçus (mensuels), n						
<i>ARM</i>						
≤ 30,000	Ref.		Ref.		Ref.	
> 30,000	0.8 [0.5-1.3]	ns	0.9 [0.8-1.1]	ns	1.2 [1.1-1.3]	*
<i>Médecins régulateurs</i>						
≤ 9,700	Ref.		Ref.		Ref.	
> 9,700	0.8 [0.5-1.3]	ns	0.8 [0.7-0.9]	*	1.2 [1.1-1.4]	*
Durée d'appel, s (moyenne)						
<i>ARM</i>						
≤ 48	Ref.		Ref.		Ref.	
> 48	1.1 [1.1-1.1]	*	1.1 [1.1-1.1]	**	1.1 [1.1-1.1]	*
<i>Médecins régulateurs</i>						
≤ 147	Ref.		Ref.		Ref.	
> 147	1.3 [0.8-2.5]	ns	1.2 [1.1-1.3]	*	1.1 [0.9-1.1]	ns
Taux de charge, %						
<i>ARM</i>						
≤ 26.1	Ref.		Ref.		Ref.	
> 26.1	0.9 [0.5-1.3]	ns	0.9 [0.8-1.1]	ns	1.3 [1.1-1.5]	**
<i>Médecins régulateurs</i>						
≤ 33.7	Ref.		Ref.		Ref.	
> 33.7	0.5 [0.3-0.9]	*	0.8 [0.7-0.9]	*	1.1 [1.0-1.3]	ns
Effection						
MPDSA (effectif), n						
1	Ref.		Ref.		Ref.	
> 1	1.0 [0.6-1.6]	ns	1.1 [0.9-1.2]	ns	1.1 [1.0-1.3]	ns

CRRA : centre de réception et de régulation des appels, MPDSA : médecin de la permanence des soins ambulatoires, uOR: odds ratio non ajustés, x: régression logistique; +: Wald test

^a: cardiac (chest pain, palpitations, dizziness/fainting/syncope), respiratory (acute dyspnea) or neurological (fainting, seizures, acute headache, meningitis syndrome), ns: non significatif, *: p<0,05, **: p< 0,001

Tableau 7. Facteurs associés à l'absence d'interrogatoire, l'absence d'hypothèse, et l'absence de critères de sévérité dans les DRM analysés (analyse multivariée, ajustée sur les caractéristiques patient, le jour et l'heure d'appel, et le motif de visite)

	Interrogatoire absent n = 16/748		Hypothèse absente n = 432/748		Sévérité absente n = 449/748	
	aOR [95% CI] ^x	p ⁺	aOR [95% CI] ^x	p ⁺	aOR [95% CI] ^x	p ⁺
CRRRA						
Effectifs						
ARM, n						
3	Ref.		Ref.		Ref.	
>3	0.6 [0.3-1.2]	ns	0.8 [0.7-1.0]	ns	1.2 [0.4-3.0]	ns
Charge de travail						
Appels reçus (mensuels), n						
<i>ARM</i>						
≤ 30,000	Ref.		Ref.		Ref.	
> 30,000	1.5 [0.4-6.7]	ns	1.0 [0.7-1.4]	ns	1.3 [0.9-2.0]	ns
<i>Médecins régulateurs</i>						
≤ 9,700	Ref.		Ref.		Ref.	
> 9,700	2.0 [0.5-8.0]	ns	0.8 [0.6-1.2]	ns	1.3 [1.1-1.5]	ns
Durée d'appel, s (moyenne)						
<i>ARM</i>						
≤ 48	Ref.		Ref.		Ref.	
> 48	12.9 [2.3-72.5]	*	2.1 [1.2-3.7]	*	1.8 [1.1-3.1]	*
<i>Médecins régulateurs</i>						
≤ 147	Ref.		Ref.		Ref.	
> 147	2.29 [0.7-11.5]	ns	1.3 [0.9-1.9]	ns	1.0 [0.7-1.4]	ns
Taux de charge, %						
<i>ARM</i>						
≤ 26.1	Ref.		Ref.		Ref.	
> 26.1	1.7 [0.5-6.0]	ns	0.9 [0.7-1.3]	ns	1.8 [1.3-2.5]	**
<i>Médecins régulateurs</i>						
≤ 33.7	Ref.		Ref.		Ref.	
> 33.7	0.3 [0.1-1.2]	ns	0.7 [0.5-1.1]	ns	1.1 [0.8-1.5]	ns

CRRRA : centre de réception et de régulation des appels, MPDSA : médecin de la permanence des soins ambulatoires, aOR: odds ratio ajustés, x: régression logistique, +: Wald test, ns: non significatif, *: p<0,05, **: p< 0,001

1.4.2. Comparaison avec les données de la littérature

En ce qui concerne les motifs de visite MPDSA, nos résultats étaient globalement similaires à d'autres études européennes (181). Les facteurs organisationnels, tels que la charge de travail, sont décrits comme responsable de l'altération d'une procédure urgente donnée (182) et devraient être anticipés afin d'améliorer l'efficacité du système en question.

Notre étude suggère que seuls des facteurs liés aux ARM affectent la qualité du contenu du DRM. Ceci peut être expliqué par le fait qu'un interrogatoire ARM prolongé témoigne possiblement de difficultés initiales (interrogatoire peu ou pas structuré et/ou lacunes de communication) qui sont ensuite discutées, puis surmontées, avec le médecin régulateur pendant le transfert d'appel (183). Les médecins régulateurs pourraient ainsi bénéficier d'informations non enregistrées (et non analysées) dans notre étude. De plus, la durée d'interrogatoire ARM est possiblement directement liée à la quantité d'information recueillie puis transmise au médecin régulateur, permettant à ce dernier de mieux conduire son propre interrogatoire et/ou de remplir le DRM (184). En cas d'interrogatoire ARM présenté comme particulièrement difficile, le médecin régulateur pourrait être amené à se contenter des informations-clés, telles que l'hypothèse diagnostique et l'existence de signes de gravité. Enfin, comparativement au personnel

non-médical, et en raison de possibles disparités de structure de communication et de processus décisionnel, les médecins régulateurs pourraient avoir besoin d'un temps de régulation téléphonique plus court jusqu'à la prescription d'une visite MPDSA (185).

Deux études hollandaises ont rapporté une mauvaise qualité de régulation médicale lors de l'équivalent de la PDS (186,187) : bien que les données cliniques étaient quasi systématiquement renseignées dans le DRM, moins de 30 % des questions obligatoires étaient posées, les antécédents médicaux manquaient dans plus de la moitié des dossiers, le degré d'urgence/de priorité était sous-estimé dans 41 % des appels, les données relatives aux conseils et aux conditions de rappel/de surveillance n'étaient remplies que dans 40 % des dossiers, l'évaluation clinique téléphonique était imparfaite et la décision prise au décours de la régulation n'était appropriée que pour 58 % des patients. De plus, certaines questions non posées durant l'entretien apparaissaient écrites dans les DRM. Toutefois, l'une de ces études ne traitait que de la régulation non-médicale (ARM ou *triagists*) sur des appels simulés, passés anonymement par des professionnels de santé entraînés. De façon similaire à nos résultats, les variables individuelles (y compris le motif d'appel) n'étaient pas associées à de moins bons résultats, suggérant que les systèmes étudiés étaient équitables.

Les données françaises relatives à la régulation médicale demeurent rares, à ce jour et à notre connaissance, et traitent majoritairement de l'influence d'événements uniques sur l'activité des CRRA (188). D'après une étude monocentrique datant de 2017, et ayant pour objectif l'analyse des variables responsables d'une altération des indicateurs-clés de performance du CRRA, le principal facteur responsable de l'augmentation du temps de décroché était le taux de charge des ARM (189). Cette étude suggérait par ailleurs l'existence de tendances temporelles significatives sur la variation du nombre d'appels entrants, particulièrement entre 20h et minuit. Nos résultats convergeaient avec ces derniers (61 % des appels étant reçus entre 20h et minuit).

En Europe, la régulation téléphonique n'est pas standardisée (190). À ce jour, la régulation médicale systématique, telle qu'effectuée en France, ne repose pas sur des données de haut niveau de preuve. Elle n'a de toute façon pas été évaluée en termes de qualité de remplissage du DRM, mais plutôt sur la sécurité et l'efficacité du processus (191–193). Comparée à une régulation infirmière, la régulation médicale, malgré l'existence de différences de processus décisionnel et de collecte d'information, a montré des résultats similaires, sauf dans des situations complexes (194,195), suggérant que la composition optimale des effectifs d'un CRRA pourrait être mixte (196). L'organisation, la qualité et la sécurité de la régulation téléphonique restent ainsi sujets à débat et doivent être évaluées par des études à la méthodologie robuste (197).

1.4.3. Forces et limites

Notre étude est, à notre connaissance, la première à évaluer la qualité du remplissage des DRM conclus par une visite MPDSA après régulation médicale dans un CRRA. Elle décrit et analyse un spectre large du processus de prescription d'une visite MPDSA, et apporte des renseignements sur les facteurs qui influencent négativement la qualité de remplissage des DRM.

L'une de ses limites principales repose dans son caractère monocentrique qui en limite la validité externe. Cependant, puisque le logiciel de régulation médicale est identique entre les quatre SAMU de Paris et de la petite couronne (75, 92, 93, 94), le remplissage des DRM pourrait être influencé de façon similaire dans chacun de ces centres par des facteurs liés à l'ergonomie du système. De plus, puisque plusieurs médecins régulateurs du CRRA 94 partagent leur activité entre plusieurs de ces centres franciliens, il pourrait ne pas exister d'effet-centre sur les critères de jugement étudiés.

Bien que notre étude suggère que les données individuelles n'influencent pas la qualité de remplissage des DRM conclus par une visite MPDSA, et en raison du faible nombre de données étudiées et des limites dues au *data mining*, il nous semble difficile de conclure formellement à ce sujet.

La qualité du remplissage des DRM pourrait ne pas être liée à la qualité de l'interrogatoire oral. Les raisons pour lesquelles la qualité de remplissage dépendait exclusivement de facteurs liés aux ARM restent peu claires. En l'absence d'une analyse qualitative du processus global de régulation dans un CRRA, certains facteurs explicatifs pourraient demeurer cachés.

Enfin, le choix des critères de jugement était basé sur les recommandations de la HAS relatives au traitement d'un appel de demande de soins non programmés. Leur nombre et leur type pourraient être insuffisants ou inadaptés pour répondre à la question posée, notamment en raison des modalités de codage du critère « absence de signes de gravité », considéré négatif dès lors qu'un seul item sur plusieurs possibles était présent (par exemple pour une céphalée, « pas de purpura » seul, sans « pas de syndrome méningé » ni « pas de signe de localisation »). Ce mode de codage prenait en compte la recherche de signes de gravité, pas leur exhaustivité, en supposant que certains items manquants à l'écrit pouvaient avoir été demandés à l'oral.

1.4.4. Implications générales

1.4.4.1. Pour la recherche

Puisque d'après nos résultats, la qualité de remplissage du DRM semble dépendre de la charge de travail des ARM au CRRA (effectifs, nombre d'appels entrants, taux de charge), il convient premièrement d'identifier les facteurs associés à une augmentation de celle-ci, puis d'en modéliser et d'en prédire les variations (188,198). Ceci permettrait ensuite d'évaluer l'efficacité de

mesures correctives et anticipatoires (rappel de personnel, méthodes de régulation modifiées, algorithmes d'aide à la décision lors de fonctionnements dégradés, etc.) (199,200).

Deuxièmement, il faudrait identifier les facteurs individuels du personnel du CRRA associés à une dégradation de la qualité de remplissage des DRM, afin de mieux repérer les configurations sous-optimales (stress, fatigue, agacement, conflits téléphoniques et/ou humains au sein du CRRA, etc.) (201). Des études qualitatives devraient être conduites en vue d'analyser l'influence des facteurs humains affectant le processus de régulation au CRRA, depuis la réception de l'appel jusqu'à la décision finale, en passant par les interrogatoires (ARM et médecins) et les transmissions orales.

Troisièmement, les facteurs de mauvaise qualité de remplissage (et/ou de régulation) relevant possiblement de l'ordre de la formation initiale et/ou continue, il nous semble pertinent d'évaluer l'intérêt et l'efficacité de mesures formatrices au sein du personnel des CRRA.

1.4.4.2. *Pour la pratique*

En pratique, notre étude pourrait aider à l'établissement de mesures correctives au CRRA, comme premièrement, l'augmentation ciblée des effectifs basée sur les pics d'activité (en particulier les jours fériés). Deuxièmement, après avoir été informé des résultats de notre étude, le personnel du CRRA pourrait suivre des formations pratiques d'amélioration de remplissage des DRM. Les critères de qualité doivent être mieux remplis, et l'état du clinique du patient après évaluation par le MPDSA, ainsi que la décision finale au décours de la visite de ce dernier, devraient être systématiquement renseignés.

Ce processus d'amélioration des pratiques apparaît indispensable, en ce que le personnel des CRRA doivent être conscients de l'importance d'une bonne traçabilité vers une meilleure qualité de la chaîne de soins, ainsi que des conséquences médico-légales potentielles liées à un remplissage imparfait.

1.4.5. Implications pour notre travail principal

En ce qui concerne le modèle numérique d'optimisation du trajet MPDSA dont nous discutons dans ce travail, l'étude sur la qualité de remplissage des DRM apporte plusieurs informations importantes qu'il faudra prendre en compte lors du développement d'une éventuelle interface.

1.4.5.1. *Les contraintes du modèle*

L'échantillon de DRM analysés suggère que plusieurs contraintes envisagées pour le modèle numérique sont mal renseignées en pratique courante. En effet, seuls 42 % des dossiers

comprenaient une hypothèse diagnostique écrite en clair, tout comme seulement 40 % rapportaient au moins un signe de gravité.

Les délais cible n'ayant pas été analysés pour des raisons pratiques (accord oral, estimation jamais confrontée à un retour d'information), il nous est impossible de conclure à leur sujet.

Ces données suggèrent qu'en l'état actuel des pratiques, les contraintes du modèle numérique seraient mal renseignées par les médecins régulateurs, ce qui pourrait conduire à une efficacité réduite en vie réelle.

1.4.5.2. *L'adaptation aux conditions réelles*

Face aux résultats de notre première étude, plusieurs hypothèses puis propositions peuvent être formulées au sujet de l'applicabilité pratique du modèle numérique et de son interface. Premièrement, le remplissage manuel du DRM constitue possiblement une surcharge de travail lors des pics d'activité. Le texte libre semble être une limite à la faisabilité du processus (étape chronophage, ergonomie réduite, évolution hautement dynamique de l'information lors de l'entretien oral, activités multitâche, etc.) et ne doit donc probablement pas être proposé pour l'utilisation et l'implémentation du modèle numérique discuté dans notre travail.

Deuxièmement, le codage final du motif de visite MPDSA, tel que proposé par l'actuel logiciel de régulation des CRRA de l'AP-HP, est imparfait et souvent mal ajusté à la situation réelle (code « pédiatrie » pour un diagnostic « gastro-entérite aiguë »). Ceci pourrait s'expliquer, d'une part, par l'incomplétude et la non-spécificité de la classification utilisée (CIM-10, cf.3.3.3.3.2, p.98), et d'autre part par une ergonomie limitée entraînant une perte de temps (réelle ou ressentie par les médecins régulateurs). Il est également possible que l'intérêt d'un code diagnostique (ou du remplissage d'une hypothèse diagnostique en texte libre) soit mal perçu par les médecins régulateurs, ces derniers estimant par exemple que l'enregistrement des entretiens oraux suffit à obtenir une qualité de DRM satisfaisante. Or, le processus optimal d'une visite MPDSA repose sur l'identification au plus juste des besoins du patient, dont l'hypothèse diagnostique conditionne la prise en charge adaptée, *via* des transmissions précises à l'effecteur mobile (priorité, délai cible, devenir, suivi, etc.). Il nous apparaît ainsi indispensable que notre modèle numérique, ainsi qu'une éventuelle interface, ne proposent qu'un nombre réduit de classes d'hypothèses diagnostiques (comme « affection digestive », « virose », « dyspnée », « douleur thoracique », etc.). En effet, la quantité d'information nécessaire au choix de la meilleure prise en charge d'un patient donnée ne dépend pas seulement du diagnostic envisagé, mais bien d'un faisceau plus global associant un délai cible ainsi qu'un niveau de priorité (réel ou ressenti par le régulateur).

Troisièmement, notre modèle numérique devrait être simple à utiliser, intégré au logiciel de régulation. La prescription d'une visite MPDSA devrait n'être possible, validée puis transmise à l'effecteur mobile qu'après renseignement des trois critères obligatoires que sont l'hypothèse diagnostique, le degré de priorité et le délai cible associé. Ces critères devraient être débrayables et librement modifiables par le médecin prescripteur : le degré de priorité et le délai cible devraient être suggérés par défaut par le modèle, mais le prescripteur devrait être capable de changer tout ou partie des critères. Ces étapes devraient être simples afin de n'entraîner qu'une surcharge de travail minimale (ou nulle selon les modalités d'intégration de l'interface dans le logiciel courant). Enfin, l'interface devrait être agréable et compréhensible, et ne nécessiter qu'une formation rapide afin d'assurer la meilleure acceptabilité possible (178).

Quatrièmement, même si aucun de nos résultats ne permet d'appuyer cette recommandation, l'interface utilisée par les effecteurs mobiles devrait reposer sur les mêmes enjeux d'ergonomie, de modification et d'acceptabilité. En effet, en raison de l'organisation actuelle du système de la PDSA, les ordres de visite et les informations médicales sont transmises aux MPDSA par voie orale, par les ARM, sur la base des renseignements qui leur ont été préalablement fournis par les médecins régulateurs. Il est probable que ce processus entraîne une perte d'information lors de la transmission, ainsi qu'une mauvaise réception par les effecteurs, altérée par des disparités de formation professionnelle, de structure de processus décisionnel et d'attentes discordantes entre ARM et médecins effecteurs.

2. PERFORMANCES DE L'ALGORITHME GENETIQUE

Après avoir modélisé le problème de l'optimisation du trajet des MPDSA, nous avons développé l'algorithme génétique présenté au chapitre 3.5 (p.103).

Nous avons évalué ses performances sur des données théoriques, comparativement à un modèle mathématique de programmation linéaire en nombre entiers mixte (MILP, cf.3.4, p.101).

2.1. Sur données théoriques

Nous avons comparé l'efficacité des deux méthodes d'optimisation présentées précédemment (le MILP et l'algorithme génétique) sur les délais d'effection des MPDSA. Pour ce faire, les données relatives à une plage horaire de PDSA donnée ont été simulées. Les instances de test comprenaient : la taille de la flotte MPDSA (de un à cinq), le degré de priorité de la visite (en trois classes : élevée, normale, basse), l'heure d'appel/de prescription de la visite, l'intervalle de rafraîchissement de la liste de visites (10, 20, 30, 40 et 50 minutes), ainsi que le nombre de patients à visiter (10, 15, 20, 25, 30, 40 et 50). La durée de visite tt , entre l'arrivée du MPDSA sur les lieux et son départ, était fixée à 20 minutes.

Le temps de calcul était limité à 60 secondes (ou 500 itérations pour l'algorithme génétique).

