



Application de la télémédecine en ophtalmologie dans le diagnostic et le suivi de la rétinopathie diabétique

Benoît Gandon

► To cite this version:

Benoît Gandon. Application de la télémédecine en ophtalmologie dans le diagnostic et le suivi de la rétinopathie diabétique. Médecine humaine et pathologie. 2021. dumas-03556745

HAL Id: dumas-03556745

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03556745>

Submitted on 4 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ de CAEN NORMANDIE

UFR SANTÉ

FACULTÉ de MÉDECINE

Année 2020/2021

THÈSE POUR L'OBTENTION
DU GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement le 1^{er} Octobre 2021

Par

Mr GANDON Benoît

Né (e) le 21 Avril 1993 à Aurillac (*Cantal*)

APPLICATION DE LA TELEMEDECINE EN OPHTALMOLOGIE
DANS LE DIAGNOSTIC ET LE SUIVI DE LA RETINOPATHIE
DIABÉTIQUE

Président : Monsieur le Professeur QUINTYN Jean-Claude

Membres : Monsieur le Professeur JOUBERT Michael

Monsieur le Docteur LEGRIS Antoine

Directeur de thèse : Pr QUINTYN Jean Claude

Année Universitaire 2020/2021**Doyen**

Professeur Emmanuel TOUZÉ

Assesseurs

Professeur Paul MILLIEZ (pédagogie)

Professeur Guy LAUNOY (recherche)

Professeur Sonia DOLLFUS & Professeur Evelyne EMERY (3^{ème} cycle)**Directrice administrative**

Madame Sarah CHEMTOB

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

M.	AGOSTINI Denis	Biophysique et médecine nucléaire
M.	AIDE Nicolas	Biophysique et médecine nucléaire
M.	ALEXANDRE Joachim	Pharmacologie clinique
M.	ALLOUCHE Stéphane	Biochimie et biologie moléculaire
M.	ALVES Arnaud	Chirurgie digestive
M.	AOUBA Achille	Médecine interne
M.	BABIN Emmanuel	Oto-Rhino-Laryngologie
M.	BÉNATEAU Hervé	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
M.	BENOIST Guillaume	Gynécologie - Obstétrique
M.	BERGER Ludovic	Chirurgie vasculaire
M.	BERGOT Emmanuel	Pneumologie
M.	BIBEAU Frédéric	Anatomie et cytologie pathologique
Mme	BRAZO Perrine	Psychiatrie d'adultes
M.	BROUARD Jacques	Pédiatrie
M.	BUI Thanh-huy Eric	Psychiatrie d'adultes
M.	BUSTANY Pierre	Pharmacologie
Mme	CHAPON Françoise	Histologie, Embryologie
Mme	CLIN-GODARD Bénédicte	Médecine et santé au travail
M.	DAMAJ Ghandi Laurent	Hématologie
M.	DAO Manh Thông	Hépatologie-Gastro-Entérologie
M.	DEFER Gilles	Neurologie
M.	DELAMILLIEURE Pascal	Psychiatrie d'adultes
M.	DENISE Pierre	Physiologie
Mme	DOLLFUS Sonia	Psychiatrie d'adultes
Mme	DOMPMARTIN-BLANCHÈRE Anne	Dermatologie

M. DREYFUS Michel	Gynécologie - Obstétrique
M. DU CHEYRON Damien	Réanimation médicale
Mme ÉMERY Evelyne	Neurochirurgie
M. ESMAIL-BEYGUI Farzin	Cardiologie
Mme FAUVET Raffaèle	Gynécologie – Obstétrique
M. FISCHER Marc-Olivier	Anesthésiologie et réanimation
M. GÉRARD Jean-Louis	Anesthésiologie et réanimation
M. GUÉNOLÉ Fabian	Pédopsychiatrie
Mme GUITTET-BAUD Lydia	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
M. HAMON Martial	Cardiologie
Mme HAMON Michèle	Radiologie et imagerie médicale
M. HANOUIZ Jean-Luc	Anesthésie et réa. médecine péri-opératoire
M. HITIER Martin	Anatomie –ORL Chirurgie Cervico-faciale
M. HULET Christophe	Chirurgie orthopédique et traumatologique
M. ICARD Philippe	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
M. JOIN-LAMBERT Olivier	Bactériologie - Virologie
Mme JOLY-LOBBEDEZ Florence	Cancérologie
M. JOUBERT Michael	Endocrinologie
M. LAUNOY Guy	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
M. LE HELLO Simon	Bactériologie-Virologie
Mme LE MAUFF Brigitte	Immunologie
M. LOBBEDEZ Thierry	Néphrologie
M. LUBRANO Jean	Chirurgie viscérale et digestive
M. MAHE Marc-André	Cancérologie
M. MANRIQUE Alain	Biophysique et médecine nucléaire
M. MARCÉLLI Christian	Rhumatologie
M. MARTINAUD Olivier	Neurologie
M. MAUREL Jean	Chirurgie générale
M. MILLIEZ Paul	Cardiologie
M. MOREAU Sylvain	Anatomie/Oto-Rhino-Laryngologie
M. MOUTEL Grégoire	Médecine légale et droit de la santé
M. NORMAND Hervé	Physiologie
M. PARIENTI Jean-Jacques	Biostatistiques, info. médicale et tech. de communication
M. PELAGE Jean-Pierre	Radiologie et imagerie médicale

Mme PIQUET Marie-Astrid	Nutrition
M. QUINTYN Jean-Claude	Ophtalmologie
Mme RAT Anne-Christine	Rhumatologie
M. REPESSE Yohann	Hématologie
M. REZNIK Yves	Endocrinologie
M. ROD Julien	Chirurgie infantile
M. ROUPIE Eric	Médecine d'urgence
Mme THARIAT Juliette	Radiothérapie
M. TILLOU Xavier	Urologie
M. TOUZÉ Emmanuel	Neurologie
Mme VABRET Astrid	Bactériologie - Virologie
M. VERDON Renaud	Maladies infectieuses
Mme VERNEUIL Laurence	Dermatologie
M. VIVIEN Denis	Biologie cellulaire

PROFESSEURS ASSOCIÉS DES UNIVERSITÉS A MI-TEMPS

Mme BELLOT Anne	Pédiatrie
M. DE LA SAYETTE Vincent	Neurologie
M. GUILLAUME Cyril	Médecine palliative
M. LE BAS François	Médecine Générale
M. SABATIER Rémi	Cardiologie

PRCE

Mme LELEU Solveig	Anglais
-------------------	---------

PROFESSEURS ÉMÉRITES

M. DERLON Jean-Michel	Neurochirurgie
M. GUILLOIS Bernard	Pédiatrie
M. HABRAND Jean-Louis	Cancérologie option Radiothérapie
M. HURAUULT de LIGNY Bruno	Néphrologie
Mme KOTTLER Marie-Laure	Biochimie et biologie moléculaire
M. LE COUTOUR Xavier	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
M. LEPORRIER Michel	Hématologie
M. RAVASSE Philippe	Chirurgie infantile
M. TROUSSARD Xavier	Hématologie

Année Universitaire 2020/2021**Doyen**

Professeur Emmanuel TOUZÉ

Assesseurs

Professeur Paul MILLIEZ (pédagogie)

Professeur Guy LAUNOY (recherche)

Professeur Sonia DOLLFUS & Professeur Evelyne EMERY (3^{ème} cycle)**Directrice administrative**

Madame Sarah CHEMTOB

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme BENHAÏM Annie	Biologie cellulaire
M. BESNARD Stéphane	Physiologie
Mme BONHOMME Julie	Parasitologie et mycologie
M. BOUVIER Nicolas	Néphrologie
M. BROSSIER David	Pédiatrie
M. COULBAULT Laurent	Biochimie et Biologie moléculaire
M. CREVEUIL Christian	Biostatistiques, info. médicale et tech. de communication
M. DE BOYSSON Hubert	Médecine interne
Mme DINA Julia	Bactériologie - Virologie
Mme DUPONT Claire	Pédiatrie
M. ÉTARD Olivier	Physiologie
M. GABEREL Thomas	Neurochirurgie
M. GRUCHY Nicolas	Génétique
M. ISNARD Christophe	Bactériologie Virologie
M. JUSTET Aurélien	Pneumologie
Mme KRIEGER Sophie	Pharmacie
M. LEGALLOIS Damien	Cardiologie
Mme LELONG-BOULOUARD Véronique	Pharmacologie fondamentale
Mme LEVALLET Guénaëlle	Cytologie et Histologie
M. MACREZ Richard	Médecine d'urgence
M. MITTRE Hervé	Biologie cellulaire
M. MOLIN Arnaud	Génétique
M. SAINT-LORANT Guillaume	Pharmacie

M.	SESBOÜÉ Bruno	Physiologie
M.	TOUTIRAIS Olivier	Immunologie
M.	VEYSSIERE Alexis	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie

MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE

M. HUMBERT Xavier

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIÉS DES UNIVERSITÉS A MI-TEMPS

Mme	ABBATE-LERAY Pascale	Médecine générale
M.	BANSARD Mathieu	Médecine générale
M.	COUETTE Pierre-André	Médecine générale
Mme	NOEL DE JAEGHER Sophie	Médecine générale
M.	PITHON Anni	Médecine générale
M.	SAINMONT Nicolas	Médecine générale
Mme	SCHONBRODT Laure	Médecine générale

MAITRES DE CONFERENCES ÉMÉRITES

Mme	DEBRUYNE Danièle	Pharmacologie fondamentale
Mme	DERLON-BOREL Annie	Hématologie
Mme	LEPORRIER Nathalie	Génétique

Remerciements

A Mr le Professeur Jean Claude QUINTYN, président et membre du jury,

Je vous remercie pour avoir dirigé cette thèse. Je vous suis sincèrement reconnaissant pour votre investissement et votre disponibilité dans notre formation. Votre dévouement pour notre belle spécialité est un exemple pour moi.