2.1.1. Listes des visites fournies par instance de test

Pour chaque test conduit, 10 instances étaient aléatoirement générées en fonction des paramètres utilisés. Au décours de chacune de ces dernières, l'algorithme génétique créait une matrice à deux dimensions pour l'ensemble de la flotte d'effecteurs mobiles. Cette matrice compilait l'ordre des visites du premier au dernier patient d'une liste donnée, ainsi que le temps séparant les visites entre elles (S_{kp}). L'exemple suivant est donné pour $n_j = 5$ MPDSA et $n_p = 25$ patients dans la liste (Tableau 8 et Tableau 9).

Tableau 8. Liste des visites et des délais cibles pour 5 MPDSA et 25 patients

j	σ_j	tt	T_j	due_j
1	5	20	1	125
2	5	20	1	125
3	7	20	1	127
4	11	20	1	131
5	13	20	2	253
6	15	20	2	255
7	16	20	2	256
8	17	20	2	257
9	21	20	0	66
10	24	20	2	264
11	25	20	0	70
12	25	20	0	70
13	25	20	2	265
14	27	20	2	267
15	32	20	1	152
16	33	20	0	78
17	34	20	0	79
18	37	20	2	277
19	39	20	2	279
20	40	20	0	85
21	45	20	0	90
22	46	20	2	286
23	47	20	1	167
24	48	20	1	168
25	48	20	1	168

j : patient, σ_j : heure d'appel ($t_0 + x$ minutes), T_j : degré de priorité (0 : haute, 1 : = moyenne, 2 : basse), due_j : heure maximale d'arrivée (délai cible, $t_0 + y$ minutes, avec $y = \sigma_j$ valeur du délai cible adapté à T_j).

Tableau 9. Matrice des délais entre deux patients (symétrique à 2 dimensions, pour 25 patients)

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	6	24	21	29	8	6	2	4	28	0	26	29	29	12	19	5	10	2	22	12	17	14	9	27
2	6	0	19	25	12	17	10	4	15	26	17	9	13	22	29	22	2	10	7	28	8	29	20	26	7
3	24	19	0	27	21	7	16	25	23	8	12	11	18	4	17	17	0	3	15	15	5	15	18	7	25
4	21	25	27	0	21	5	21	21	2	14	28	19	3	3	3	6	29	25	2	10	19	28	18	18	20
5	29	12	21	21	0	27	6	26	13	20	5	20	16	13	29	11	5	15	9	6	8	18	8	11	29
6	8	17	7	5	27	0	1	15	1	20	3	11	17	16	27	16	7	26	2	9	8	27	5	5	24
7	6	10	16	21	6	1	0	14	4	29	18	15	4	9	10	4	14	5	3	21	17	8	13	8	23
8	2	4	25	21	26	15	14	0	28	11	10	27	14	13	19	15	6	11	22	5	13	21	29	4	1
9	4	15	23	2	13	1	4	28	0	6	5	6	21	17	0	3	22	2	20	19	7	22	1	8	14
10	28	26	8	14	20	20	29	11	6	0	16	2	22	23	20	27	9	27	2	4	4	6	27	11	17
11	0	17	12	28	5	3	18	10	5	16	0	19	5	8	19	1	7	20	6	18	4	11	0	2	26
12	26	9	11	19	20	11	15	27	6	2	19	0	19	12	16	21	4	11	12	7	25	5	23	20	8
13	29	13	18	3	16	17	4	14	21	22	5	19	0	3	16	19	18	13	4	4	15	7	4	5	7
14	29	22	4	3	13	16	9	13	17	23	8	12	3	0	11	25	28	21	14	3	2	18	11	14	11
15	12	29	17	3	29	27	10	19	0	20	19	16	16	11	0	23	16	8	20	16	12	1	24	6	6
16	19	22	17	6	11	16	4	15	3	27	1	21	19	25	23	0	15	28	26	10	9	10	25	19	20
17	5	2	0	29	5	7	14	6	22	9	7	4	18	28	16	15	0	0	29	27	22	11	27	3	22
18	10	10	3	25	15	26	5	11	2	27	20	11	13	21	8	28	0	0	14	23	23	5	2	27	1
19	2	7	15	2	9	2	3	22	20	2	6	12	4	14	20	26	29	14	0	24	21	22	25	10	26
20	22	28	15	10	6	9	21	5	19	4	18	7	4	3	16	10	27	23	24	0	21	23	14	28	9
21	12	8	5	19	8	8	17	13	7	4	4	25	15	2	12	9	22	23	21	21	0	18	10	6	13
22	17	29	15	28	18	27	8	21	22	6	11	5	7	18	1	10	11	5	22	23	18	0	5	16	24
23	14	20	18	18	8	5	13	29	1	27	0	23	4	11	24	25	27	2	25	14	10	5	0	21	27
24	9	26	7	18	11	5	8	4	8	11	2	20	5	14	6	19	3	27	10	28	6	16	21	0	4
25	27	7	25	20	29	24	23	1	14	17	26	8	7	11	6	20	22	1	26	9	13	24	27	4	0

j : patient ; 0 : symétrie ; 6 : délai (en minutes) entre deux visites successives (S_{kp})

2.1.2. Performances des méthodes testées

2.1.2.1. Faisabilité et solutions

Au total, 1750 tests ont été conduits (10 instances aléatoires pour chaque combinaison des paramètres du modèle, traitées par chaque méthode [MILP et algorithme génétique]).

Dans le temps restreint de calcul (60 s), le MILP n'a fourni des résultats que pour des instances contenant moins de 25 patients, et apparaissait dépassé dès 20 patients et plus de 3 MPDSA. Au total, il n'était capable de fournir une solution que pour 1100 tests (63 %). L'algorithme génétique, au contraire, atteignait des résultats pour chaque instance de test conduite.

2.1.2.2. Somme des retards (*sum of tardiness*) ou délais d'effection

L'algorithme génétique fournissait des sommes des retards globalement égales ou inférieures à celles données par le MILP pour la quasi-totalité des instances ($n = 1654/1750$, 94,5 %). Dans les instances simples, contenant peu de patients ($Pat \leq 20$), et indépendamment de la taille de la flotte MPDSA ou du temps de rafraîchissement de la liste, le MILP et l'algorithme génétique fournissaient des résultats proches. Le MILP ne fournissait de meilleures solutions que pour certaines des instances comprenant :

{Pat = 10, MPDSA = 1} (n=19/100)
{Pat = 10, MPDSA = 2} (n= 8/100)
{Pat=20, MPDSA = 1} (n=1/100)
{Pat=20, MPDSA = 2} (n=22/100)
{Pat=20, MPDSA = 3} (n=3/100)
{Pat=25, MPDSA = 1} (n=15/100)
{Pat=25, MPDSA = 2} (n=11/100)
{Pat=25, MPDSA = 3} (n=10/100)
{Pat=25, MPDSA = 4} (n=6/100)

Pour les instances contenant plus de 30 patients, l'algorithme génétique minimisait systématiquement les sommes des retards, qui étaient presque constamment nulles, tandis que le MILP était dépassé et incapable d'aboutir à des solutions dans le temps imparti. Par exemple, pour une instance du type {Pat=50, MPDSA=3, Int=40}, le MILP ne fournissait aucune solution alors que la somme des retards moyenne affichée par l'algorithme était de 366 minutes.

L'ensemble des résultats est reporté dans le Tableau 10, qui compare les sommes des retards moyennes (en minutes) pour le MILP et l'algorithme, pour chaque instance.

En ce qui concerne les sommes moyennes des retards par intervalle de rafraîchissement de la liste, celles fournies par l'algorithme génétique étaient meilleures que celles du MILP dans 97,7 % des cas ($n= 171/175$).

Le Tableau 11 synthétise la comparaison des sommes moyennes des retards pour des instances comprenant 10, 20 et 50 patients.

Les performances de l'algorithme génétique semblaient s'améliorer avec la complexité des instances, tant entre les classes d'instances (nombre de patients) qu'au sein d'une même classe (pour {Pat = 50, MPDSA = 1}, somme moyenne = 1000 minutes, {Pat = 50, MPDSA = 5}, somme moyenne = 230 minutes).

Tableau 10. Comparaison des sommes des retards (en minutes) entre MILP et algorithme génétique

Pat		10														
MPDSA	1			2			3			4			5			
Int	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	
10	78	78	202	0	0	102	0	0	100	0	0	124	0	0	102	
	69	69	206	0	0	144	0	0	82	0	0	82	0	0	80	
	346	346	201	0	1	146	0	0	102	0	0	88	0	0	63	
	111	111	200	0	0	125	0	0	89	0	0	82	0	0	68	
	181	181	200	0	0	140	0	0	85	0	0	68	0	0	83	
	45	49	203	0	0	144	0	0	108	0	0	120	0	0	127	
	170	176	203	11	23	103	0	0	86	0	0	86	0	0	63	
	0	0	201	0	0	120	0	0	85	0	0	60	0	0	65	
	55	61	202	19	49	124	0	0	83	0	0	68	0	0	88	
	220	258	200	0	0	109	0	0	129	0	0	69	0	0	85	
20	192	234	208	0	0	101	0	0	100	0	0	80	0	0	107	
	33	33	206	0	0	128	0	0	82	0	0	91	0	0	78	
	80	80	206	0	0	148	0	0	102	0	0	89	0	0	86	
	209	223	200	0	0	145	0	0	89	0	0	83	0	0	81	
	131	131	202	0	0	118	0	0	85	0	0	99	0	0	62	
	355	327	201	2	31	128	0	0	108	0	0	88	0	0	91	
	2	2	216	0	0	135	0	0	86	0	0	71	0	0	114	
	87	87	217	3	36	105	0	0	85	0	0	83	0	0	92	
	120	148	201	0	0	117	0	0	83	0	0	71	0	0	111	
	126	126	205	0	0	103	0	0	129	0	0	94	0	0	85	
30	126	126	207	0	7	122	0	0	101	0	0	112	0	0	131	
	225	271	205	0	0	124	0	0	105	0	0	105	0	0	106	
	235	235	201	0	0	120	0	0	128	0	0	83	0	0	69	
	16	16	209	0	0	157	0	0	83	0	0	82	0	0	92	
	111	140	207	0	0	138	0	0	90	0	0	83	0	0	68	
	286	289	206	0	0	132	0	0	89	0	0	121	0	0	83	
	341	391	202	0	0	131	0	0	102	0	0	80	0	0	112	
	80	86	219	0	0	123	0	0	125	0	0	107	0	0	111	
	156	176	202	0	0	125	0	0	139	0	0	133	0	0	94	
	40	40	206	0	21	108	0	0	170	0	0	110	0	0	108	
40	87	87	227	0	0	150	0	0	138	0	0	94	0	0	105	
	30	30	204	0	0	133	0	0	105	0	0	92	0	0	109	
	195	224	204	0	5	152	0	0	146	0	0	68	0	0	110	
	117	127	206	0	0	125	0	0	132	0	0	101	0	0	71	
	321	326	212	0	0	110	0	0	92	0	0	93	0	0	111	
	16	28	212	0	0	141	0	0	88	0	0	94	0	0	133	
	162	162	202	0	0	141	0	0	107	0	0	112	0	0	73	
	88	104	218	0	0	118	0	0	103	0	0	143	0	0	106	
	13	13	213	0	0	117	0	0	104	0	0	76	0	0	91	
	217	221	201	0	3	160	0	0	85	0	0	79	0	0	102	
50	51	70	223	0	0	172	0	0	117	0	0	128	0	0	81	
	161	138	206	0	0	129	0	0	89	0	0	128	0	0	82	
	37	37	200	0	0	129	0	0	120	0	0	86	0	0	107	
	273	264	215	0	0	139	0	0	103	0	0	115	0	0	84	
	119	119	209	0	0	144	0	0	96	0	0	109	0	0	123	
	28	56	204	0	0	146	0	0	89	0	0	98	0	0	95	
	120	120	207	0	0	133	0	0	120	0	0	120	0	0	91	
	28	28	212	0	0	139	0	0	133	0	0	123	0	0	105	
	55	55	206	0	0	130	0	0	131	0	0	110	0	0	98	
	158	182	211	0	0	130	0	0	145	0	0	77	0	0	128	

Pat		15														
MPDSA	1			2			3			4			5			
Int	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	
10	0	0	120	0	0	89	0	0	82	0	0	89	0	0	86	
	0	0	102	0	0	86	0	0	106	0	0	128	0	0	127	
	0	0	141	0	0	142	0	0	84	0	0	104	0	0	89	
	0	0	85	0	0	101	0	0	105	0	0	142	0	0	102	
	0	0	89	28	0	85	0	0	109	0	0	120	0	0	84	
	0	0	105	0	0	104	0	0	128	0	0	148	0	0	87	
	0	0	81	0	0	106	0	0	88	0	0	87	0	0	101	
	0	0	101	0	0	88	0	0	89	0	0	81	0	0	107	
	0	0	64	0	0	126	0	0	108	0	0	142	0	0	88	
	0	0	85	0	0	104	0	0	121	0	0	89	0	0	123	
20	0	0	100	0	0	128	0	0	84	0	0	89	0	0	124	
	0	0	95	0	0	98	0	0	125	0	0	85	0	0	104	
	0	0	88	0	0	128	0	0	82	0	0	115	0	0	109	
	0	0	125	0	0	73	0	0	112	0	0	102	0	0	77	
	0	0	85	0	0	128	0	0	92	0	0	89	0	0	104	
	0	0	115	0	0	109	0	0	84	0	0	90	0	0	109	
	0	0	88	0	0	89	0	0	90	0	0	98	0	0	86	
	0	0	103	0	0	133	0	0	118	0	0	103	0	0	116	
	0	0	122	0	0	107	0	0	101	0	0	101	0	0	124	
	0	0	89	0	0	100	0	0	77	0	0	105	0	0	80	
30	0	0	123	0	0	131	0	0	134	0	0	95	0	0	103	
	0	0	90	0	0	96	0	0	102	0	0	94	0	0	117	
	0	0	125	0	0	142	0	0	114	0	0	101	0	0	129	
	0	0	135	0	0	102	0	0	119	0	0	99	0	0	104	
	0	0	122	0	0	105	0	0	120	0	0	107	0	0	113	
	0	0	112	0	0	97	0	0	104	0	0	129	0	0	129	
	0	0	95	0	0	98	0	0	98	0	0	99	0	0	104	
	0	0	164	0	0	117	0	0	90	0	0	84	0	0	85	
	0	0	85	0	0	108	0	0	104	0	0	92	0	0	135	
	0	0	108	0	0	93	0	0	133	0	0	108	0	0	89	
40	0	0	147	0	0	116	0	0	109	0	0	97	0	0	109	
	0	0	89	0	0	84	0	0	95	0	0	175	0	0	86	
	0	0	111	0	0	126	0	0	132	0	0	106	0	0	117	
	0	0	95	0	0	103	0	0	89	0	1	105	0	0	120	
	0	0	127	0	0	97	0	0	112	0	0	134	0	0	106	
	0	0	106	0	0	92	0	0	147	0	0	106	0	0	111	
	0	0	107	0	0	114	0	0	99	0	0	118	0	0	119	
	0	0	88	0	0	155	0	0	103	0	0	138	0	0	102	
	0	0	93	0	0	105	0	0	150	0	0	146	0	0	152	
	0	0	133	0	0	119	0	0	139	0	0	131	0	0	109	
50	0	0	90	0	0	128	0	0	132	0	0	137	0	0	128	
	0	0	108	0	0	118	0	0	100	0	0	113	0	0	127	
	0	0	127	0	0	167	0	0	116	0	0	147	0	0	110	
	0	0	114	0	0	133	0	0	138	0	0	131	0	0	115	
	0	0	92	0	0	103	0	0	119	0	0	103	0	0	90	
	0	0	149	0	0	160	0	0	139	0	0	129	0	0	134	
	0	0	107	0	0	122	0	0	117	0	0	107	0	0	107	
	0	0	107	0	0	124	0	0	96	0	0	145	0	0	125	
	0	0	107	0	0	132	0	0	135	0	0	109	0	0	105	
	0	0	125	0	0	124	0	0	112	0	0	129	0	0	114	

Pat : nombre de patients dans la liste; MPDSA : effecteurs mobiles; Int: intervalle de rafraichissement de la liste (en minutes); MILP: mixed-integer linear programming; GA: algorithme génétique; Cmax : heure de la dernière visite effectuée (en minutes) ; x : infaisable

Pat		20														
MPDSA	1	2			3			4			5					
Int	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	
10	3103	2781	402	264	280	220	0	2	160	3262	6	122	66884	0	126	
	2306	2073	400	527	625	222	11	0	162	47763	4	140	76	0	149	
	3048	2945	400	509	570	241	311	62	165	275	5	141	311	0	122	
	2865	2607	400	168	220	223	85	43	164	0	0	125	100000	0	121	
	2613	2478	400	327	364	226	13	27	168	2066	1	144	604	0	121	
	3037	2646	406	57	54	224	26336	50	164	249	4	120	131	1	125	
	2473	1863	400	216	206	202	223	70	160	3567	0	123	100000	0	128	
	2876	2372	402	33	134	206	712	101	162	1433	0	120	0	0	106	
	2624	2334	401	304	35	206	115	6	140	2014	0	144	100000	0	128	
	3239	2564	405	358	411	222	121	57	141	293	0	149	0	0	123	
20	3490	3015	402	358	174	203	77	0	172	223	0	145	91829	10	100	
	2623	2569	401	183	350	220	1809	0	151	0	0	131	38600	29	124	
	2918	2250	400	473	398	206	4	3	157	0	0	132	97597	15	124	
	2531	2150	403	544	240	208	657	78	160	205	0	161	208	0	107	
	3552	2623	401	0	38	201	187	72	147	714	43	147	680	0	129	
	2766	2060	400	358	355	202	0	0	163	92870	0	143	2541	1	122	
	2685	2012	406	463	507	204	229	13	144	1165	57	151	100000	0	128	
	3305	3237	400	98	103	205	51	32	146	522	8	122	20448	0	109	
	2582	1946	401	527	476	207	256	179	161	246	0	127	371	0	127	
	2382	2016	408	46	53	203	2520	29	186	134	0	130	93699	0	130	
30	2575	1854	402	155	522	245	14	26	160	0	0	145	166	0	147	
	3223	2590	404	306	315	224	0	0	155	181	6	129	171	2	123	
	2096	2177	405	365	222	207	108	40	162	456	0	143	84476	0	122	
	2247	2205	405	159	71	203	2032	27	143	31046	0	140	0	0	111	
	2728	2510	403	403	241	228	95	32	189	48	20	122	188	8	121	
	2853	2481	405	442	372	203	43	0	187	2343	0	127	100000	0	115	
	2703	2430	402	318	343	208	68	57	140	0	0	162	35007	0	148	
	2427	2161	400	307	243	207	100000	26	154	7231	0	142	87746	0	128	
	2682	2551	403	942	503	211	39	30	167	429	22	147	88472	0	126	
	2787	2617	406	29	117	216	148	4	140	1170	0	127	0	0	114	
40	2804	2281	410	580	234	204	146	74	198	8	0	151	89626	0	119	
	2712	1904	402	539	489	217	0	0	148	0	0	125	1810	0	132	
	2629	1685	400	141	329	210	165	3	161	732	0	126	92347	0	115	
	2810	2479	408	247	217	220	757	0	188	383	0	158	0	0	157	
	2885	2482	407	244	74	217	0	0	182	240	0	147	179	0	114	
	3020	2347	407	386	156	220	73	0	151	779	0	126	625	0	138	
	3331	2813	403	269	111	216	99929	11	169	103	0	155	52	0	135	
	2220	1488	400	587	418	220	167	2	163	0	0	159	0	42	107	
	2514	2231	405	131	96	220	0	0	152	143	0	139	507	11	102	
	2320	1788	425	0	124	228	117	79	204	153	0	157	1218	0	126	
50	2799	2087	405	399	201	208	26	0	191	209	0	148	89	0	158	
	2886	2363	408	837	435	229	581	23	166	0	0	162	0	0	146	
	2851	2219	401	168	29	219	86	0	187	402	0	145	16237	0	183	
	2545	1809	412	174	218	226	0	0	153	0	0	128	232	0	131	
	2720	2096	400	276	323	232	31	4	178	2111	0	162	0	0	120	
	2187	1912	403	579	658	214	78	4	159	20057	0	150	0	0	110	
	3284	2475	409	1046	401	238	501	41	157	863	0	182	637	0	120	
	2589	1496	408	259	186	239	206	59	169	0	0	164	81	0	134	
	2704	2656	421	83	109	227	125	0	166	80	0	134	100000	0	144	
	2546	2307	412	452	569	222	30	0	153	0	0	153	0	0	124	

Pat		25														
MPDSA	1	2			3			4			5					
Int	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	
10	0	2	122	0	3	124	0	0	145	0	0	163	0	0	126	
	0	0	143	0	0	123	0	57	162	0	1	125	0	2	140	
	0	1	121	0	0	129	0	76	143	0	0	141	0	0	149	
	0	0	145	0	0	161	0	0	148	0	3	144	0	0	129	
	0	0	125	0	0	126	298	0	148	0	25	121	0	0	124	
	0	0	145	0	43	141	0	12	142	0	0	148	0	9	149	
	0	0	122	0	0	144	0	17	162	0	1	143	0	6	145	
	0	28	122	0	0	147	0	0	163	0	0	126	0	4	144	
	0	0	162	0	0	120	0	0	123	0	0	124	100000	0	141	
	0	0	142	0	7	123	0	30	144	0	1	163	0	0	142	
20	0	0	152	0	0	171	0	0	146	0	0	134	0	0	148	
	0	89	147	0	0	165	0	0	147	0	40	145	0	0	124	
	0	4	168	0	0	129	0	0	127	0	61	125	0	0	128	
	0	0	139	0	0	152	0	7	146	0	0	149	59142	5	158	
	0	0	140	0	13	148	0	0	147	0	0	142	0	0	122	
	0	0	131	0	0	165	0	0	143	0	0	150	0	2	166	
	0	2	142	0	0	128	0	74	150	0	0	151	0	0	141	
	0	21	124	0	4	164	0	2	133	0	0	121	0	7	152	
	0	29	166	0	34	134	0	0	147	37132	0	151	0	0	159	
	0	0	148	0	9	145	0	0	132	0	0	147	0	0	128	
30	0	0	137	0	0	136	0	22	160	0	0	160	0	0	165	
	0	0	164	0	4	158	0	0	150	0	0	140	0	0	162	
	0	0	167	0	0	160	0	0	172	0	84	166	0	0	136	
	0	6	133	0	0	136	0	0	126	0	41	128	0	0	144	
	0	14	134	100000	0	151	0	0	120	0	0	133	0	0	163	
	0	42	128	0	0	147	0	0	151	0	0	122	0	0	169	
	0	0	151	0	0	143	0	0	133	0	0	149	0	0	148	
	0	0	143	0	0	163	0	0	165	0	0	148	0	0	127	
	0	0	152	0	0	164	0	3	143	x	0	146	0	0	127	
	0	0	154	0	0	147	0	0	151	0	0	147	0	2	167	
40	87	87	147	0	0	84	0	0	95	0	0	175	0	0	86	
	30	30	89	0	0	126	0	0	132	0	0	106	0	0	117	
	195	224	111	0	5	103	0	0	89	0	0	105	0	0	120	
	117	127	95	0	0	97	0	0	112	0	0	134	0	0	106	
	321	326	127	0	0	92	0	0	147	0	0	106	0	0	111	
	16	28	106	0	0	114	0	0	99	0	0	118	0	0	119	
	162	162	107	0	0	155	0	0	103	0	0	138	0	0	102	
	88	104	88	0	0	105	0	0	150	0	0	146	0	0	152	
	13	13	93	0	0											

Pat		30														
MPDSA		1			2			3			4			5		
Int	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	
10	9041	7370	605	x	2270	320	x	542	209	x	197	164	x	20	183	
	9834	7166	601	x	2224	302	x	456	204	x	63	164	x	73	148	
	9277	7202	600	x	2464	320	x	364	209	x	102	162	x	0	145	
	11266	8066	600	x	3122	320	x	864	224	x	149	183	x	105	162	
	10461	7032	601	x	2183	300	x	525	205	x	126	180	x	2	160	
	10962	7462	600	x	1906	362	x	471	220	x	208	180	x	18	180	
	9621	6631	600	x	1977	320	x	1048	205	x	122	183	x	82	167	
	11042	8319	601	x	1269	344	x	689	220	x	20	183	x	0	160	
	9115	7405	606	x	2086	322	x	787	203	x	115	181	x	0	143	
	10747	7086	602	x	2170	320	x	287	202	x	133	167	x	0	169	
20	9386	7471	601	x	1996	323	x	273	206	x	203	193	x	116	150	
	9805	7028	612	x	2242	320	x	294	234	x	184	181	x	43	193	
	11137	7965	601	x	2112	304	x	288	202	x	203	176	x	79	169	
	11874	7956	606	x	2964	340	x	686	224	x	239	203	x	50	161	
	9021	7512	619	x	1770	321	x	476	216	x	68	174	x	54	148	
	8410	6780	600	x	2654	321	x	589	221	x	186	180	x	19	164	
	10844	7003	612	x	2117	323	x	420	218	x	149	170	x	0	146	
	10298	7833	604	x	1506	322	x	578	201	x	151	162	x	5	171	
	9873	7498	604	x	1805	301	x	502	221	x	278	165	x	43	147	
	11239	7647	601	x	2075	326	x	841	221	x	136	181	x	0	151	
30	11660	7409	609	x	2107	320	x	650	215	x	30	186	x	0	169	
	11186	7791	600	x	2194	311	x	589	223	x	52	187	x	22	187	
	10012	8179	600	x	994	327	x	547	226	x	39	172	x	5	165	
	10971	7750	602	x	2175	327	x	457	220	x	38	203	x	8	163	
	10763	7718	601	x	1539	302	x	565	219	x	81	171	x	3	167	
	9867	7335	600	x	2181	306	x	271	226	x	271	189	x	130	142	
	10310	6646	611	x	2437	324	x	448	226	x	9	193	x	27	145	
	11659	8467	600	x	2118	324	x	440	210	x	0	190	x	53	172	
	9270	7509	617	x	2488	321	x	259	221	x	27	189	x	0	164	
	11049	6811	604	x	1485	327	x	568	205	x	106	191	x	15	148	
40	11894	7552	600	x	2631	327	x	571	215	x	234	173	x	0	162	
	9441	7399	615	x	1665	357	x	687	214	x	17	166	x	1	185	
	10443	7502	600	x	1893	325	x	277	225	x	155	202	x	0	190	
	9817	7169	601	x	1689	304	x	761	230	x	22	187	x	0	175	
	10792	7427	608	x	1665	300	x	228	221	x	221	213	x	9	174	
	9819	6471	603	x	1841	314	x	251	227	x	78	174	x	0	160	
	8677	6327	603	x	1604	321	x	751	209	x	118	192	x	0	162	
	10838	8230	609	x	1801	304	x	678	224	x	44	193	x	119	158	
	9439	7128	600	x	1391	323	x	488	224	x	150	193	x	0	149	
	8834	7754	602	47195	1747	321	x	167	213	x	134	188	x	15	184	
50	9438	6001	605	x	1646	310	x	116	208	x	332	172	x	0	169	
	10860	7366	606	x	1129	311	x	250	234	x	208	181	x	4	180	
	9086	6985	600	x	1743	324	x	203	238	x	30	191	x	35	174	
	10669	7377	620	x	2185	335	x	521	225	x	36	186	x	0	177	
	10997	7734	601	x	2502	363	x	784	230	x	72	165	x	79	159	
	8381	7351	603	x	1525	312	x	900	235	x	26	196	x	1	179	
	8651	6413	600	x	1742	329	x	305	225	x	149	198	x	0	172	
	9503	7232	612	x	1781	329	x	167	209	x	16	180	x	4	183	
	12448	7988	604	x	1598	305	x	435	217	x	77	201	x	1	192	
	9564	7667	607	x	1952	308	x	105	235	x	87	190	x	9	170	

Pat		40														
MPDSA		1			2			3			4			5		
Int	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	
10	22586	15838	800	x	6025	462	x	2054	287	x	243	1210	x	186	305	
	99987	16502	800	x	5470	421	x	2792	282	x	260	2315	x	188	273	
	99987	15730	805	x	6823	442	x	2458	288	x	224	1961	x	202	324	
	99987	15926	804	x	5013	440	x	2403	322	x	206	1016	x	184	371	
	18674	14507	801	x	5471	442	x	1794	280	x	227	724	x	202	285	
	99987	16632	800	x	5213	421	x	2392	284	x	220	934	x	207	395	
	99953	15517	800	x	6825	440	x	2844	280	x	245	879	x	180	308	
	99973	15741	801	x	5426	442	x	1811	300	x	224	1062	x	189	332	
	99987	15481	808	x	6072	406	x	2697	284	x	243	1099	x	202	390	
	99973	17839	802	x	5558	443	x	3074	301	x	224	921	x	201	324	
20	99963	15627	800	x	5475	441	x	2184	280	x	265	1007	x	189	214	
	99987	15341	808	x	5029	405	x	2323	280	x	233	1207	x	197	242	
	99987	16647	802	x	5729	425	x	2415	321	x	226	574	x	203	229	
	21688	15525	800	x	5837	461	x	1637	280	x	221	881	x	184	549	
	99987	15262	806	x	5035	423	x	2465	282	x	241	1102	x	191	225	
	0	15418	801	x	5703	429	x	2448	290	x	223	914	x	182	608	
	99987	14581	800	x	5905	408	x	2079	285	x	260	565	x	188	68	
	99987	16648	806	x	5291	407	x	2054	286	x	241	777	x	183	611	
	0	15007	807	x	4664	422	x	2024	285	x	242	734	x	194	581	
	99987	15143	800	x	5808	326	x	2400	280	x	220	826	x	201	137	
30	99987	16779	804	x	5000	407	x	1713	280	x	227	1233	x	205	12	
	99987	15870	801	x	5360	429	x	1919	283	x	242	739	x	210	412	
	99987	14955	802	x	5370	449	x	2357	298	x	214	1181	x	187	55	
	99987	15370	813	x	4680	422	x	1444	301	x	240	875	x	192	295	
	99987	13148	803	x	5417	431	x	1455	287	x	223	974	x	201	602	
	99987	16055	802	x	6399	441	x	2968	314	x	242	802	x	186	255	
	99987	16548	808	x	5124	443	x	2124	291	x	240	692	x	192	205	
	99987	15595	809	x	6176	413	x	2084	284	x	240	997	x	189	282	
	22894	15482	800	x	5125	450	x	1447	281	x	220	801	x	199	145	
	99987	15078	807	x	4969	421	x	1865	283	x	224	1287	x	199	126	
40	99987	15491	810	x	5662	443	x	2505	281	x	227	483	x	235	615	
	99987	14720	803	x	4526	422	x	3120	308	x	226	801	x	218	132	
	99987	16070	800	x	6085	423	x	2046	289	x	226	1094	x	198	41	
	99987	14099	801	x	6362	420	x	2204	285	x	229	378	x	186	200	
	99987	15656	810	x	5745	411	x	1849	290	x	245	933	x	203	132	
	99987	14241	801	x	5934	441	x	2223	287	x	225	1024	x	194	132	
	29531	15559	802	x	4821	436	x	2118	332	x	236	342	x	192	187	
	99987	15424	802	x	4894	410	x	1829	289							

Pat		50														
MPDSA	1			2			3			4			5			
Int	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	MILP	GA	Cmax	
10	x	1006	26195	x	502	11444	x	363	4890	x	263	2494	x	205	1247	
	x	1000	26902	x	541	10157	x	346	4674	x	302	2234	x	221	932	
	x	1000	28663	x	506	12288	x	342	5547	x	283	2860	x	224	1469	
	x	1004	26777	x	540	10356	x	360	4818	x	286	2501	x	222	1107	
	x	1004	26193	x	506	10352	x	340	5170	x	288	2219	x	221	626	
	x	1006	26206	x	522	10428	x	368	4355	x	263	3379	x	221	1912	
	x	1000	24810	x	520	10658	x	360	5594	x	281	2182	x	221	1523	
	x	1007	27464	x	525	10265	x	381	5035	x	285	2435	x	224	1650	
	x	1001	27013	x	524	10257	x	342	4434	x	304	2323	x	220	1294	
	x	1000	27130	x	528	11586	x	383	6004	x	300	2750	x	240	1241	
20	x	1003	26634	x	525	10958	x	346	4874	x	285	2524	x	227	1002	
	x	1001	27529	x	508	9694	x	361	4812	x	287	2750	x	230	1865	
	x	1004	26447	x	543	10620	x	361	6121	x	263	2969	x	205	957	
	x	1003	26172	x	504	10721	x	343	5209	x	280	2916	x	231	1498	
	x	1009	26375	x	519	11163	x	362	3904	x	310	2536	x	242	1688	
	x	1000	26837	x	510	10485	x	363	4945	x	281	3258	x	263	1049	
	x	1003	28184	x	553	11129	x	345	4865	x	312	2127	x	242	1766	
	x	1001	26428	x	522	9842	x	391	5657	x	281	2667	x	228	1354	
	x	1001	26878	x	502	10437	x	344	4784	x	286	2790	x	220	1595	
	x	1006	27527	x	521	11208	x	345	5412	x	283	2863	x	240	1516	
30	x	1005	24926	x	524	10300	x	405	5080	x	333	2163	x	212	736	
	x	1000	26126	x	523	9873	x	361	4327	x	302	2930	x	239	574	
	x	1006	28039	x	544	10477	x	385	3977	x	284	2316	x	230	1466	
	x	1003	25292	x	541	10211	x	365	5471	x	267	2134	x	252	1073	
	x	1003	27497	x	502	10223	x	361	4766	x	282	2047	x	221	938	
	x	1004	26888	x	504	10518	x	364	4652	x	287	2418	x	247	1064	
	x	1004	26629	x	520	9319	x	383	4512	x	265	2595	x	230	1134	
	x	1009	27820	x	522	10050	x	340	5226	x	283	2567	x	221	1306	
	x	1005	27022	x	518	10909	x	386	4340	x	269	2195	x	242	1363	
	x	1000	25553	x	520	10196	x	367	4092	x	280	2315	x	229	1501	
40	x	1002	26476	x	567	9388	x	360	4428	x	281	2123	x	226	963	
	x	1009	26969	x	509	10367	x	367	4190	x	263	2315	x	235	1217	
	x	1001	30084	x	560	9961	x	367	4907	x	262	2137	x	247	1233	
	x	1003	25551	x	534	9946	x	372	4658	x	290	2777	x	229	940	
	x	1005	26987	x	527	10782	x	389	4188	x	282	2164	x	235	939	
	x	1002	27140	x	551	10294	x	361	4103	x	308	2290	x	243	887	
	x	1001	27210	x	508	9836	x	344	4700	x	306	1912	x	234	647	
	x	1001	25445	x	512	10094	x	355	4182	x	283	1789	x	228	1172	
	x	1002	24031	x	563	9685	x	365	5027	x	283	1974	x	224	1244	
	x	1006	27179	x	543	10005	x	388	5823	x	272	1859	x	242	624	
50	x	1001	26879	x	555	10082	x	365	5489	x	293	2243	x	229	1017	
	x	1007	24769	x	522	9766	x	395	6065	x	297	2411	x	237	1202	
	x	1015	25006	x	530	9377	x	351	4054	x	343	2902	x	246	685	
	x	1012	26847	x	546	10978	x	346	4389	x	282	1958	x	224	1549	
	x	1001	26763	x	541	9787	x	385	4455	x	310	2256	x	224	644	
	x	1005	26957	x	521	10023	x	360	4659	x	294	2260	x	223	1110	
	x	1009	28878	x	551	9443	x	369	4028	x	300	2610	x	226	1305	
	x	1006	26268	x	522	10294	x	363	3932	x	272	2406	x	283	784	
	x	1016	27763	x	543	10837	x	360	4075	x	290	2256	x	225	848	
	x	1002	28997	x	517	9678	x	365	5287	x	283	1983	x	229	557	

Pat 10										
MPDSA	1		2		3		4		5	
Int	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA
10	94,5 [52,5-191]	94,5 [58-200]	0 [0-2,75]	0 [0-6,5]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]
20	123 [68-196]	128,5 [68-226]	0 [0-0,5]	0 [0-8]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]
30	141 [70-248]	158 [74,5-275,5]	0 [0-0]	0 [0-2]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]
40	156 [60-260,5]	176 [63-280]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]
50	87 [35-159]	94,5 [50,5-149]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]	0 [0-0]

Pat 20										
MPDSA	1		2		3		4		5	
Int	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA
10	2870,5 [2816-3045]	2521 [2343-2636]	284 [180-350]	250 [152-399]	118 [31-289]	46,5 [11-61]	1723,5 [279,5-2963]	0,5 [0-4]	457,5 [90-91721]	0 [0-0]
20	2725 [2592-3208]	2200 [2027-2609]	358 [119-470]	295 [121-387]	208 [57-557]	21 [1-62]	234,5 [152-666]	0 [0-6]	29524 [1145-93231]	0 [0-1]
30	2692 [2464-2772]	2455,5 [2184-2541]	312,5 [196-393]	279 [227-365]	81,5 [40-138]	26,5 [9,5-31,5]	442,5 [81-2050]	0 [0-4,5]	17597 [167-86928,5]	0 [0-0]
40	2712 [2543-2866]	2281 [1817-2446]	269 [167-501]	227 [114-305]	117 [18-166,5]	3 [0-9]	153 [32-347]	0 [0-0]	625 [84-1662]	0 [0-0]
50	2712 [2557-2638]	2157,5 [1956-2349]	337,5 [195-547]	270,5 [190-426,5]	82 [30-186]	2 [0-18]	144,5 [0-747,5]	0 [0-0]	85 [0-534]	0 [0-0]

Pat 50										
MPDSA	1		2		3		4		5	
Int	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA	MILP	GA
10	x	1002,5 [1000-1006]	x	523 [506-531]	x	360 [342-371]	x	285,5 [276,5-300,5]	x	221 [221-224]
20	x	1003 [1001-1004,5]	x	520 [507-529,5]	x	353,5 [345-362]	x	284 [281-293]	x	230,5 [225-242]
30	x	1004 [1002-1005]	x	521 [514,5-528]	x	366 [361-385]	x	282,5 [268,5-291]	x	230 [221-243]
40	x	1002 [1001-1005]	x	538,5 [511-561]	x	366 [359-376]	x	282,5 [270-294]	x	234,5 [227,5-242]
50	x	1006,5 [1002-1013]	x	535,5 [522-548]	x	364 [356-373]	x	293,5 [283-302,5]	x	227,5 [224-239]

Pat : nombre de patients dans la liste; MPDSA : effecteurs mobiles; Int: intervalle de rafraîchissement de la liste (en minutes); MILP: mixed-integer linear programming; GA: algorithme génétique; Cmax : heure de la dernière visite effectuée (en minutes) ; x : infaisable

3. DISCUSSION

3.1. Intérêt du modèle d'optimisation

À ce jour et à notre connaissance, notre étude est la première à présenter le développement d'une méthode d'optimisation du trajet et de l'ordre des visites effectuées par les MPDSA en France, dont la qualité et l'efficacité de la réponse apparaît comme un enjeu de santé publique et d'égalité d'accès au juste soin urgent.