A Mr le Professeur Michael JOUBERT, membre du jury

Merci d'avoir accepté de juger ce travail au carrefour de nos disciplines. Je souhaite vous exprimer ma reconnaissance pour m'avoir initié à la démarche de la recherche clinique dans notre projet parallèle. Votre rigueur scientifique est un exemple pour moi.

A Mr le Docteur Antoine LEGRIS, membre du jury,

Un grand merci pour votre présence aujourd'hui au moment d'évaluer ce travail. J'aimerais vous exprimer ma profonde gratitude pour votre confiance couplée à votre enseignement chirurgical qui furent très appréciés. Votre sens de la relation patient est un exemple pour moi.

A l'équipe d'Argentan, merci de m'avoir accompagné dans la découverte de l'ophtalmologie. Cette année partagée fut riche en rencontres et fut une entrée idéale dans ce monde.

A l'équipe du CHU de Caen, merci de m'avoir transmis votre rigueur dans l'approche du patient, rigueur nécessaire devant la complexité des cas que nous rencontrons dans le service.

Aux équipes des cliniques d'ophtalmologie caennaises, merci notamment pour la qualité de la formation reçue en rétine médicale. Ce bagage m'accompagnera longtemps.

A l'équipe d'Avranches, ce semestre passé dans la baie du Mont St Michel restera à part, tant votre enseignement chirurgical fut remarquable. Merci à tous les praticiens du centre.

A l'équipe de la Fondation, merci pour l'intégration dans votre équipe parisienne au cours de ce semestre qui fut très enrichissant.

A ma famille, mes parents, ma sœur et mon beau-frère, un grand merci pour votre soutien indéfectible au fil de ces nombreuses années d'études. Je retiens tout particulièrement toute l'aide que j'ai reçue. Merci Papa et Maman pour tous ces déménagements, tous ces travaux à l'appartement, et en général tout le soutien logistique qui m'a permis de me concentrer sur mes études, et tout simplement merci pour votre présence réconfortante et votre amour. Merci Emilie, je retiens tout particulièrement l'appui que tu m'as apporté durant la première année, le résultat aurait été bien différent sans toi.

A toutes les amitiés faites et défaites au cours des années, nous avons passés de nombreux moments de complicité. J'espère que le futur sera fait dans la même veine entre descentes à ski, soirées festives et éclats de rire.

A Marion, la femme que j'aime, nous formons une équipe soudée, parée pour affronter toutes les tempêtes de la vie. Merci d'être là, à tout moment, l'avenir s'annonce radieux !

Abréviations

ADN : Acide DésoxyriboNucléique

AGE : Produits Avancés de la Glycation

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

AMIR : Anomalie Microvasculaire Intra Rétinienne

AP-HP : Assistance Publique des Hôpitaux de Paris

ARS : Agence Régionale de Santé

CNAM : Caisse Nationale d'Assurance Maladie

CNOM : Conseil National de l'Ordre des Médecins

CPAM : Caisse Primaire d'Assurance Maladie

DGCCRF : Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes

DMLA : Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age

FDA : Food Drug Administration

HAS : Haute Autorité de Santé

HIV : Hémorragie Intra Vitréenne

IA : Intelligence Artificielle

NADPH : Nicotinamide Adénine Dinucléotide PHosphate

NGAP : Nomenclature Générale des Actes Professionnels

OCT : Tomographie par Cohérence Optique

OMD : Œdème Maculaire Diabétique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

RD : Rétinopathie Diabétique

PKC : Protéine Kinase C

PPR : Pan-Photocoagulation Rétinienne

RDP : Rétinopathie Diabétique Proliférante

SNOF : Syndicat National des Ophtalmologues Français

VEGF : Vascular Endothelial Growth Factor

Liste des illustrations

FIGURE 1 CASCADE DE REACTION DE LA VOIE DES POLYOLS D'APRES BROWNLEE (11).....	8
FIGURE 2 MICROANEVRYSMES TEMPORO-MACULAIRES (ASSOCIES A QUELQUES EXSUDATS)	12
FIGURE 3 UN MICROANEVRYSME VISIBLE EN COUPE OCT AVEC QUELQUES LOGETTES ET EXSUDATS ISSUS DE CELUI-CI. ON LE RECONNAIT NOTAMMENT PAR SA PAROI, QUI EST HYPER-REFLECTIVE.	12
FIGURE 4 DILATATION VEINEUSE, EN CHAPELET, BIEN VISIBLE DANS LE QUADRANT SUPERO-NASAL	13
FIGURE 5 - 1 HEMORRAGIE EN TACHE EN SUPERIEUR ASSOCIEE A DE NOMBREUSES HEMORRAGIES PUNCTIFORMES ET ANEURISMES	13
FIGURE 6 AMIR VISIBLE AU CENTRE DE L'IMAGE	14
FIGURE 7 COUPE OCT D'UN OMD CYSTOÏDE	14
FIGURE 8 RETINOPHOTGRAPHIE MONTRANT DE NOMBREUX EXSUDATS CIRCINES MACULAIRES	15
FIGURE 9 NODULES COTONNEUX AU NIVEAU DE L'ARCADE VASCULAIRE SUPERIEURE ET INFERIEURE. LA SURVENUE DES NODULES COTONNEUX EST EGALEMENT LIEE A UNE PART DE RETINOPATHIE HYPERTENSIVE EN CAS D'HYPERTENSION ARTERIELLE SURAJOUTEE NON CONTROLEE.	15
FIGURE 10 DEVELOPPEMENT D'UN NEOVAISSEAU PRE-RETINIEN DEBUTANT MALGRE LA PRESENCE D'UNE PPR, EN TEMPORAL INFERIEUR DE LA MACULA. L'ANGIOGRAPHIE PERMET DE FAIRE LA PART DES CHOSES AVEC LES AMIR ,ET D'IDENTIFIER FACILEMENT LE NEOVAISSEAU GRACE A SON HYPERFLUORESCENCE ET A SA DIFFUSION. ON REMARQUE DES TERRITOIRES NON PERFUSES SANS PPR CONTRIBUANT A CETTE PROLIFERATION.	16
FIGURE 11 VOILE NEO-VASCULAIRE PRE-RETINIEN SUPERO-PAPILLAIRE, A UN STADE PLUS TARDIF.	16
FIGURE 12 HEMORRAGIE INTRA VITREENNE, PARTANT DU NEOVAISSEAU SUPERO-PAPILLAIRE DE L'IMAGE PRECEDENTE.	17
FIGURE 13 HEMORRAGIE EN NAPPE RETRO HYALOÏDIENNE PARTANT D'UN NEOVAISSEAU PRE-RETINIEN SITUE SUR L'ARCADE VASCULAIRE TEMPORALE INFERIEURE	17
FIGURE 14 SCORE DE SEVERITE DE LA RD STANDARDISE (16)	19
FIGURE 15 ILLUSTRATION DES TELEGRAPHES OPTIQUES DE CHAPPE ET SON CODE DE DECHIFFRAGE.....	22
FIGURE 16 DENSITE DES OPHTALMOLOGUES EN FRANCE SELON DONNEES RPPS 2017 (21)	24
FIGURE 17 CARTE ISSUE D'UNE ENQUETE « PATIENT MYSTERE » A ETE MENEES A L'ECHELLE NATIONALE AUPRES DE L'ENSEMBLE DES 4721 OPHTALMOLOGUES CONVENTIONNES EN EXERCICE AU SEIN DE 6045 CABINETS D'OPHTALMOLOGIE CONVENTIONNES ET CENTRES DE CONSULTATIONS PRIVEES HOSPITALIERS EN 2020 (24)	25
FIGURE 18 REFERENTIEL FONCTIONNEL SOCLE POUR LES LOGICIELS DE TELEMEDECINE, CI-SIS (26)	26
FIGURE 19 GUIDE DE LA CNIL SUR LA SECURITE DES DONNEES PERSONNELLES. (29)	27
FIGURE 20 COTATION DE L'ACTE TC POUR UN MEDECIN SPECIALISTE (35)	30
FIGURE 21 REMARQUES CONCERNANT L'EXERCICE D'UNE TELECONSULTATION, FORMULEES PAR L'ASSURANCE MALADIE (35)	31
FIGURE 22 RAPPEL DES CONDITIONS D'EXECUTION ET EXIGENCES DE QUALITE ET DE SECURITE DEFINIES EN CAS DE LECTURE DIFFEREE DE PHOTOGRAPHIES DU FOND D'OEIL D'APRES L'HAS	33
FIGURE 23 TARIF APPLICABLE AUX INFIRMIERS LIBERAUX EN TELEMEDECINE (39)	34
FIGURE 24 FORFAIT STRUCTURE CNAM 2020 VOLET 1	36
FIGURE 25 FORFAIT STRUCTURE CNAM 2020 VOLET 2	37
FIGURE 26 EVOLUTION DE LA CONSOMMATION DE TRANSPORTS SANITAIRES EN FRANCE.....	40
FIGURE 27 PLATEFORME QARE : UN OPHTALMOLOGUE POSSEDE DES CRENEAUX DISPONIBLES, SUR LES 52 RECENSES SUR LA PLATEFORME PROPOSANT UNE TELECONSULTATION.....	45