Les résultats de l'algorithme génétique présenté dans ce travail montraient de bonnes performances dans le temps de calcul imparti, notamment la capacité de fournir des solutions pour toutes les instances de test. Le modèle mathématique exact, auquel il était comparé, était incapable de fournir des solutions pour 37 % des instances de test, et n'obtenait des résultats optimaux que pour des instances de faible complexité.

Les sommes des retards obtenues par l'algorithme génétique étaient régulièrement nulles, traduisant le respect de l'ensemble des délais cibles des instances concernées. Elles diminuaient même avec le degré de complexité des instances testées, suggérant que l'algorithme génétique est encore plus performant lorsque les contraintes du modèle sont fortes (grand nombre de patients et/ou de MPDSA, grand intervalle de rafraîchissement de la liste de visites).

L'une des limites principales de notre algorithme est qu'à ce jour et en l'état, en raison de la structure même d'un algorithme génétique, il ne permet pas d'organiser les trajets MPDSA en temps réel. En effet, cette version préliminaire utilise une liste de visites déjà effectuées et n'est pas capable de gérer une visite MPDS imprévue. L'étape suivante de notre travail consistera à développer une méthode mixte, associant un algorithme de type combinatoire (avec gestion de la contrainte « temps réel ») à notre algorithme génétique.

Ainsi, sur la base des résultats obtenus sur données théoriques, il serait possible d'envisager l'utilisation de notre algorithme génétique en tant qu'aide à l'amélioration du processus dynamique de prescription puis de réalisation des visites MPDSA au sein des CRRA. Ceci pourrait *in fine* permettre d'augmenter les capacités du CRRA à gérer en temps réel une flotte de MPDSA sur son territoire. L'algorithme génétique étant probablement plus performant sur des instances complexes, il pourrait même être utilisé à l'échelle supra-départementale, voire régionale, dans un système central de gestion des effecteurs mobiles.

Enfin, nous pouvons faire l'hypothèse que notre solution d'optimisation, grâce à la réduction des délais d'effection, pourrait conduire à une augmentation du nombre de visites MPDSA effectuées au cours d'une plage horaire donnée.

3.2. Perspectives et travaux en cours

3.2.1. L'évaluation sur données historiques

Après avoir testé notre modèle sur données théoriques, nous planifions le développement d'un modèle d'optimisation, basé sur l'algorithme génétique, auquel nous ajouterons une dimension géomatique (choix du trajet routier, trafic). Ce modèle sera à terme testé sur données historiques.

Les données historiques seront constituées de la fusion des bases de données du CRRA 94 et de Médecins à domicile. En raison du manque de données relatives aux horaires d'effectif des MPDSA, il nous est à ce jour impossible d'utiliser l'intégralité de cette base. Toutefois, les données patient, contextuelles et opérationnelles (effectif de la flotte, nombre de visites par garde de PDSA, etc.) constitueront une base clinique qui nous permettra 1) d'étudier la typologie des appels et des visites MPDSA en 2017 (y compris leur localisation spatiale ainsi que leur degré de priorité), et 2) de simuler d'autres jeux de données imputées à partir de la base existante.

Ceci nous permettra ensuite d'étudier l'efficacité de notre méthode d'optimisation selon deux modalités distinctes. Premièrement, nous évaluerons les performances de la méthode sur un échantillon de données historiques complètes, d'après un modèle déterministe (visites connues à l'avance puisque déjà effectuées, puis implémentées dans la méthode). Ces données étant rares, les résultats pourraient être insatisfaisants (réduction insuffisante de la somme des retards). Deuxièmement, pour évaluer la méthode sur un modèle stochastique de demande de visites MPDSA, la base historique sera utilisée pour créer d'autres bases, imputées sur la première et implémentées de façon aléatoire dans la méthode d'optimisation (heures d'appel, localisation, motifs, degrés de priorité, etc.). Ainsi, nous simulerons des données « de type vie réelle » tirées des données historiques.

Les données géomatiques seront extraites de logiciels ouverts (tels que Google Maps), ajustées sur les données temporelles et simulées en fonction de plusieurs scénarios (congestion du trafic, travaux et fermetures de voies, etc.). Ces données permettront l'intégration de la dimension géomatique dans la solution d'optimisation finale.

Enfin, de façon similaire à notre première étude présentée auparavant, la méthode d'optimisation sera évaluée sur la somme des retards fournis, comparativement à une méthode du type « plus court trajet ». Le nombre de patients vus au cours d'une garde MPDSA sera également comparé entre ces deux méthodes.

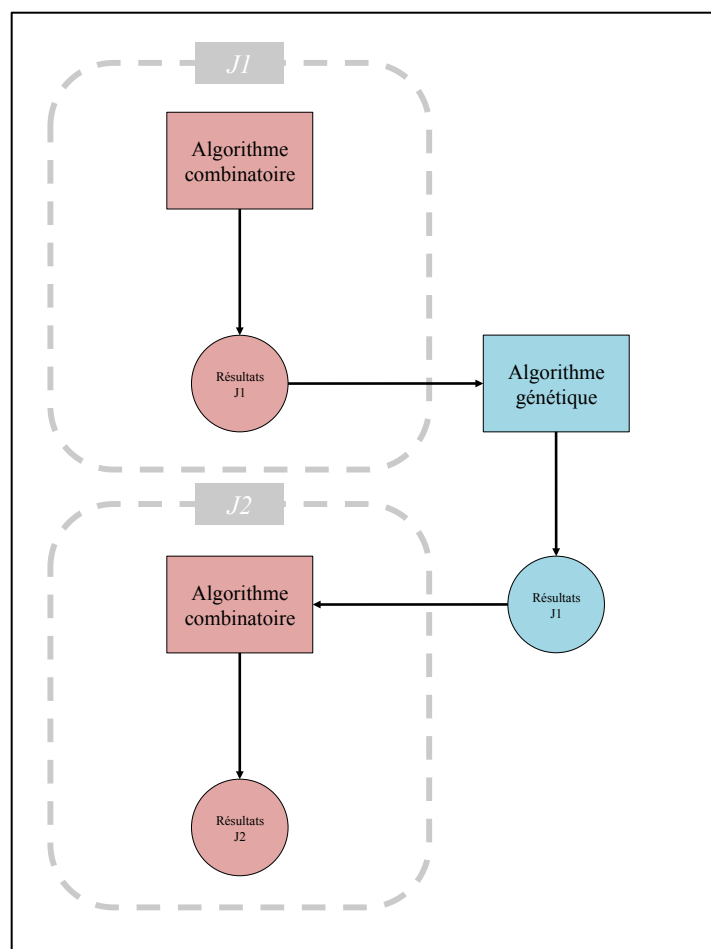
3.2.2. La gestion en temps réel

L'algorithme génétique présenté dans ce travail ne prend pas en compte la prescription des nouvelles visites MPDSA à effectuer : il ne gère donc pas les trajets des MPDSA en temps

réel. Sa structure actuelle ne permet en effet qu'une nouvelle planification d'une liste complète et fixe, et ne répond ainsi pas à l'objectif de gestion dynamique d'une flotte de MPDSA. Cependant, une telle méthode de gestion en temps réel, basée sur l'algorithme génétique présenté dans ce travail, est actuellement en cours de développement. Ses deux axes principaux sont :

- modifications de l'algorithme génétique par intégration dans un outil de simulation de type système multi-agents (prise en compte du temps réel)
- utilisation de l'algorithme génétique comme méthode d'implémentation d'un algorithme de type combinatoire (méthode mixte). Après avoir créé un algorithme combinatoire en temps réel, puis avoir observé les résultats fournis au jour $j-1$, notre algorithme génétique sera utilisé comme une méthode d'apprentissage (de type *machine learning*) et ses prédictions seront implémentées aux résultats fournis par l'algorithme combinatoire au jour j afin de proposer des solutions proches de la vie réelle (Figure 34).

Figure 34. Architecture d'une méthode mixte de type combinatoire + évolutionnaire (avec apprentissage)



3.2.3. *Vers une évaluation prospective en vie réelle*

Après le développement de l'application finale, comprenant les données de régulation ainsi qu'une dimension géomatique, celle-ci sera évaluée en vie réelle dans un premier temps dans le Val-de-Marne, puis validée dans un autre département, qui seront divisés en deux territoires (territoire test avec méthode, versus territoire de référence « pratique courante »).

L'interface de prescription de la visite MPDSA sera intégrée au logiciel du CRRA (ou directement accessible sur les postes de travail des médecins régulateurs, par exemple sous la forme d'une application web), et l'interface de réception des ordres de visite et de validation de ces derniers sera fournie aux MPDSA sous la forme d'une application mobile (ou intégrée au logiciel déjà existant chez Médecins à domicile).

Cette étude pragmatique, prospective, aura pour but de comparer le taux de visites MPDSA effectuées dans les délais cibles ajustés au degré de priorité, ainsi que le nombre de patients vus sur une plage PDSA donnée. De plus, l'acceptabilité de la méthode sera évaluée par le recueil du ressenti des MPDSA sur l'ergonomie, la pertinence des propositions et l'intérêt perçu.

3.2.4. *Implémentation des logiciels de régulation*

Le logiciel de régulation des SAMU est sur le point d'être uniformisé sur l'ensemble du territoire (SI SAMU). Il permettra aux différents CRRA de partager la même infrastructure, les mêmes types de données, et d'identifier les patients par un DRM unique (à ce jour, si l'appel d'un patient localisé en limites de son département aboutit au CRRA d'un département voisin, deux DRM sont créés pour lui : le premier par le CRRA du SAMU hors département, le second au CRRA du SAMU de son département). Ce partage d'information devrait autoriser une plus grande fluidité dans la prise en charge multi-intervenants des patients, y compris lors du transfert de moyens entre territoires voisins.

La sectorisation des effecteurs de soins extrahospitaliers non programmés (secouristes, soignants) fait en effet l'objet de discussions nationales et d'adaptations locales. En ce qui concerne la PDSA, certains départements se sont déjà organisés en secteurs supra-départementaux ou régionaux afin de pallier aux contraintes locales (flotte des MPDSA de faible taille, territoires étendus, etc.). Ces regroupements entraînent probablement l'augmentation des contraintes appliquées aux effecteurs et aux CRRA qui les gèrent : augmentation des distances à parcourir, difficultés à respecter les délais cibles, adaptabilité réduite aux changements d'ordre des visites, etc.

Puisque l'efficacité de notre algorithme génétique semble être corrélée à la complexité des contraintes, il est raisonnable de supposer qu'il constituerait la base d'une aide efficace à la gestion des visites MPDSA dans des configurations étendues, telles que des secteurs d'effectif

supra-départementaux, voire centralisées (suprarégionales ou nationale). Ce genre de système centralisé de répartition des moyens est par exemple utilisé par certaines organisations d'urgence préhospitalière, comme en en Amérique du Nord (BCEHS, Colombie Britannique, Canada) ou en Israël (Magen David Adom). La gestion centralisée de systèmes à effecteurs multiples est en effet largement étudiée depuis quelques années, et fait l'objet de nombreux travaux publiés et en cours (202–204), en ce qu'elle est facilitée par les innovations technologiques relatives au partage de données en temps réel et au développement de réseaux interconnectés (comme les systèmes multi-agents, (cf.3.2.1.1.2, p.92). Cependant, nous n'avons pas eu connaissance de l'existence de systèmes centralisés de gestion des effecteurs généralistes missionnés en urgence tels que les MPDSA.

L'implémentation dans les logiciels des CRRRA, puis dans le SI SAMU, d'un module basé sur notre méthode d'optimisation pourrait permettre d'améliorer la gestion des visites MPDSA, afin d'en renforcer la sécurité et l'efficacité à un niveau supra-départemental.

Un prototype du type « preuve de concept » est en cours de développement, et sera modifié au fil de l'eau d'après les résultats qui seront obtenus au cours des études prévues.

4. CONCLUSION

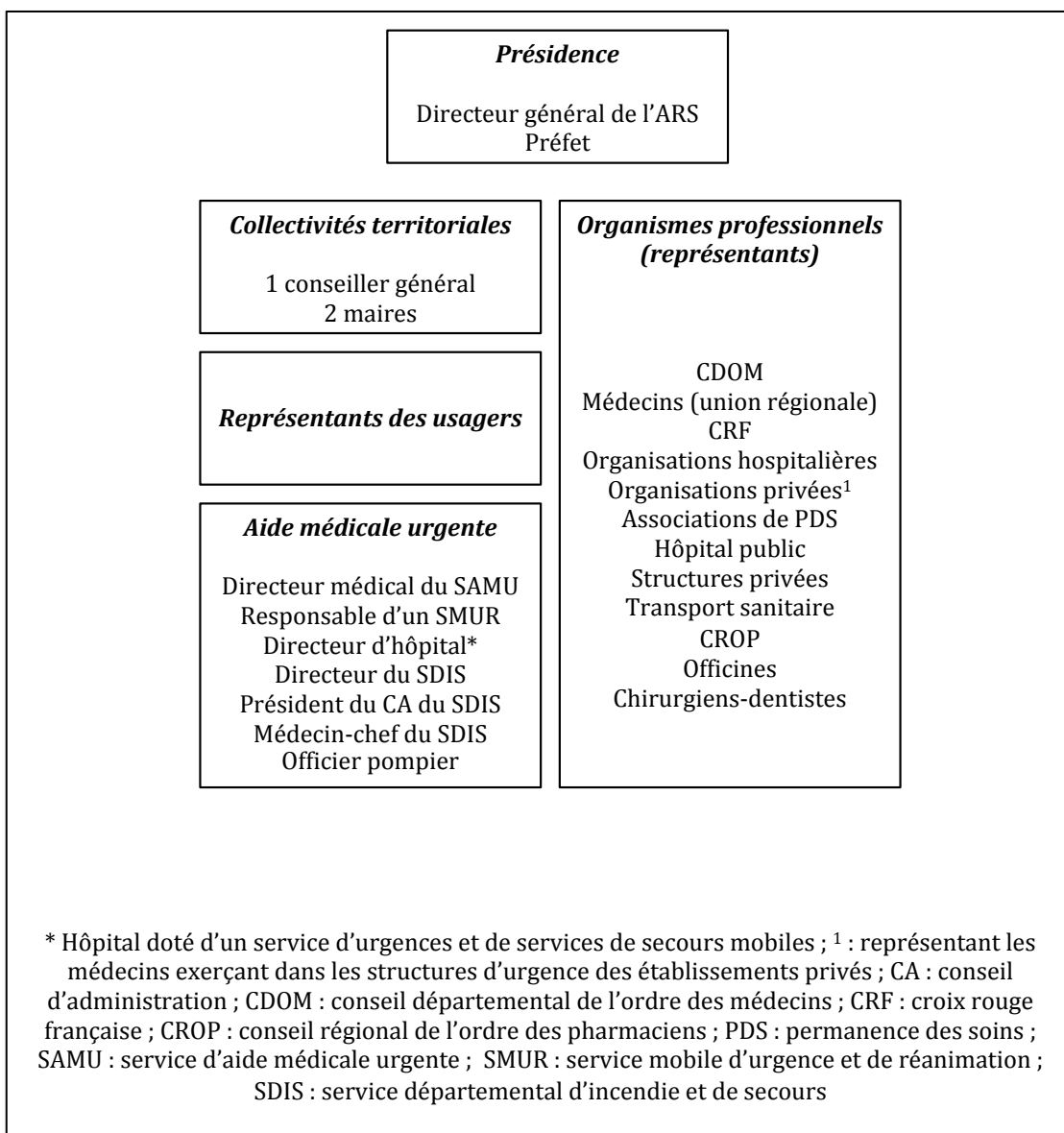
La PDSA est une mission de service public, garante de l'accès aux soins primaires non programmés. Ses enjeux sont nombreux, tant sur le plan de la sécurité des patients que sur celui de la politique de santé. L'effectif mobile des MPDSA, visant à évaluer, traiter et orienter les patients directement à domicile, notamment les patients les plus fragiles, représente un axe d'amélioration majeur de la PDSA, en ce qu'elle est soumise à des contraintes toujours plus fortes (diminution des effectifs de médecins, augmentation de la demande, fragilisation et vieillissement de la population, etc.) et à des organisations hétérogènes en fonction des territoires. Les SAMU, *via* leur CRRA, sont notamment responsables de la centralisation de l'information et de l'organisation de la réponse opérationnelle. Ils ont pour mission de coordonner les effecteurs dont les MPDSA font partie, et sont donc contraints de fournir le juste soin dans des délais cibles.

Nous avons ainsi développé une méthode d'optimisation des visites MPDSA prescrites par un CRRA, basée sur un algorithme évolutionnaire à population de solutions (algorithme génétique). Ce type de méthode méta-heuristique a déjà été éprouvé dans de nombreux problèmes d'optimisation de trajet, mais à notre connaissance, jamais spécifiquement dans celui du trajet des MPDSA en France.



Comparativement à une méthode exacte basée sur un modèle mathématique de programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP), et testé sur 1750 instances de test sur données théoriques simulées, notre algorithme génétique a montré des performances supérieures en termes de réduction de la somme des retards. Par ailleurs, ses performances semblaient s'améliorer avec la complexité des instances (nombre de patients, taille de la flotte MPDSA), suggérant qu'il pourrait être efficace dans une gestion centralisée du processus de visites MPDSA, par exemple à un étage supra-départemental.

La validation de notre méthode en temps réel devra être réalisée après prise en compte des contraintes géomatiques telles que l'état du trafic et la géolocalisation des effecteurs, après le développement d'une application partagée (CRRA et effecteurs) puis l'analyse en vie réelle.