FIGURE 28 DOCTOLIB : PROPOSITION D'UNE CONSULTATION AVEC USAGE SEULE DE LA VIDEO, LIMITANT L'EXERCICE MEDICAL MAIS PERMETTANT UN TRI DANS LE SEUIL D'URGENCE A REALISER UNE CONSULTATION PHYSIQUE.....	45
FIGURE 29 ACTES DEROGATOIRE LORS DE L'UTILISATION DU PROTOCOLE ORGANISATIONNEL DU DEPISTAGE DE LA RD (60)	47
FIGURE 30 CARTE REPRESENTANT LES SITES DE DEPISTAGE DU RESEAU OPHDIAT EN ILE DE FRANCE, ISSUE DE LEUR SITE INTERNET (61)	48
FIGURE 31 REPRODUCTION DU SCHEMA D'ORGANISATION DU RESEAU OPHDIAT 1/2.....	49
FIGURE 32 REPRODUCTION DU SCHEMA D'ORGANISATION DU RESEAU OPHDIAT 2/2 ON NOTE LA DIVERSITE DES SITES (PRISON, CENTRE DE SANTE...).....	50
FIGURE 33 PHOTOGRAPHIE DU VEHICULE REALISANT LE DEPISTAGE DE LA RD EN BOURGOGNE-FRANCHE COMTE (63).	51
FIGURE 34 REPRODUCTION DU RESEAU DE DEPISTAGE COORDONNEE DEVELOPPE EN DORDOGNE.....	52
FIGURE 35 RANSOMWARE RYUK : MESSAGE ET DEMANDE DE RANÇON POUR DEBLOQUE A L'ACCES A DES DOSSIERS PATIENTS.....	57
FIGURE 36 MODELE HIERARCHIQUE MODELISANT L'INTELLIGENCE SELON LA THEORIE CHC (95).....	63
FIGURE 37 - 8 FORMES D'INTELLIGENCE SELON GARDNER.....	64
FIGURE 38 1ERE ECHELLE METRIQUE DE L'INTELLIGENCE, TEST DE SIMON BINET 1906 (98).....	65
FIGURE 39 DEDUCTION CONTRE INDUCTION. LA MACHINE 1 APPLIQUE UN PROGRAMME SUR DES ENTREES AFIN D'EN DEDUIRE LES SORTIES : IA EXPLICITE. LA MACHINE 2 COMPILE LES ENTREES ET LES SORTIES POUR EN INDUIRE UN PROGRAMME POUVANT LES METTRE EN RELATION : IA IMPLICITE.(100).....	68
FIGURE 40 SCHEMA PRESENTANT LES DIFFERENTS ALGORITHMES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (101) LES – REPRESENTENT DES SITUATIONS, LES * REPRESENTENT DES ALGORITHMES CORRESPONDANT POUVANT ETRE UTILISES.	69
FIGURE 41 PAR LA METHODE DES K-MEANS, L'IA VA CREER DE NOVO 3 SOUS-GROUPES BLEU/VERT/ROUGE EN SE BASANT SUR LEUR REPARTITION DANS L'ESPACE ET EN CALCULANT LEUR DISTANCE AU CENTRE DE 'GRAVITE'. LE CENTRE EST MOBILE SI DE NOUVEAUX POINTS APPARAISSENT(102).	70
FIGURE 42 PROPOSITION D'UN SCHEMA TRES SIMPLIFIE ILLUSTRANT LA FACTORISATION MATRICIELLE ET LA CARACTERISATION EFFECTUEES PAR UNE IA DE RECOMMANDATIONS COMME CELLE DE NETFLIX AFIN DE DIMINUER LE STOCKAGE EN DONNEES ET AMELIORER SA PERTINENCE. SOIT LA MATRICE LE TABLEAU A DEUX ENTREES COMPORTANT POUR CHAQUE UTILISATEUR, ET POUR CHAQUE PROGRAMME, LA PROBABILITE D'ETRE INTERESSEE. ALORS, PLUTOT QUE DE CONSIDERER CHAQUE MATRICE DANS SON ENSEMBLE POUR CHAQUE CLIENT, L'IA NE RETIENT QUE LES FACTEURS EXPLICATIFS DE CETTE MATRICE (INTERACTION PASSEE AVEC LE SERVICE, HISTORIQUE DE VISIONNAGE, EVALUATION D'AUTRES TITRES, CHOIX DES UTILISATEURS SIMILAIRES, INFORMATIONS LIES A CHAQUE TITRE(CATEGORIE, ACTEUR)). DE PLUS ON NOTERA L'UTILISATION DE LA CARACTERISATION EN FAISANT APPARTENIR UN INDIVIDU A UN GROUPE LUI RESSEMBLANT STATISTIQUEMENT SUR SES PREFERENCES.....	71
FIGURE 43 SCHEMAS COMPARANT LA STRUCTURE D'UN NEURONE BIOLOGIQUE AVEC UN NEURONE ARTIFICIEL. LES ENTREES D'INFORMATIONS DANS LE NEURONE SONT MULTIPLES ET LEURS POIDS PEUVENT ETRE PONDERES (POIDS SYNAPTIQUE), POUR AMPLIFIER OU MINIMISER UN SIGNAL D'ENTREE. LA SORTIE EST UNIQUE, 0 OU 1, EN FONCTION DU SEUIL D'ACTIVATION. (104).....	73
FIGURE 44 EXEMPLE D'UN RESEAU NEURONAL PERMETTANT A L'IA DE DETERMINER SI L'IMAGE PRESENTEE EST UN CHIEN. ON NOTERA LA PROGRESSION PAR COUCHES SUCCESSIVES DE NEURONES POUR DETERMINER ET TRANSMETTRE LES CARACTERISTIQUES DETERMINANTES ET DISCRIMINANTES( OU ), DONT LA COMBINAISON PERMET IN FINE DE TROUVER UNE REPONSE CORRECTE (105). L'HUMAIN N'AURA JAMAIS EU A DECRIRE UN CHIEN A LA MACHINE AU COURS DU PROCESSUS, ELLE AURA ELLE-MEME DETERMINE LE MOYEN DE LE PLUS FIABLE DE LE RECONNAITRE AU FUR ET A MESURE DES EXEMPLES PRESENTES.	74
FIGURE 45 LA FIGURE SUIVANTE SCHEMATISE UN AUTO-ENCODEUR SIMPLE, DONT L'ENCODEUR TRAITE DES IMAGES (INPUTS), AFIN DE LES REPRESENTER COMME DES POINTS DANS UN ESPACE A DEUX DIMENSIONS (ENCODED REPRESENTATION). LE DECODAGE EST ENSUITE POSSIBLE POUR RETROUVER LES DONNEES D'ORIGINE (106).	74