ANNEXES



⁵⁶ Décret n° 2010-810 du 13 juillet 2010

Département du Val de Marne - 94 Schéma de régulation au CRRA-C15 Nombre de médecins régulateurs généralistes présents par plages horaires PDSA					
Période		Lundi au jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanches, jours fériés et ponts mobiles
1 ^{er} déc-31 mars	8h - 12h				3
	12h - 20h			3	
	20h - 0h	2	3		2
1 ^{er} avril-30 nov	8h - 12h				3
	12h - 20h			2	
	20h - 0h	2			2
Année pleine	0h - 8h	2			

⁵⁷ Tiré du cahier des charges de la PDSA 2018 de l'ARS-IDF




Annexe 3 – Territoires de permanence des soins du Val de Marne

Territoires PDSA	Code Insee	Communes	Population municipale INSEE 2013	Population par territoires
94-01	94 002	ALFORTVILLE	44 818	343 511
94-01	94 011	BONNEUIL-SUR-MARNE	16 642	
94-01	94 018	CHARENTON-LE-PONT	30 408	
94-01	94 028	CRETEIL	89 989	
94-01	94 042	JOINVILLE-LE-PONT	18 124	
94-01	94 046	MAISONS-ALFORT	54 470	
94-01	94 068	SAINT-MAUR-DES-FOSSES	74 133	
94-01	94 069	SAINT-MAURICE	14 927	
94-02	94 015	BRY-SUR-MARNE	16 423	310 638
94-02	94 017	CHAMPIGNY-SUR-MARNE	75 961	
94-02	94 033	FONTENAY-SOUS-BOIS	53 124	
94-02	94 058	LE PERREUX-SUR-MARNE	33 480	
94-02	94 052	NOGENT-SUR-MARNE	31 367	
94-02	94 067	SAINT-MANDE	22 398	
94-02	94 079	VILLIERS-SUR-MARNE	28 190	
94-02	94 080	VINCENNES	49 695	
94-03	94 004	BOISSY-SAINT-LEGER	16 399	199 510
94-03	94 019	CHENNEVIERES-S/MARNE	18 134	
94-03	94 060	LA QUEUE-EN-BRIE	12 008	
94-03	94 059	LE PLESSIS-TREVISE	19 157	
94-03	94 044	LIMEIL-BREVANNES	22 816	
94-03	94 047	MANDRES-LES-ROSES	4 431	
94-03	94 048	MAROLLES-EN-BRIE	4 806	
94-03	94 053	NOISEAU	4 699	
94-03	94 055	ORMESSON-SUR-MARNE	10 016	
94-03	94 056	PERIGNY	2 487	
94-03	94 070	SANTENY	3 640	
94-03	94 071	SUCY-EN-BRIE	25 849	
94-03	94 074	VALENTON	12 819	
94-03	94 075	VILLECRESNES	9 674	
94-03	94 078	VILLENEUVE-SAINT-GEORGES	32 575	
94-04	94 001	ABLON-SUR-SEINE	5 388	500 346
94-04	94 003	ARCUEIL	19 746	
94-04	94 016	CACHAN	29 462	
94-04	94 021	CHEVILLY-LARUE	18 894	
94-04	94 022	CHOISY-LE-ROI	42 769	
94-04	94 034	FRESNES	26 645	
94-04	94 037	GENTILLY	16 427	
94-04	94 041	IVRY-SUR-SEINE	58 933	
94-04	94 043	LE KREMLIN-BICETRE	25 863	
94-04	94 038	L'HAY-LES-ROSES	31 201	
94-04	94 054	ORLY	22 377	
94-04	94 065	RUNGIS	5 621	
94-04	94 073	THIAIS	29 280	
94-04	94 076	VILLEJUIF	57 184	
94-04	94 077	VILLENEUVE-LE-ROI	20 481	
94-04	94 081	VITRY-SUR-SEINE	90 075	
TOTAL VAL-DE-MARNE				1 341 831

— Agence Régionale de Santé Ile-de-France – Janvier 2017
 — Cahier des charges régional de la permanence des soins ambulatoires

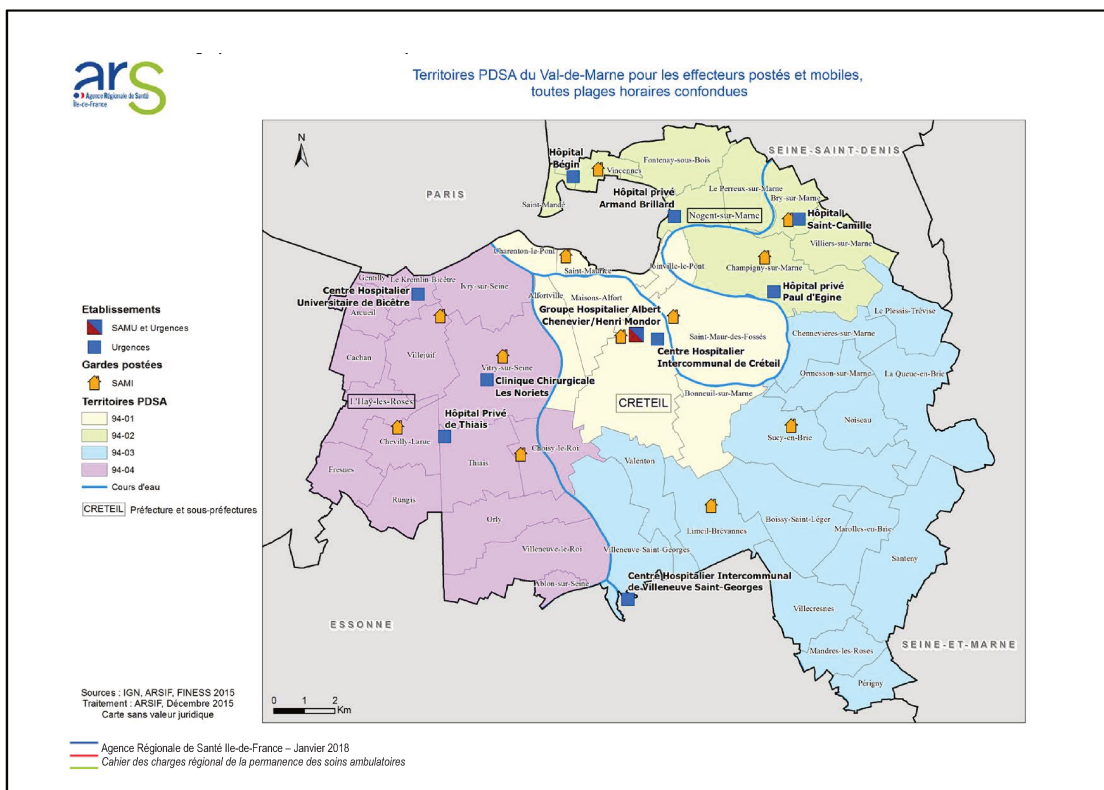
⁵⁸ Tiré du cahier des charges de la PDSA 2018 de l'ARS-IDF

Annexe 4. Synthèse de la répartition des effecteurs de la PDSA dans le Val-de-Marne⁵⁹



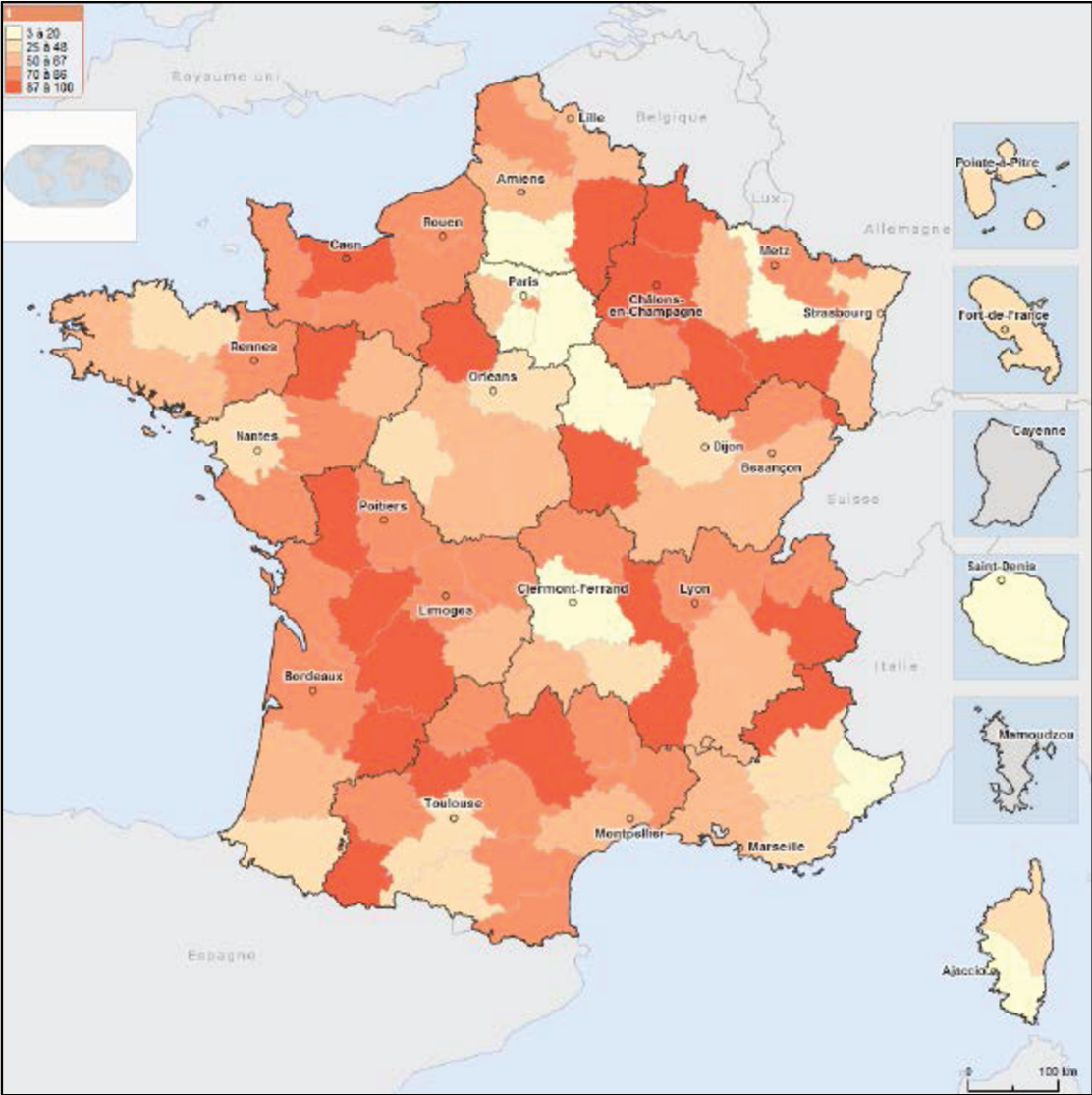
DEPARTEMENT DU VAL DE MARNE EFFECTEURS MOBILES ET EFFECTEURS FIXES			
PLAGES HORAIRES	TERRITOIRES PDSA	Effecteurs fixes	Effecteurs mobiles
Nuit du lundi au dimanche 20h-24h	4	12	8
Nuit du lundi au dimanche 0h-8h	4	0	4
Samedi 12h-20h	4	12	6
Dimanches, Jours fériés et ponts mobiles 8h-20h	4	12	6

Annexe 5. Cartographie des SAMI en fonction des territoires d'effecton de PDSA dans le Val-de-Marne¹²



⁵⁹ Tiré du cahier des charges de la PDSA 2018 de l'ARS-IDF

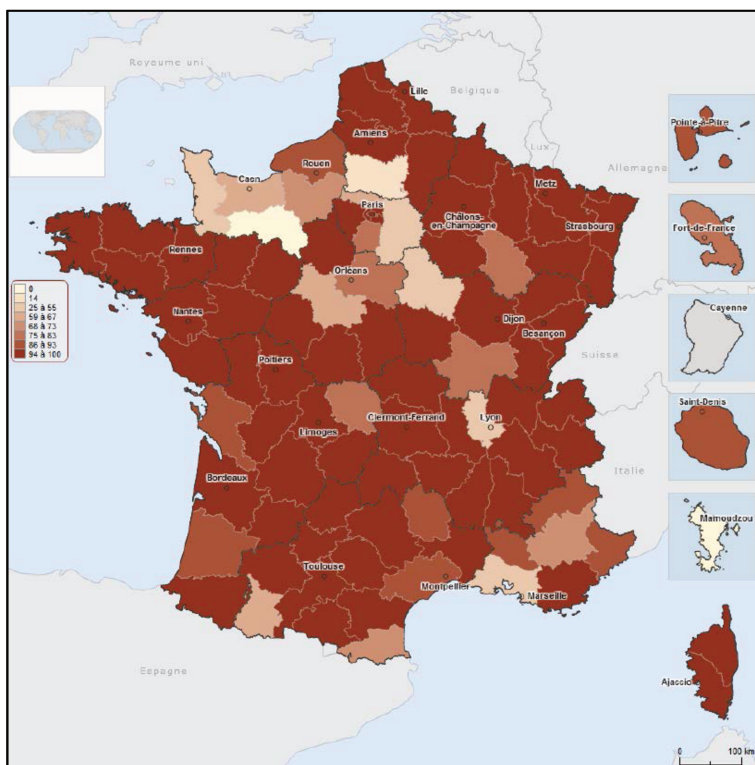
Annexe 6. Taux de participation des médecins généralistes à la PDSA au 31 Décembre 2017 (en %) ⁶⁰



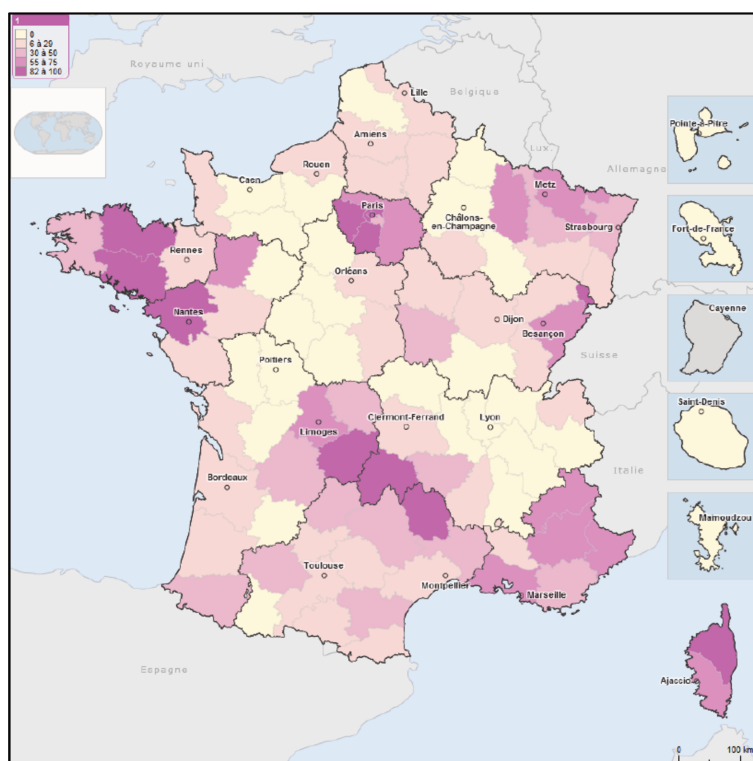
⁶⁰ D'après l'enquête annuelle sur la PDSA effectuée par le CNOM (Mars 2018)

Annexe 7. Taux de couverture des territoires de PDSA par les effecteurs mobiles⁶¹

A. De minuit à 08 heures

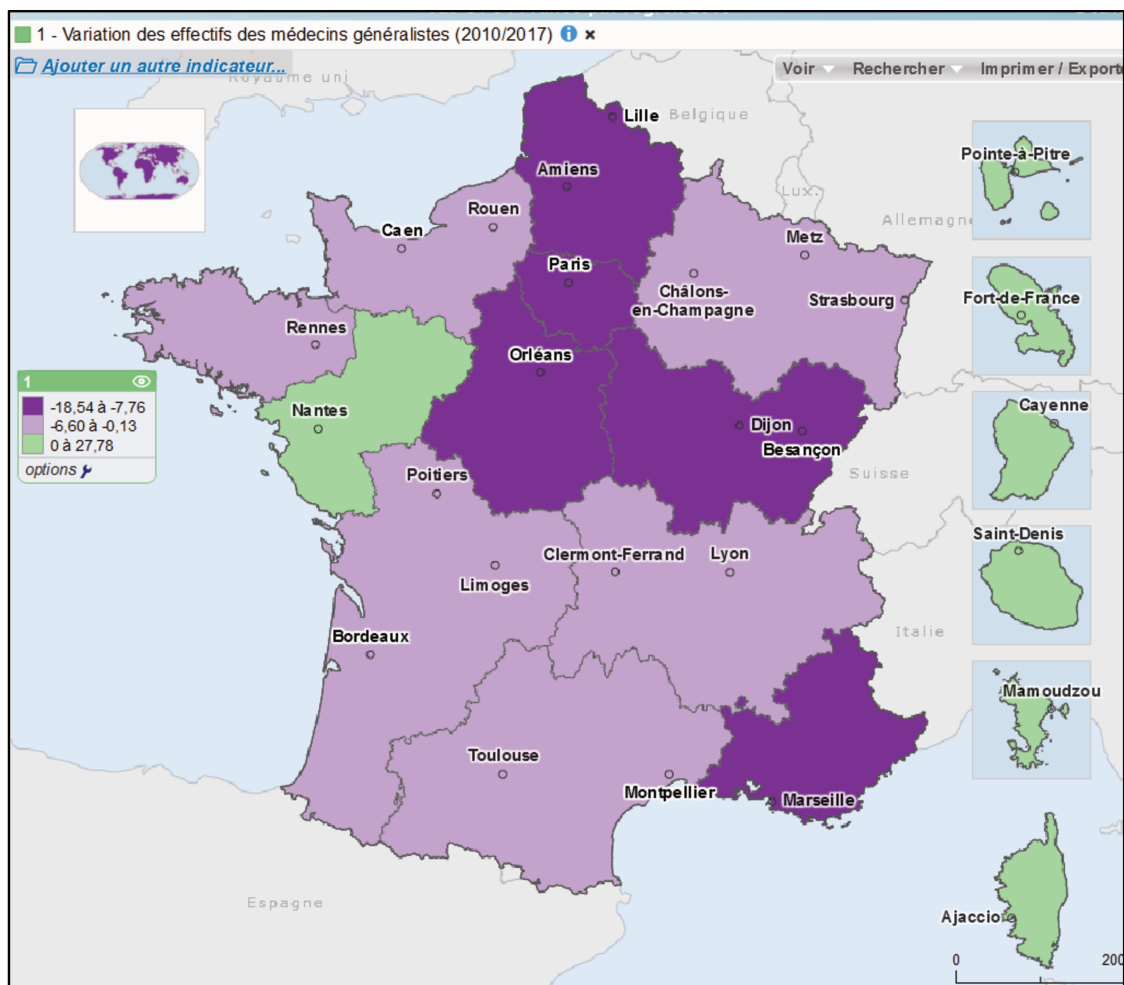


B. De 08 heures à minuit



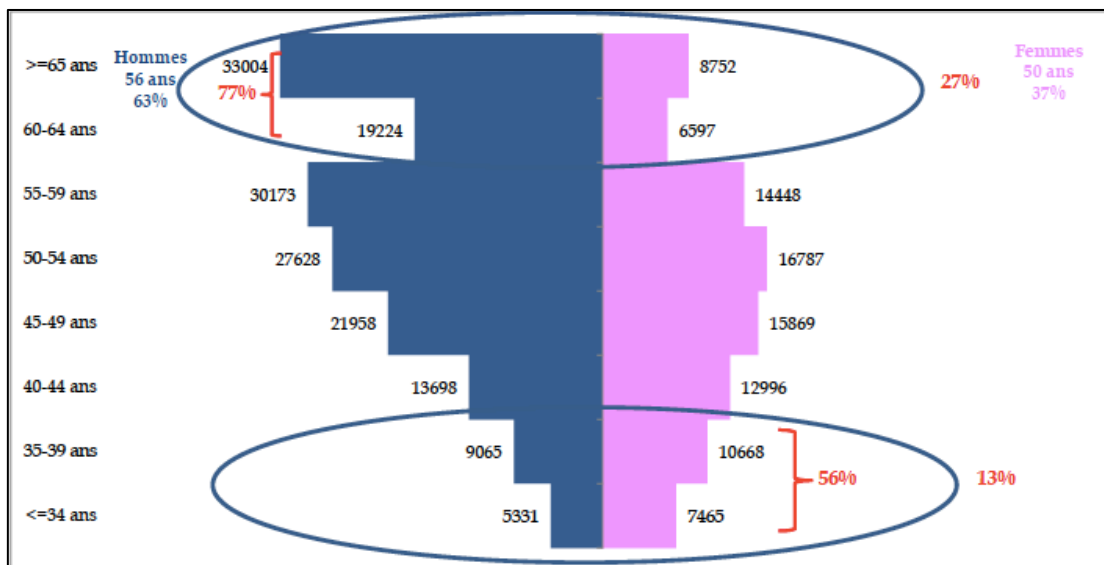
⁶¹ D'après l'enquête annuelle sur la PDSA effectuée par le CNOM (Mars 2018)