FIGURE 46 SCHEMA D'UNE IA EXPLICITE DANS UN SYSTEME EXPERT. LE LOGICIEL PRODUIT UN RESULTAT GRACE A SON MOTEUR D'INFERENCE PROGRAMME PAR UN HUMAIN. (117)	79
FIGURE 47 TABLEAU REPRESENTANT LES RESULTATS DES 10 PARTICIPANTS A DIAGNOSTIQUER ET TRAITER 10 CAS DE MENINGITES. (116).....	79
COLONNE 1 : 1 POINT PAR DIAGNOSTIC CORRECT ATTRIBUE PAR CHAQUE EXPERT (DONC SUR 80). COLONNE 2 : RESULTAT RAMENE SUR 10 POINTS APRES CONSENSUS DES 8 EXPERTS. COLONNE 3 : NOMBRE DE CAS OU LA THERAPEUTIQUE MISE EN ŒUVRE OUBLIE DE TRAITER UN PATHOGENE.	79
FIGURE 48 SENSIBILITE ET SPECIFICITE AU COURS DES 3 EXERCICES COMPARANT L'IA ET LES 25 DERMATOLOGUES (122)	81
FIGURE 49 PRESENTATION DES PARTENAIRES DU PROJET RETINOPTIC QUI A MENE A LA CONCEPTION DE L'ALGORITHME OPHTAI POUR LE DEPISTAGE AUTOMATISE DE LA RD (132).....	84
FIGURE 50 GRAPHIQUE TIRE DE L'ETUDE DE BROWN MONTRANT LES RESULTATS POUR LE DIAGNOSTIC DU STADE PLUS DE LA ROP ENTRE L'ALGORITHME D'IA ET 8 EXPERTS LORS D'UN TEST SUR 100 IMAGES	84
FIGURE 51 MODULE FUNDUS ON PHONE COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE REMIDIO, PERMETTANT L'UTILISATION D'UN SMARTPHONE COMME CAMERA POUR LA REALISATION D'UNE RETINOPHOTOGRAPHIE. SOURCE ET CREDIT IMAGE : REMIDIO.COM	85
FIGURE 52 VISUALISATION DU RESULTAT DONNE PAR L'ALGORITHME DEEPMIND APRES ANALYSE D'UNE COUPE OCT DANS L'ETUDE.(142)	88
FIGURE 53 EXEMPLE DE SEGMENTATION D'UNE COUPE OCT REALISEE PAR UN ALGORITHME UTILISANT UN RESEAU DE NEURONES COMPARATIVEMENT A UNE SEGMENTATION HUMAINE (142)	89
FIGURE 54 AIRE SOUS LA COURBE DES RESULTATS DE L'ALGORITHME COMPARATIVEMENT AUX HUMAINS DANS LE CLASSEMENT DES OCT NECESSITANT UNE PRISE EN CHARGE URGENTE (PRINCIPALEMENT NEOVAISSEAU CHOROÏDIEN). POUR LES HUMAINS, LES RONDS COLORES PLEINS REPRESENTENT LA DECISION PRISE APRES ANALYSE DE L'OCT SEULEMENT, LES RONDS VIDES APRES LECTURE DU DOSSIER MEDICAL, DU FOND D'ŒIL ET DE L'OCT. ON NOTERA QU'APRES ANALYSE COMPLETE DU CAS, L'HUMAIN SE RAPPROCHE DE L'INTERVALLE DE CONFIANCE DE LA DECISION DE L'IA.	89

Sommaire

INTRODUCTION	1
DIABETE ET OPHTALMOLOGIE	3
EPIDEMIOLOGIE	4
A. <i>Situation mondiale</i>	4
B. <i>Situation française</i>	5
PHYSIOPATHOLOGIE	7
A. <i>Voie des polyols</i>	8
B. <i>Produits avancés de la glycation (AGE)</i>	9
C. <i>Protéine kinase C (PKC)</i>	10
D. <i>Voie de l'hexosamine</i>	10
E. <i>Neurodégénérescence</i>	11
F. <i>Néovascularisation</i>	11
DIAGNOSTIC	12
A. <i>Sémiologie</i>	12
B. <i>Rythme et mode de dépistage</i>	18
THERAPEUTIQUE	19
TELEMEDECINE ET OPHTALMOLOGIE	21
DEFINITION	21
A. <i>Historique de la communication humaine</i>	22
B. <i>Contexte d'utilisation en ophtalmologie</i>	24
RESSOURCES ET SECURITE	26
A. <i>Sécurité</i>	26
B. <i>Matériel et logiciel</i>	28
PRISE EN CHARGE	30
A. <i>Cotation et remboursement</i>	30
Téléconsultation	30
Télé-expertise	32
Télésurveillance	33
Télésoins	35
B. <i>Aide à l'investissement pour le praticien</i>	36
Aide de la sécurité sociale	36
Aide de l'Etat	38
Aide régionale	38
AVANTAGES	39
A. <i>Avantages pour le patient</i>	39
B. <i>Avantages pour le praticien</i>	39
C. <i>Avantages pour la société</i>	40
Désert médical	40
Transport Sanitaire	40
Coût-efficacité/Santé publique	41
PROTOCOLES ACTUELS	42
A. <i>Généraux</i>	42
RNO et RNM (ou protocole Muraine)	42
Dépistage ROP en télé médecine	44
Téléconsultation	44
B. <i>Spécifiques au diabète</i>	46
Protocole organisationnel du dépistage de la rétinopathie diabétique en Télé médecine	46
OPhtodiat APHP	48
Autre réseau de dépistage	51
Application mobile	53
LIMITES	54
A. <i>Attachement au réel</i>	54
B. <i>Fraude</i>	55
Exercice illégal de la télé médecine	55
Téléconseil	56
C. <i>Risque de piratage</i>	57
D. <i>Réseau</i>	58

E. <i>Considération écologique</i>	59
Mail.....	59
Data center	60
BILAN ACTUEL DE LA TELEMEDECINE EN FRANCE	61
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	62
DEFINITION	62
A. <i>Intelligence Humaine</i>	62
Le Modèle CHC (Cattell-Horn-Carroll)	62
La théorie triarchique de l'intelligence	63
Les 8 formes d'intelligence	64
Quotient Intellectuel	65
B. <i>Intelligence artificielle</i>	66
Base de données	67
Algorithme.....	67
HISTORIQUE D'APPLICATION	76
A. <i>Culture générale</i>	76
B. <i>Médecine</i>	78
APPLICATION EN OPHTALMOLOGIE POUR LA RD	82
CONSIDERATION ETHIQUE/LIMITE DE L'IA	91
ETUDE PILOTE DIABEYEIA	95
RATIONNEL DE L'ETUDE	95
A. <i>Justification</i>	95
B. <i>Objectif</i>	96
Objectif Primaire	96
Objectif secondaire	96
C. <i>Critères de jugements</i>	96
Critère de jugement principal.....	96
Critères de jugement secondaire	96
METHODOLOGIE	97
A. <i>Matériel et Méthode</i>	97
B. <i>Critères d'inclusion et de non inclusion</i>	98
C. <i>Mise en place pratique et méthodologie statistique</i>	99
ASPECT TECHNIQUE ET FINANCIER	101
A. <i>Financement</i>	101
B. <i>Protection des données</i>	101
C. <i>Comité de Protection des Personnes</i>	102
CONCLUSION.....	103

Introduction

En 2021, à l'heure de la numérisation croissante de notre société, voire même de son ubérisation, néologisme très en vogue convoquant ici la mise en relation immédiate de deux parties plutôt que la précarisation du travail, nous assistons à la naissance d'un monde hyperconnecté, tout ceci renforcé par la crise sanitaire actuelle interdisant les contacts physiques. Le progrès technologique étant sans cesse croissant, des outils sont créés en anticipant des besoins, voire en créant celui-ci. Devant cette amélioration des moyens de communication, le métier d'ophtalmologue est donc amené à évoluer, à s'adapter tout en gardant l'intérêt du patient au centre de la prise en charge. Cette thèse a pour but de dresser un état des lieux des possibilités actuelles de la télémédecine en ophtalmologie, de ses applications pratiques en cours et d'évoquer ses possibles futures utilisations, agrémentées de la prometteuse Intelligence Artificielle.

Ce travail sera axé sur la rétinopathie diabétique (RD), sujet en lien par conséquent avec une autre pandémie mondiale, celle du diabète, que connaissent nos sociétés modernes, avec plus de 400 millions de cas dans le monde selon l'Organisation Mondiale de la Santé. De par le nombre de patients potentiels à dépister, et le nombre réduit de praticiens pouvant exercer ce dépistage, notamment dans les zones de déserts médicaux, il apparaît que la rétinopathie diabétique est une pathologie qui se prête très bien à la télémédecine, dont le principal avantage est de briser les barrières géographiques. Le but est bien entendu de mieux dépister pour limiter les conséquences de cette pathologie sur la vue des Français.

Dans une première partie, nous parlerons spécifiquement de la prise en charge actuelle du diabète, avec rappel épidémiologique, physiopathologique et thérapeutique.

Puis dans un second temps, nous tenterons de définir la télémédecine, tout en reprenant son historique. Nous souhaitons y évoquer aussi bien ses avantages que ses limites, décrire son cadre réglementaire, ainsi que ses dérives potentielles.