Annexe 8. Variation des effectifs de médecins généralistes en activité régulière (2010-2017)⁶²

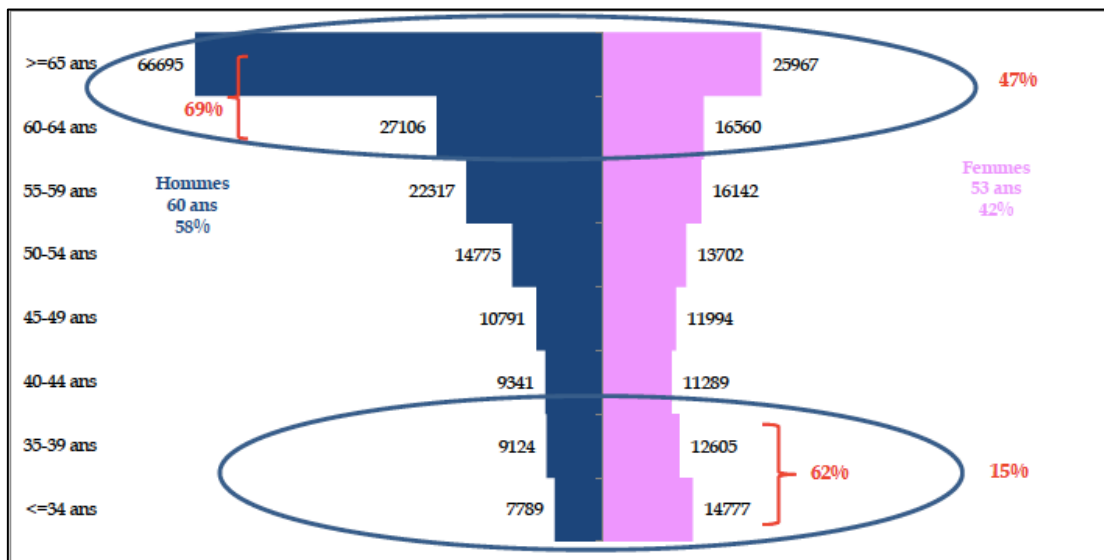


⁶² D'après l'atlas national établi par le CNOM (Janvier 2017)

A. en 2007

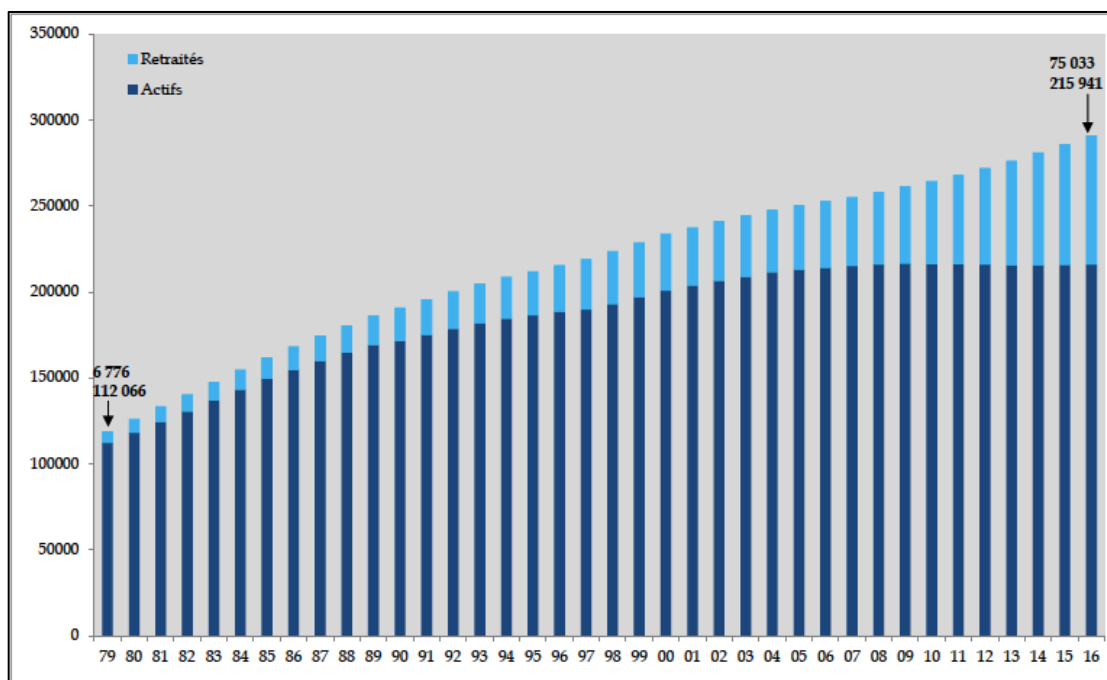


B. en 2017

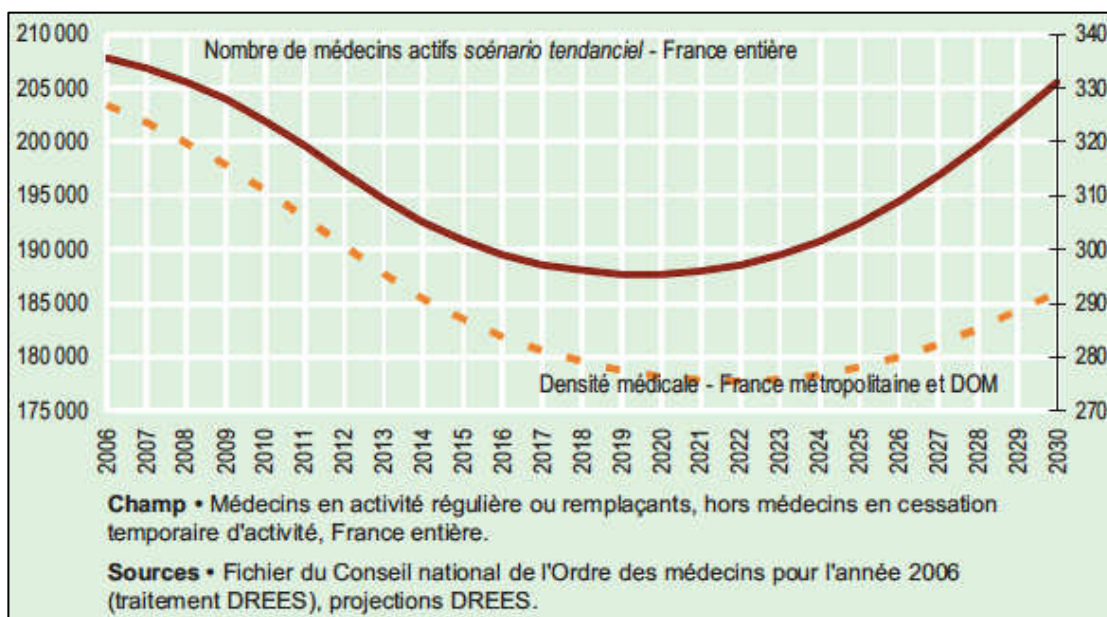


⁶³ D'après l'atlas national établi par le CNOM (Janvier 2017)

Annexe 10. Effectifs des médecins inscrits au CNOM (1979-2017)



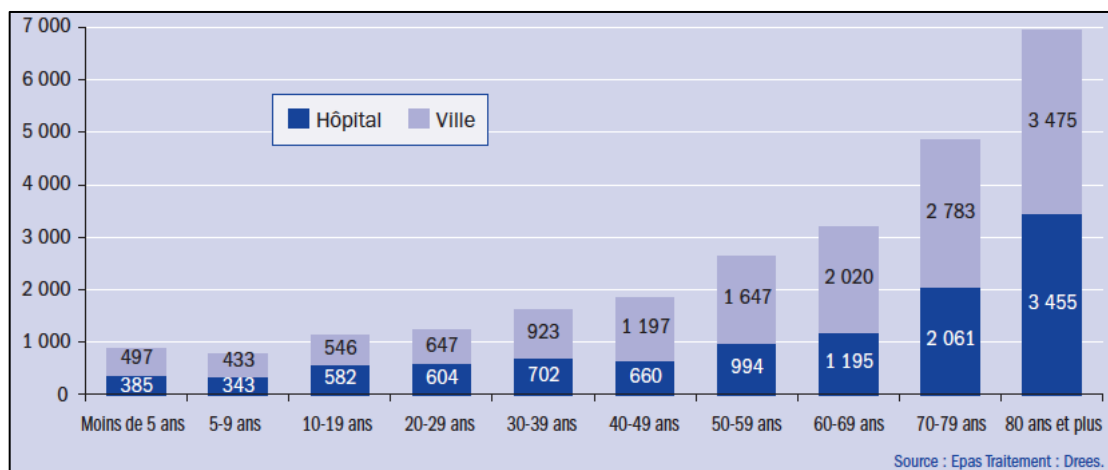
Annexe 11. Évolution du nombre et de la densité de médecins français en activité (2006-2030)⁶⁴



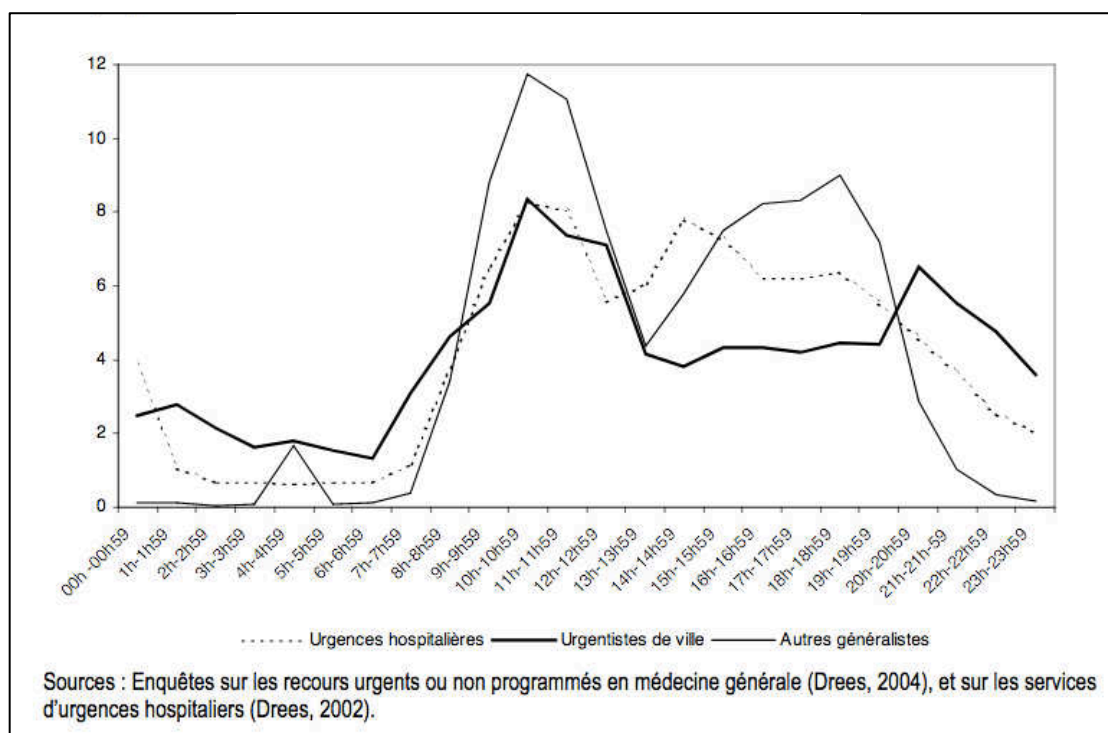
— Nombre de médecins en activité
 - - - Densité (en médecins/100 000 habitants)

⁶⁴ D'après (18)

Annexe 12. Répartition des dépenses de santé en fonction de l'âge en France (2004)⁶⁵



Annexe 13. Répartition horaire des recours urgents (non programmés), en cabinet de ville, auprès des MPDSA et à l'hôpital, selon l'âge des patients⁶⁶



⁶⁵ D'après (26)

⁶⁶ D'après la DREES (76)

REFERENCES

1. Loi n° 2009-879 du 21 juillet 2009 portant réforme de l'hôpital et relative aux patients, à la santé et aux territoires [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020879475&categorieLien=id>
2. Haute Autorité de Santé. Modalités de prise en charge d'un appel de demande de soins non programmés dans le cadre de la régulation médicale [Internet]. 2011. Disponible sur: http://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2011-10/reco2clics_regulation_medicale.pdf
3. SAMU-Urgences de France, Société française de médecine d'urgence, éditeurs. SAMU Centres 15. Référentiel et guide d'évaluation [Internet]. 2015. Disponible sur: www.samu-urgences-de-france.fr/medias/files/155/802/sfmu-sudf_referentiel_samu_2015.pdf
4. CNOM. Enquête du conseil national de l'ordre des médecins sur l'état des lieux de la permanence des soins ambulatoires en médecine générale au 31 Décembre 2017 [Internet]. 2018. Disponible sur: https://www.conseil-national.medecin.fr/sites/default/files/cnom_enquete_pds_2017_0.pdf
5. SAMU-Urgences de France. Livre blanc. Organisation de la médecine d'urgence en France : un défi pour l'avenir. Les propositions de SAMU-Urgences de France [Internet]. 2015. Disponible sur: <http://www.samu-urgences-de-france.fr/medias/files/129/821/livre-blanc-sudf-151015.pdf>
6. Chiffres clés de la région Ile-de-France [Internet]. Paris: CCI Paris Ile-de-France; 2018 juin p. 68. Disponible sur: <http://www.cci-paris-idf.fr/sites/default/files//crocis/wysiwyg/Chiffres-cles-2018derlight.pdf>
7. ARS. Chiffres clés de la santé en Ile-de-France [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://www.iledefrance.ars.sante.fr/chiffres-cles-de-la-sante-en-ile-de-france>
8. DREES. La démographie des médecins (RPPS). Tableau 7. Densité des médecins par spécialité, modes d'exercice regroupés et zone d'inscription [Internet]. 2016. Disponible sur: <http://www.data.drees.sante.gouv.fr/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=3342>
9. Patrick Bouet, Jean-François Rault, Gwénaëlle Le Breton-Lerouvillois. Atlas de la démographie médicale. Situation au 1er Janvier 2016 [Internet]. Paris: Conseil National de l'Ordre des Médecins; 2016 p. 326. Disponible sur: https://www.conseil-national.medecin.fr/sites/default/files/atlas_de_la_demographie_medicale_2016.pdf
10. DREES. Le panorama des établissements de santé, édition 2014. [Internet]. 2014. Disponible sur: <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/panorama2014.pdf>
11. AP-HP, Service presse. Même si le taux de réponse aux appels des 4 SAMU de l'AP-HP est nettement supérieur à ceux indiqués par le Point, l'AP-HP rappelle sa volonté d'améliorer ses performances [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://www.aphp.fr/contenu/meme-si-le-taux-de-reponse-aux-appels-des-4-samu-de-lap-hp-est-nettement-superieur-ceux>
12. INSEE. Département du Val-de-Marne. Dossier complet [Internet]. 2008 sept. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=DEP-94#chiffre-cle-1>
13. INSEE. Comparateur de territoire. Val-de-Marne [Internet]. 2017. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=DEP-94>
14. ARS. Cahier des charges régional 2017. [Internet]. 2016. Disponible sur: <https://www.iledefrance.ars.sante.fr/sites/default/files/2017-01/PDSA-Cahier-des-charges-2017.pdf>
15. Debin M, Souty C, Turbelin C, Blanchon T, Boëlle P-Y, Hanslik T, et al. Determination of French influenza outbreaks periods between 1985 and 2011 through a web-based Delphi method. BMC Med Inform Decis Mak. 2013;13(1):138.
16. Loi n° 2002-1487 du 20 décembre 2002 de financement de la sécurité sociale pour 2003. [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000235196>
17. CNOM. Atlas de la démographie médicale en France. Profils comparés : 2007-2017. Les territoires au cœur de la réflexion. Situation au 1er Janvier 2017. [Internet]. 2017. Disponible sur: https://www.conseil-national.medecin.fr/sites/default/files/atlas_de_la_demographie_medicale_2017.pdf
18. Ketty Attal-Toubert, Mélanie Vanderschelden. La démographie médicale à l'horizon 2030 : de nouvelles projections nationales et régionales. Études Résultats DREES. févr 2009;(679):8.
19. Mourgues J-M. Atlas de la démographie médicale en France. Profils comparés 2007/2017 - Les territoires au cœur de la réflexion. Situation au 1er Janvier 2017 [Internet]. Paris: Conseil National de l'Ordre des Médecins; 2018 janv p. 323. Disponible sur: https://www.conseil-national.medecin.fr/sites/default/files/atlas_2014.pdf
20. SIHP. Les aspirations professionnelles des jeunes médecins d'Ile-de-France. [Internet]. 2013 juin 20 [cité 5 juin 2018]; Paris. Disponible sur: <https://www.urps-med-idf.org/wp-content/uploads/2017/05/12285.pdf>
21. N° 2837 - Rapport d'information de Mme Catherine Lemorton déposé en application de l'article 145 du règlement, par la commission des affaires sociales, en conclusion des travaux d'une mission d'information sur l'organisation de la permanence des soins [Internet]. [cité 19 févr 2016]. Disponible sur: <http://www.assemblee-nationale.fr/14/rap-info/i2837.asp>
22. Commissariat général à l'égalité des territoires (CGET). Installation des jeunes médecins généralistes dans les territoires [Internet]. 2015. Disponible sur: www.cgnet.gouv.fr/sites/cgnet.gouv.fr/files/atoms/files/en-bref-04-cget-09-2015.pdf

23. Vergier N, Lefebvre-Hoang I. Les dossiers de la DREES. Déserts médicaux : comment les définir ? Comment les mesurer ? [Internet]. 2017. Disponible sur: <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/dd17.pdf>
24. Castaigne S, Lasnier Y. Les avis du CESE. Les déserts médicaux. [Internet]. Conseil économique social et environnemental; 2017 déc p. 66. Report No.: CESL1100027X. Disponible sur: <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/174000867.pdf>
25. Blanpain N, Chardon O. Projections de population 2007-2060 pour la France métropolitaine : méthode et principaux résultats. DREES.
26. Raynaud D. La consommation de soins des personnes âgées. Actual Doss En Santé Publique. sept 2006;(56):4.
27. Haut conseil pour l'avenir de l'assurance maladie (HCAAM). Innovation et système de santé. Document n°9 : personnes âgées, état de santé et dépendance : quelques éléments statistiques. [Internet]. 2015 avr p. 37. Disponible sur: http://www.securite-sociale.fr/IMG/pdf/document_9_-_personnes_agees_etat_de_sante_et_dependance_-_quelques_elements_statistiques_.pdf
28. Legrain S. Consommation médicamenteuse chez le sujet âgé. Consomm Prescr Iatrogénie Obs. 2005;
29. Polton D, Sermet C. La santé des personnes âgées. Le vieillissement de la population va-t-il submerger le système de santé ? InVS. févr 2006;(5-6/2006):16.
30. Viquant JP, Mayo-Simbsler S. Vieillesse et prise en charge des maladies chroniques. Actual Doss En Santé Publique. 2010;72:33-5.
31. Tenand M. Hausse des dépenses de santé: Quel rôle joue le vieillissement démographique ? médecine/sciences. févr 2016;32(2):204-10.
32. Des tendances de fond aux mouvements de court terme. Point de conjoncture n°15. [Internet]. Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés; 2003 juill p. 28. Disponible sur: https://www.ameli.fr/fileadmin/user_upload/documents/Point_conjoncture_15.pdf
33. Dormont B, Grignon M, Huber H. Health expenditure growth: reassessing the threat of ageing. Health Econ. 2006;15(9):947-63.
34. Bruguère M-T. Santé et territoires : à la recherche de l'équilibre. Rapport d'information de Mme Marie-Thérèse Bruguère, fait au nom de la délégation aux collectivités territoriales. [Internet]. Sénat; 2011 juin p. 81. Report No.: 600. Disponible sur: <http://www.senat.fr/rap/r10-600/r10-6001.pdf>
35. Aubert N, Roux-Dufort C. Le culte de l'urgence: la société malade du temps. Paris: Flammarion; 2014.
36. Fabien Cassar. Pharma Express : le Uber Eats du médicament s'installe à Marseille. La Provence [Internet]. 6 avr 2018 [cité 4 juin 2018]; Disponible sur: <https://www.laprovence.com/article/innovations/5000176/pharma-express-le-uber-eats-du-medicament-sinstalle-a-marseille.html>
37. Maurine Vautrin. Avec Medadom, commandez un médecin à domicile [Internet]. Réponse Coco. 2017 [cité 6 avr 2018]. Disponible sur: <http://actualites.reponse-conso.fr/medadom-commandez-medecin-a-domicile/>
38. Commander son médecin comme un taxi. La dépêche [Internet]. 4 avr 2017; Disponible sur: <https://www.ladepeche.fr/article/2017/04/04/2550167-commandez-son-medecin-comme-un-taxi.html>
39. Rendez-vous médicaux non honorés, demandes de soins non programmés : état des lieux et solutions. Enquête auprès des médecins libéraux d'Ile-de-France. URPS-IDF. Commission d'accès aux soins; 2015.
40. Fréquence des soins non programmés en médecine générale en France, aux heures d'ouverture des cabinets de ville [Internet]. Union régionale des médecins libéraux des Pays de la Loire (URML); 2017. Disponible sur: http://www.santepaysdelaloire.com/ors/sites/ors/files/publications/ParcoursSoins/2017_note_urml_snp_0.pdf
41. Anne-Laure Gallay, Thomas Genty. Les Français et les déserts médicaux [Internet]. 2015 oct; Paris. Disponible sur: https://staticswww.bva-group.com/wp-content/uploads/2017/02/fichier_ciss_-_les_francais_et_les_deserts_medicaux_-_resultats_completsdbfb7.pdf
42. URPS, Commission accès aux soins. Rendez-vous médicaux non honorés, demandes de soins non programmés : état des lieux et solution. Enquête auprès des médecins libéraux d'Ile-de-France [Internet]. Paris: URPS IDF; 2015 juin [cité 5 juin 2018] p. 42. Disponible sur: <https://www.urps-med-idf.org/wp-content/uploads/2017/05/16197.pdf>
43. Carrasco V, Baubeau D. Les usagers des urgences. Premiers résultats d'une enquête nationale. Actual Doss En Santé Publique [Internet]. sept 2005;(52). Disponible sur: <http://www.hcsp.fr/explore.cgi/ad521822.pdf>
44. Lazarovici C, Somme D, Carrasco V, Baubeau D, Saint-Jean O. Caractéristiques, consommation de ressources des usagers des services d'urgences de plus de 75 ans en France. Presse Médicale. déc 2006;35(12):1804-10.
45. Cohen L, Génisson C, Savary R-P. Rapport d'information fait au nom de la commission des affaires sociales sur les urgences hospitalières. Paris: Sénat; 2017 juill p. 109. Report No.: 685.
46. Nicolas M, Demoor C, Guérin P, Chansard P, Toubiana L. Évaluation en permanence de soins de la typologie des appels des structures SOS Médecins la nuit profonde entre 0h et 7h. Rev DÉpidémiologie Santé Publique. sept 2014;62:S191.
47. Vedsted P, Olesen F. Are the serious problems in cancer survival partly rooted in gatekeeper principles? An ecologic study. Br J Gen Pract. août 2011;61(589):e508-12.
48. Shi L, Macinko J, Starfield B, Politzer R, Xu J. Primary care, race, and mortality in US states. Soc Sci Med. juill 2005;61(1):65-75.
49. Cartier T, Mercier A, De Pourvoirville N, Huas C, Ruelle y, Zerbib Y, et al. Constats sur l'organisation des soins primaires en France. Exercer. 2012;Hors-série(101):65-71.

50. Polton D. Accroître la qualité et l'efficacité du système de santé en s'appuyant sur les soins primaires, la démarche de l'assurance maladie en France. *Rev Fr Aff Soc.* 2010;(3):97-101.
51. Haut conseil de la santé publique. Les inégalités sociales de santé : sortir de la fatalité. 2009 déc p. 101.
52. Chaix B, Chauvin P. Tobacco and alcohol consumption, sedentary lifestyle and overweightness in France: A multilevel analysis of individual and area-level determinants. *Eur J Epidemiol.* juin 2002;18(6):531-8.
53. Ross CE, Mirowsky J. Neighborhood Disadvantage, Disorder, and Health. *J Health Soc Behav.* sept 2001;42(3):258.
54. Robert SA, Reither EN. A multilevel analysis of race, community disadvantage, and body mass index among adults in the US. *Soc Sci Med.* déc 2004;59(12):2421-34.
55. Thierry Lang. Les inégalités sociales de santé. *Actual Doss En Santé Publique.* déc 2010;(73):51.
56. de Foucaud I. Malade la nuit ou le dimanche ? « Appelez le 15 ». *Le Figaro.* 13 janv 2015;
57. DREES. Les établissements de santé. Panoramas de la DREES Santé. [Internet]. 2016. Disponible sur: <http://drees.solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/pano-etab-sante-2016.pdf>
58. Adams JG. Emergency Department Overuse: Perceptions and Solutions. *JAMA.* 20 mars 2013;309(11):1173.
59. Hugli O, Potin M, Schreyer N, Yersin B. Engorgement des centres d'urgences: une raison légitime de refuser l'accès aux patients non urgents. *Rev Médicale Suisse.* 2006;(75).
60. Raven MC, Lowe RA, Maselli J, Hsia RY. Comparison of presenting complaint vs discharge diagnosis for identifying « nonemergency » emergency department visits. *JAMA.* 20 mars 2013;309(11):1145-53.
61. Derlet RW, Richards JR. Emergency department overcrowding in Florida, New York, and Texas. *South Med J.* août 2002;95(8):846-9.
62. Derlet RW, Richards JR. Overcrowding in the nation's emergency departments: complex causes and disturbing effects. *Ann Emerg Med.* janv 2000;35(1):63-8.
63. Källberg A-S, Ehrenberg A, Florin J, Östergren J, Göransson KE. Physicians' and nurses' perceptions of patient safety risks in the emergency department. *Int Emerg Nurs.* juill 2017;33:14-9.
64. Hakimzada AF, Green RA, Sayan OR, Zhang J, Patel VL. The nature and occurrence of registration errors in the emergency department. *Int J Med Inf.* mars 2008;77(3):169-75.
65. Weigl M, Müller A, Holland S, Wedel S, Woloshynowych M. Work conditions, mental workload and patient care quality: a multisource study in the emergency department. *BMJ Qual Saf.* 2016;25(7):499-508.
66. Lu DW, Dresden S, McCloskey C, Branzetti J, Gisondi MA. Impact of Burnout on Self-Reported Patient Care Among Emergency Physicians. *West J Emerg Med.* déc 2015;16(7):996-1001.
67. Bragard I, Dupuis G, Fleet R. Quality of work life, burnout, and stress in emergency department physicians: a qualitative review. *Eur J Emerg Med Off J Eur Soc Emerg Med.* août 2015;22(4):227-34.
68. Adriaenssens J, De Gucht V, Maes S. Determinants and prevalence of burnout in emergency nurses: a systematic review of 25 years of research. *Int J Nurs Stud.* févr 2015;52(2):649-61.
69. La sécurité sociale. Rapport sur l'application des lois de financement de la sécurité sociale. [Internet]. Paris: Cour des comptes; 2013 sept p. 623. Disponible sur: https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2017-09/20170920-rapport-securite-sociale-2017_1.pdf
70. Les urgences médicales : constats et évolution récente [Internet]. Paris: Cour des comptes; 2017 nov [cité 5 juin 2018] p. 35. Disponible sur: <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/12UrgencesMedicales.pdf>
71. Mesnier T. Assurer le premier accès aux soins. Organiser les soins non programmés dans les territoires [Internet]. Paris: Ministère des Solidarités et de la Santé; 2018 mai [cité 4 juin 2018] p. 84. Disponible sur: http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_snp_vf.pdf
72. Livre blanc. Les centres d'enseignement des soins d'urgence [Internet]. Association nationale des CESU; 2016. Disponible sur: [https://www.ancesu.fr/images/files/Livre blanc DEF janvier 2017.pdf](https://www.ancesu.fr/images/files/Livre%20blanc%20DEF%20janvier%202017.pdf)
73. Syndicat national de l'aide médical urgente (France). Guide d'aide à la régulation médicale. Paris: SFEM; 2009. 517 p.
74. Hartmann L, Ulmann P, Rochaix L. Régulation de la demande de soins non programmés en Europe. Comparaison des modes d'organisation de la permanence des soins en Allemagne, Espagne, France, Italie, Royaume-Uni et Suède. *Rev Fr Aff Soc.* 2006;(2-3):91-119.
75. Nicolas M, Demoor C, Guérin P, Chansard P, Toubiana L. Évaluation en permanence de soins de la typologie des appels des structures SOS Médecins la nuit profonde entre 0h et 7h. *Rev DÉpidémiologie Santé Publique.* sept 2014;62:S191.
76. Gouyon M. Les urgences en médecine générale [Internet]. DREES; 2006 avr. (Série statistiques). Report No.: 94. Disponible sur: <http://www.epsilon.insee.fr/jspui/bitstream/1/13662/1/seriestat94.pdf>
77. Douplat M, Langlois R, Carpentier F, Picco C. Pertinence de l'envoi des patients aux urgences par SOS médecins Grenoble. *J Eur Urgences.* juin 2009;22:A108.
78. Bouchammach F. État des lieux de l'activité de SOS Médecins Pau lors de la permanence des soins en médecine ambulatoire : étude rétrospective descriptive des visites en 2013 [Internet]. Bordeaux; 2015. Disponible sur: <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01164499/document>
79. Meurisse C. Médecin mobile : un nouvel effecteur complétant la permanence des soins ambulatoires au sein d'un département pilote. Sous la direction de Philippe Compain. Nantes : Université de Nantes; 2012. Thèse de doctorat : médecine : Nantes : 2012.

80. Berthonneau C. Expérimentation d'un médecin mobile de permanence des soins en médecine générale ambulatoire sur le bassin de Muret. Evaluation lors du premier semestre 2014. Sous la direction de Philippe Poinot. Toulouse: Toulouse III - Paul Sabatier; 2015. Thèse de doctorat : médecine : Toulouse. Disponible sur: <http://thesesante.ups-tlse.fr/822/1/2015TOU31023.pdf>
81. Marty J. POSAMU (Performance et Optimisation Systémique de l'Aide Médicale Urgente) [Internet]. 2010. Disponible sur: http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-10-VILL-0001
82. Mermet E, Perret J. Le projet POSAMU : contrôler l'accessibilité multi-échelles dans un contexte d'urgence [Internet]. 2013. Disponible sur: <http://www.rencontres-sig-la-lettre.fr/wp-content/uploads/2013/06/R2013-urgence-Mermet.pdf>
83. Canu S. Introduction à l'optimisation [Internet]. INSA Rouen; 2016. Disponible sur: https://moodle.insa-rouen.fr/pluginfile.php/57565/mod_resource/content/2/Slides_03_LP_intro.pdf
84. Nemhauser GL, Wolsey LA. Integer and combinatorial optimization. 1999.
85. Kleiner M. Méthodes et outils d'optimisation [Internet]. 2013 mai. Disponible sur: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUK EwjBufO5icXeAhUpxoUKHdX8D4IQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.lsis.org%2Fkleinerm%2Ffiles%2FAM%2FCM1.pdf&usq=AOvVaw1pOlBiNwWWLLAaGK0iqwOU>
86. Ben Ismail S. Introduction à l'optimisation combinatoire [Internet]. Telecom Bretagne; 2012. Disponible sur: <http://perso.telecom-bretagne.eu/sahbibenismail/data/teaching/optimisation/C5.pdf>
87. Carpaneto G, Dell'amico M, Fischetti M, Toth P. A branch and bound algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Networks*. août 1989;19(5):531-48.
88. Fischetti M, Toth P, Vigo D. A Branch-and-Bound Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem on Directed Graphs. *Oper Res*. oct 1994;42(5):846-59.
89. Letchford AN, Lysgaard J, Eglese RW. A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem. *J Oper Res Soc*. déc 2007;58(12):1642-51.
90. Allaoua H, Borne S, Létocart L, Wolfler Calvo R. A matheuristic approach for solving a home health care problem. *Electron Notes Discrete Math*. juin 2013;41:471-8.
91. Liu R, Xie X, Augusto V, Rodriguez C. Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care. *Eur J Oper Res*. nov 2013;230(3):475-86.
92. Laporte G, Ropke S, Vidal T. Chapter 4: Heuristics for the Vehicle Routing Problem. In: Toth P, Vigo D, éditeurs. *Vehicle Routing* [Internet]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2014 [cité 6 déc 2018]. p. 87-116. Disponible sur: <http://epubs.siam.org/doi/10.1137/1.9781611973594.ch4>
93. Gendreau M, Potvin J-Y, Bräumlaysy O, Hasle G, Løkketangen A. Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and Its Extensions: A Categorized Bibliography. In: Golden B, Raghavan S, Wasil E, éditeurs. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges* [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2008 [cité 14 sept 2018]. p. 143-69. Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-77778-8_7
94. Rothlauf F, Goldberg DE, Heinzl A. Network random keys - a tree representation scheme for genetic and evolutionary algorithms. *Evol Comput*. 2002;10(1):75-97.
95. Mathivet V. L'intelligence artificielle pour les développeurs: concepts et implémentations en C#. 2017.
96. Clarke G, Wright JW. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Oper Res*. août 1964;12(4):568-81.
97. Grandcolas S. Algorithmes gloutons [Internet]. Département informatique et interactions. Faculté des sciences. Aix-Marseille Université; Disponible sur: <http://www.dil.univ-mrs.fr/~gcolas/algorithmes/slides/gloutons.pdf>
98. Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* [Internet]. Perth, WA, Australia: IEEE; 1995 [cité 10 sept 2018]. p. 1942-8. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/488968/>
99. Marinakis Y, Marinaki M, Dounias G. A hybrid particle swarm optimization algorithm for the vehicle routing problem. *Eng Appl Artif Intell*. juin 2010;23(4):463-72.
100. Ai TJ, Kachitvichyanukul V. A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Comput Oper Res*. mai 2009;36(5):1693-702.
101. Ai TJ, Kachitvichyanukul V. Particle swarm optimization and two solution representations for solving the capacitated vehicle routing problem. *Comput Ind Eng*. févr 2009;56(1):380-7.
102. Chatterjee S, Das S. Ant colony optimization based enhanced dynamic source routing algorithm for mobile Ad-hoc network. *Inf Sci*. févr 2015;295:67-90.
103. Wang J, Osagie E, Thulasiraman P, Thulasiram RK. HOPNET: A hybrid ant colony optimization routing algorithm for mobile ad hoc network. *Ad Hoc Netw*. juin 2009;7(4):690-705.
104. Zhang Q, Xiong S. Routing optimization of emergency grain distribution vehicles using the immune ant colony optimization algorithm. *Appl Soft Comput*. oct 2018;71:917-25.
105. Mazin Abed Mohammed, Mohd Khanapi Abd Ghani, Omar Ibrahim Obaid, Salama A. Mostafa, Mohd Sharifuddin Ahmad, Dheyaa Ahmed Ibrahim, et al. A Review of Genetic Algorithm Applications in Solving Vehicle Routing Problem. *J Eng Appl Sci*. 2017;12(16):4267-83.
106. Neri F, Cotta C. Memetic algorithms and memetic computing optimization: A literature review. *Swarm Evol Comput*. févr 2012;2:1-14.

107. Cattaruzza D, Absi N, Feillet D, Vidal T. A memetic algorithm for the Multi Trip Vehicle Routing Problem. *Eur J Oper Res.* août 2014;236(3):833-48.
108. Ramadan RM, Gasser SM, El-Mahallawy MS, Hammad K, El Bakly AM. A memetic optimization algorithm for multi-constrained multicast routing in ad hoc networks. Li X, éditeur. *PLOS ONE.* 6 mars 2018;13(3):e0193142.
109. Nalepa J, Blocho M. Adaptive memetic algorithm for minimizing distance in the vehicle routing problem with time windows. *Soft Comput.* juin 2016;20(6):2309-27.
110. Brandao De Oliveira H, Alexandrino J, De Souza M. Memetic and Genetic Algorithms: A Comparison among Different Approaches to Solve Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: 2006 Sixth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'06) [Internet]. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE; 2006 [cité 25 sept 2018]. p. 55-55. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4041435/>
111. Alfredo Tang Montané F, Galvão RD. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service. *Comput Oper Res.* mars 2006;33(3):595-619.
112. Gendreau M, Hertz A, Laporte G. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Manag Sci.* oct 1994;40(10):1276-90.
113. Irnich S, Toth P, Vigo D. Chapter 1: The Family of Vehicle Routing Problems. In: Toth P, Vigo D, éditeurs. *Vehicle Routing* [Internet]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2014 [cité 6 déc 2018]. p. 1-33. Disponible sur: <http://epubs.siam.org/doi/10.1137/1.9781611973594.ch1>
114. Laporte G, Osman IH. Routing problems: A bibliography. *Ann Oper Res.* déc 1995;61(1):227-62.
115. The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization. *J Oper Res Soc.* mai 1986;37(5):535-6.
116. Dantzig GB, Ramser JH. The Truck Dispatching Problem. *Manag Sci.* oct 1959;6(1):80-91.
117. Ben Ismail S, Legras F, Coppin G. Synthèse du problème de routage de véhicules. *Télécom Bretagne*; 2011. (Collection des rapports de recherche de Télécom Bretagne). Report No.: RR-201-03-LUSSI.
118. Toth P, Vigo D, éditeurs. *Vehicle routing: problems, methods, and applications.* Second edition. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics : Mathematical Optimization Society; 2014. 463 p. (MOS-SIAM series on optimization).
119. Toth P, Vigo D, éditeurs. *The Vehicle Routing Problem* [Internet]. Society for Industrial and Applied Mathematics; 2002 [cité 12 déc 2018]. Disponible sur: <http://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898718515>
120. Desaulniers G, Madsen OBG, Ropke S. Chapter 5: The Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: Toth P, Vigo D, éditeurs. *Vehicle Routing* [Internet]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2014 [cité 6 déc 2018]. p. 119-59. Disponible sur: <http://epubs.siam.org/doi/10.1137/1.9781611973594.ch5>
121. Battarra M, Cordeau J-F, Iori M. Chapter 6: Pickup-and-Delivery Problems for Goods Transportation. In: Toth P, Vigo D, éditeurs. *Vehicle Routing* [Internet]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2014 [cité 6 déc 2018]. p. 161-91. Disponible sur: <http://epubs.siam.org/doi/10.1137/1.9781611973594.ch6>
122. Wilson N, Colvin N. Computer control of the Rochester dial-a-ride system. Technical Report. Cambridge, Massachusetts: Department of civil engineering, Massachusetts Institute of Technology; 1977. Report No.: R 77-31.
123. Psaraftis HN. A Dynamic Programming Solution to the Single Vehicle Many-to-Many Immediate Request Dial-a-Ride Problem. *Transp Sci.* mai 1980;14(2):130-54.
124. Chen H-K, Hsueh C-F, Chang M-S. The real-time time-dependent vehicle routing problem. *Transp Res Part E Logist Transp Rev.* sept 2006;42(5):383-408.
125. Creput J-C, Hajjam A, Koukam A, Kuh O. Dynamic Vehicle Routing Problem for Medical Emergency Management. In: Mwasiagi JI, éditeur. *Self Organizing Maps - Applications and Novel Algorithm Design* [Internet]. InTech; 2011 [cité 26 juin 2017]. Disponible sur: <http://www.intechopen.com/books/self-organizing-maps-applications-and-novel-algorithm-design/dynamic-vehicle-routing-problem-for-medical-emergency-management>
126. Pillac V, Gendreau M, Guéret C, Medaglia AL. A review of dynamic vehicle routing problems. *Eur J Oper Res.* févr 2013;225(1):1-11.
127. Baldacci R, Toth P, Vigo D. Recent advances in vehicle routing exact algorithms. *4OR.* 29 nov 2007;5(4):269-98.
128. Cordeau J-F, Laporte G, Savelsbergh MWP, Vigo D. Chapter 6 Vehicle Routing. In: *Handbooks in Operations Research and Management Science* [Internet]. Elsevier; 2007 [cité 26 mars 2018]. p. 367-428. Disponible sur: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927050706140062>
129. Jailliet P, Wagner MR. Generalized Online Routing: New Competitive Ratios, Resource Augmentation, and Asymptotic Analyses. *Oper Res.* juin 2008;56(3):745-57.
130. SOHOMA. Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing: proceedings of SOHOMA 2016. Borangiu T, Trentesaux D, Thomas A, Leitão P, Barata Oliveira JA, éditeurs. Cham: Springer; 2017. 438 p. (Studies in computational intelligence).
131. Marcon E, Chaabane S, Sallez Y, Bonte T. Caregivers Routing Problem in Home Health Care: Literature Review. In: Borangiu T, Trentesaux D, Thomas A, Leitão P, Oliveira JB, éditeurs. *Service Orientation in*

- Holonic and Multi-Agent Manufacturing [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2017 [cité 14 déc 2018]. p. 319-26. Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-51100-9_28
132. Strömsöe A, Svensson L, Axelsson ÅB, Claesson A, Göransson KE, Nordberg P, et al. Improved outcome in Sweden after out-of-hospital cardiac arrest and possible association with improvements in every link in the chain of survival. *Eur Heart J*. 7 avr 2015;36(14):863-71.
 133. Eisenberg MS. Cardiac resuscitation in the community. Importance of rapid provision and implications for program planning. *JAMA J Am Med Assoc*. 4 mai 1979;241(18):1905-7.
 134. EMS Response Time Standards [Internet]. EMSWorld. 2004. Disponible sur: <https://www.emsworld.com/article/10324786/ems-response-time-standards>
 135. New ambulance service standards announced [Internet]. NHS England. 2017. Disponible sur: <https://www.england.nhs.uk/2017/07/new-ambulance-service-standards-announced/>
 136. Ministère des solidarités et de la santé. Engagement 4 : assurer l'accès aux soins urgents en moins de 30 minutes [Internet]. 2017. Disponible sur: <https://solidarités-sante.gouv.fr/archives/pts/les-10-engagements-du-pacte-territoire-sante/article/engagement4-assurer-l-acces-aux-soins-urgents-en-moins-de-30-minutes>
 137. Carter GM, Chaiken JM, Ignall E. Response Areas for Two Emergency Units. *Oper Res*. juin 1972;20(3):571-94.
 138. Jagtenberg CJ, Bhulai S, van der Mei RD. Dynamic ambulance dispatching: is the closest-idle policy always optimal? *Health Care Manag Sci*. déc 2017;20(4):517-31.
 139. Li W, Cassandras CG. A Cooperative Receding Horizon Controller for Multivehicle Uncertain Environments. *IEEE Trans Autom Control*. févr 2006;51(2):242-57.
 140. Cassandras CG, Paschalidis IC. Optimizing the transportation system's response capabilities. In 2011.
 141. CHINI G. Control strategies for the vehicle routing problem applied to medical emergencies. 2014;
 142. Pietrabissa A, Di Giorgio A, Oddi G, Chini G, Chiang M-L, Poli C. Cooperative receding horizon strategies for the multivehicle routing problem. *Optim Control Appl Methods*. janv 2018;39(1):248-62.
 143. Schmid V. Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming. *Eur J Oper Res*. juin 2012;219(3):611-21.
 144. Naoum-Sawaya J, Elhedhli S. A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment. *Comput Oper Res*. août 2013;40(8):1972-8.
 145. Gendreau M, Laporte G, Semet F. A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Comput*. nov 2001;27(12):1641-53.
 146. Sasaki S, Comber AJ, Suzuki H, Brunson C. Using genetic algorithms to optimise current and future health planning - the example of ambulance locations. *Int J Health Geogr*. 2010;9(1):4.
 147. Schmid V, Doerner KF. Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times. *Eur J Oper Res*. déc 2010;207(3):1293-303.
 148. Hajjam A, Creput J-C, Koukam A. Approach for optimized and dynamic medical emergency management. In: *Service Systems and Service Management, 2008 International Conference on*. IEEE; 2008. p. 1-6.
 149. Tlili T, Abidi S, Krichen S. A mathematical model for efficient emergency transportation in a disaster situation. *Am J Emerg Med*. sept 2018;36(9):1585-90.
 150. Golden BL, Kovacs AA, Wasil EA. Chapter 14: Vehicle Routing Applications in Disaster Relief. In: Toth P, Vigo D, éditeurs. *Vehicle Routing* [Internet]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2014 [cité 6 déc 2018]. p. 409-36. Disponible sur: <http://epubs.siam.org/doi/10.1137/1.9781611973594.ch14>
 151. Yi J. Vehicle routing with time windows and time-dependent rewards: A problem from the American Red Cross. *Manuf Serv Oper Manag*. 2003;5(1):74-7.
 152. Chang M-S, Tseng Y-L, Chen J-W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transp Res Part E Logist Transp Rev*. 2007;43(6):737-54.
 153. Perez N, Holguín-Veras J, Mitchell JE, Sharkey TC. Integrated vehicle routing problem with explicit consideration of social costs in humanitarian logistics. *Recuperado Em*. 2010;14.
 154. Shen Z, Dessouky M, Ordóñez F. Stochastic vehicle routing problem for large-scale emergencies. *ISE Work Pap*. 2005;
 155. Benzarti E, Sahin E, Dallery Y. Operations management applied to home care services: analysis of the districting problem. *Decis Support Syst*. mai 2013;55(2):587-98.
 156. Nickel S, Schröder M, Steeg J. Mid-term and short-term planning support for home health care services. *Eur J Oper Res*. juin 2012;219(3):574-87.
 157. Bennett AR, Erera AL. Dynamic periodic fixed appointment scheduling for home health. *IIE Trans Healthc Syst Eng*. 16 mars 2011;1(1):6-19.
 158. Milburn AB, Spicer J. Multi-objective home health nurse routing with remote monitoring devices. *Int J Plan Sched*. 2013;1(4):242.
 159. Cappanera P, Scutellà MG. Joint Assignment, Scheduling, and Routing Models to Home Care Optimization: A Pattern-Based Approach. *Transp Sci*. nov 2015;49(4):830-52.
 160. Cappanera P, Scutellà MG. Home Care optimization: impact of pattern generation policies on scheduling and routing decisions. *Electron Notes Discrete Math*. juin 2013;41:53-60.
 161. Maya Duque PA, Castro M, Sörensen K, Goos P. Home care service planning. The case of Landelijke Thuiszorg. *Eur J Oper Res*. mai 2015;243(1):292-301.

162. Bachouch RB, Guinet A, Hajri-Gabouj S. A Decision-Making Tool for Home Health Care Nurses' Planning. *Supply Chain Forum Int J.* janv 2011;12(1):14-20.
163. Wurnitzer J, Heckmann I, Meyer A, Nickel S. Patient-based nurse rostering in home care. *Oper Res Health Care.* mars 2016;8:91-102.
164. Dohn A, Kolind E, Clausen J. The manpower allocation problem with time windows and job-teaming constraints: A branch-and-price approach. *Comput Oper Res.* avr 2009;36(4):1145-57.
165. Rasmussen MS, Justesen T, Dohn A, Larsen J. The Home Care Crew Scheduling Problem: Preference-based visit clustering and temporal dependencies. *Eur J Oper Res.* juin 2012;219(3):598-610.
166. Rodriguez C, Garaix T, Xie X, Augusto V. Staff dimensioning in homecare services with uncertain demands. *Int J Prod Res.* 17 déc 2015;53(24):7396-410.
167. Zidel T. A lean guide to transforming healthcare: how to implement lean principles in hospitals, medical offices, clinics, and other healthcare organizations. Milwaukee, Wis: ASQ Quality Press; 2006. 169 p.
168. Viana J, Ziener VM, Holhjem MS, Ponton IG, Th LJ, Simonsen TB. Optimizing home hospital health service delivery in norway using a combined geographical information system, agent based, discrete event simulation model. In: *Simulation Conference (WSC), 2017 Winter.* IEEE; 2017. p. 1658-69.
169. Fikar C, Hirsch P. Home health care routing and scheduling: A review. *Comput Oper Res.* janv 2017;77:86-95.
170. Bulling N, EUMAS, éditeurs. Multi-agent systems: 12th European conference, EUMAS 2014, Prague, Czech Republic, December 18-19, 2014 ; revised selected papers. Cham: Springer; 2015. 426 p. (Lecture notes in computer science Lecture notes in artificial intelligence).
171. Haj-Rachid M, Ramdane-Cherif W, Bloch C. Classification de tournées de véhicules. In: *Modélisation, optimisation et simulation des systèmes : communication, coopération et coordination* [Internet]. Paris; 2008. p. 10. Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Christelle_Bloch/publication/232250910_Classification_de_problemes_de_tournees_de_vehicules/links/02e7e515e9f0064f3b000000.pdf
172. Haj-Rachid M, Bloch C, Ramdane-Cherif W, Chatonnay P. Différents opérateurs évolutionnaires de permutation: sélections, croisements et mutations [Internet]. Laboratoire d'informatique de l'université de Franche-Comté (LIFC); 2010 juill p. 60. Report No.: RR 2010-07. Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Mais_Rachid/publication/274718261_Differentes_operateurs_evolutionnaires_de_permutation_selections_croisements_et_mutations/links/5527e8150cf2e089a3a213ee/Differentes-operateurs-evolutionnaires-de-permutation-selections-croisements-et-mutations.pdf
173. Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes (CIM-10). Table Analytique. [Internet]. [cité 4 avr 2016]. Disponible sur: http://www.atih.sante.fr/sites/default/files/public/content/2855/cim-10_fr_2016.pdf
174. World Health Organization. International classification of diseases, 11th revision (ICD-11) [Internet]. Disponible sur: www.who.int/classifications/icd/revision/en/
175. World Organization of National Colleges, Academies, and Academic Associations of General Practitioners/Family Physicians, éditeur. ICPC-2-R: international classification of primary care. Rev. 2nd ed. Oxford ; New York: Oxford University Press; 2005. 193 p. (Oxford medical publications).
176. World Health Organization. International Classification of Primary Care, Second edition (ICPC-2) [Internet]. 2003. Disponible sur: <http://www.who.int/classifications/icd/adaptations/icpc2/en/>
177. Agence régionale de santé. La médecine d'urgence [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://www.ars.sante.fr/la-medecine-durgence-0>
178. Ketikidis P, Dimitrovski T, Lazuras L, Bath PA. Acceptance of health information technology in health professionals: an application of the revised technology acceptance model. *Health Informatics J.* juin 2012;18(2):124-34.
179. Manfredini R, La Cecilia O, Boari B, Steliu J, Michelinidagger V, Carlidagger P, et al. Circadian pattern of emergency calls: implications for ED organization. *Am J Emerg Med.* juill 2002;20(4):282-6.
180. Møller TP, Ersbøll AK, Tolstrup JS, Østergaard D, Viereck S, Overton J, et al. Why and when citizens call for emergency help: an observational study of 211,193 medical emergency calls. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med* [Internet]. déc 2015 [cité 19 oct 2017];23(1). Disponible sur: <http://www.sjtem.com/content/23/1/88>
181. Huijbers LA, Moth G, Bondevik GT, Kersnik J, Huber CA, Christensen MB, et al. Diagnostic scope in out-of-hours primary care services in eight European countries: an observational study. *BMC Fam Pract.* déc 2011;12(1).
182. Nehme Z, Andrew E, Smith K. Factors Influencing the Timeliness of Emergency Medical Service Response to Time Critical Emergencies. *Prehospital Emerg Care Off J Natl Assoc EMS Physicians Natl Assoc State EMS Dir.* déc 2016;20(6):783-91.
183. Derkx HP, Rethans J-JE, Maiburg BH, Winkens RA, Muijtjens AM, van Rooij HG, et al. Quality of communication during telephone triage at Dutch out-of-hours centres. *Patient Educ Couns.* févr 2009;74(2):174-8.
184. Ong RS, Post J, van Rooij H, de Haan J. Call-duration and triage decisions in out of hours cooperatives with and without the use of an expert system. *BMC Fam Pract.* déc 2008;9(1).
185. Mohammed MA, Clements G, Edwards E, Lester H. Factors which influence the length of an out-of-hours telephone consultation in primary care: a retrospective database study. *BMC Health Serv Res.* déc 2012;12(1).

186. Derkx H, Rethans J-J, Muijtjens A, Maiburg B, Winkens R, van Rooij H, et al. « Quod scripsi, scripsi. » The quality of the report of telephone consultations at Dutch out-of-hours centres. *BMJ Qual Saf.* 1 déc 2010;19(6):e1-e1.
187. Derkx HP, Rethans J-JE, Muijtjens AM, Maiburg BH, Winkens R, Van Rooij HG, et al. Quality of clinical aspects of call handling at Dutch out of hours centres: cross sectional national study. *Bmj.* 2008;337:a1264.
188. Reuter P-G, Orsini C, Grave M, Linval F, Akodad H, Goix L, et al. Impact of a general practitioners' strike and of terrorist attacks on a call centre: *Eur J Emerg Med.* juin 2018;25(3):199-203.
189. Penverne Y, Leclere B, Labady J, Berthier F, Jenvrin J, Javaudin F, et al. Key performance indicators' assessment to develop best practices in an Emergency Medical Communication Centre: *Eur J Emerg Med.* oct 2018;25(5):335-40.
190. Huibers L, Giesen P, Wensing M, Grol R. Out-of-hours care in western countries: assessment of different organizational models. *BMC Health Serv Res.* déc 2009;9:105
191. Campbell JL, Fletcher E, Britten N, Green C, Holt TA, Lattimer V, et al. Telephone triage for management of same-day consultation requests in general practice (the ESTEEM trial): a cluster-randomised controlled trial and cost-consequence analysis. *The Lancet.* nov 2014;384(9957):1859-68.
192. Jiwa M, Mathers N, Campbell M. The effect of GP telephone triage on numbers seeking same-day appointments. *Br J Gen Pract J R Coll Gen Pract.* mai 2002;52(478):390-1.
193. Wheeler SQ, Greenberg ME, Mahlmeister L, Wolfe N. Safety of Clinical and Non-Clinical Decision Makers in Telephone Triage: A Narrative Review. *J Telemed Telecare.* sept 2015;21(6):305-22.
194. van Uden CJT, Giesen PHJ, Metsemakers JFM, Grol RPTM. Development of out-of-hours primary care by general practitioners (GPs) in The Netherlands: from small-call rotations to large-scale GP cooperatives. *Fam Med.* sept 2006;38(8):565-9.
195. Murdoch J, Barnes R, Pooler J, Lattimer V, Fletcher E, Campbell JL. Question design in nurse-led and GP-led telephone triage for same-day appointment requests: a comparative investigation. *BMJ Open.* mars 2014;4(3):e004515.
196. Biezen M van der, Wensing M, Burgt R van der, Laurant M. Towards an optimal composition of general practitioners and nurse practitioners in out-of-hours primary care teams: a quasi-experimental study. *BMJ Open.* mai 2017;7(5):e015509.
197. Huibers L, Smits M, Renaud V, Giesen P, Wensing M. Safety of telephone triage in out-of-hours care: A systematic review. *Scand J Prim Health Care.* déc 2011;29(4):198-209.
198. Reuter P-G, Marx J-S, Linval F, Vivien B, Akodad H, Guinemer S, et al. Impact of the January 11 National March on the calls received at the emergency medical services centers (SAMU) in Seine-Saint-Denis and Paris. *Presse Médicale.* juin 2015;44(6):677-80.
199. van Buuren M, Kommer GJ, van der Mei R, Bhulai S. A simulation model for emergency medical services call centers. In: 2015 Winter Simulation Conference (WSC) [Internet]. Huntington Beach, CA, USA: IEEE; 2015 [cité 27 févr 2019]. p. 844-55. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7408221/>
200. Ibrahim R, Ye H, L'Ecuyer P, Shen H. Modeling and forecasting call center arrivals: A literature survey and a case study. *Int J Forecast.* juill 2016;32(3):865-74.
201. Weibel L, Gabrion I, Aussedat M, Kreutz G. Work-related stress in an emergency medical dispatch center. *Ann Emerg Med.* avr 2003;41(4):500-6.
202. Mellouk A, Hoceini S, Zeadally S. A state-dependent time evolving multi-constraint routing algorithm. *ACM Trans Auton Adapt Syst.* 1 avr 2013;8(1):1-21.
203. Bitam S, Mellouk A, Fowler S. MQBV: multicast quality of service swarm bee routing for vehicular ad hoc networks: Wireless MQBV for VANET. *Wirel Commun Mob Comput.* 25 juin 2015;15(9):1391-404.
204. Dab B, Fajjari I, Aitsaadi N. Online-Batch Joint Routing and Channel Allocation for Hybrid Data Center Networks. *IEEE Trans Netw Serv Manag.* déc 2017;14(4):831-46.