Nous traiterons de la notion d'intelligence artificielle dans une troisième partie, véritable révolution de ces dernières années, qui n'appartient désormais plus à la science-fiction. De sa conceptualisation dans les années 1950 à son bouleversement récent introduit par le 'Deep Learning', avec ses bases de données gigantesques et ses puissants algorithmes d'apprentissage automatique, nous retracerons ensemble les grands changements qu'a connus cette technologie, jusque dans son application dans la pratique quotidienne en ophtalmologie.

Pour finir, nous présenterons la mise en place de l'étude pilote DiabEyeIA, véritable point de rencontre des 3 premiers thèmes, qui verra l'installation des rétinophotographes portables assistés par Intelligence Artificielle en officine de pharmacie pour tenter d'améliorer encore le dépistage de la rétinopathie diabétique par télémedecine, dans un premier temps en Normandie, mais avec in fine la possibilité de modifier le parcours patient en France dans sa globalité si les résultats s'avéraient concluants.

Diabète et ophtalmologie

Nous reprenons ici la définition classique du diagnostic du diabète : une glycémie supérieure à 2 g/l en présence de symptômes à n'importe quel moment de la journée ou une glycémie à jeun supérieure ou égale à 1,26 g/l, contrôlée à deux reprises en l'absence de symptômes.

La rétinopathie diabétique est la complication ophtalmologique du diabète la plus commune et la plus sévère en étant la principale source de cécité dans cette pathologie (1).

Epidémiologie

A. Situation mondiale

Comme indiqué précédemment, les derniers chiffres de l'OMS font état de 422 millions de diabétiques dans le monde, soit environ 5.4% pour une population globale de 7.8 milliards d'individus. A la fois la prévalence et l'incidence de cette pathologie sont en augmentation au cours des dernières décennies.

La rétinopathie diabétique est identifiée dans 1/3 des patients diabétiques dans le monde. Elle reste la principale cause de cécité évitable dans la population en âge de travailler (1). Le principal facteur de risque associé est un mauvais contrôle glycémique (2). L'ancienneté du diabète et l'hypertension artérielle sont d'autres facteurs retrouvés comme significativement associé avec la rétinopathie diabétique (3).

10% des patients diabétiques dans le monde ont une RD dite menaçante pour la vision (RD proliférante ou présence d'un œdème maculaire diabétique) d'après une méta-analyse de 2012 (3).

De façon intéressante, le nombre de diabétiques dans le monde augmente donc alors que l'incidence de la RD est en diminution. Un meilleur suivi de l'HbA1c, et une meilleure connaissance du diabète peuvent expliquer cela.

Le dépistage et la prise en charge précoce de la RD représente d'importantes économies de santé. Des études conduites avant 2010 en Allemagne, en Suède et aux USA ont pu établir que le coût médical direct annuel de la RD se multiplie par 10 (passant en moyenne de 45 à 450€/an) en cas d'atteinte sévère (RDP ou OM). (4)

B. Situation française

Selon les derniers chiffres de Santé publique France (5), on comptait 5.2% de patients diabétiques traités en France en 2019, soit 3.5 millions de français. Ce pourcentage est en augmentation comparativement aux données de 2012, et poursuit l'évolution entamée depuis 2000. On remarquera que ce taux est assez proche de la prévalence dans le monde.

Toujours d'après Santé publique France, les chiffres montrent une prévalence du diabète près de deux fois plus élevée dans les départements d'Outre-mer. La prévalence du diabète est plus élevée dans les communes les plus défavorisées socioéconomiquement et chez les personnes d'un niveau socioéconomique moins favorisé. Elle est également plus élevée chez les femmes d'origine maghrébine.

Concernant la rétinopathie diabétique en France, peu de données fiables sont disponibles d'après le bulletin de l'institut de veille sanitaire de 2015 (6). On estime classiquement sa prévalence à environ 30% de la population diabétique, soit plus de 1 million de patients, en se basant sur les chiffres de prévalence d'autres études d'Europe de l'ouest. Elle serait sous diagnostiquée car les chiffres se basant sur les déclarations des praticiens ne sont que de 10%, ce qui s'explique par le nombre probablement élevé de patients diabétiques non suivis sur le plan ophtalmologique (7).

Une étude récente de 2019 a estimé l'incidence en France de la RD nécessitant un recours à un ophtalmologue en se basant sur un réseau de dépistage de patients diabétiques en île de France nommé OPHDIAT. Pour le diabète de type 1 il est retrouvé une incidence annuelle de 2.19%, tandis que dans le diabète de type 2, elle était de 1.92%.(8) En prenant un taux d'incidence de 2% tout diabète confondu, on pourrait donc estimer à 70 000 nouveaux patients le nombre à identifier chaque année ayant développé une RD en France et nécessitant une prise en charge ophtalmologique en sus des patients déjà suivis.

Toujours selon les résultats du réseau OPHDIAT en île de France, réseau ayant dépisté plus de 150 000 patients depuis sa création en 2004, on peut estimer que parmi

les découvertes de RD, il y aura environ 0.5% de de forme proliférative, 3.4% ayant un œdème maculaire et 5.6% une forme sévère nécessitant un traitement par PPR (Pan Photo coagulation Rétinienne) .(7)

Et pourtant, les données les plus récentes disponibles de santé publique France montrent un taux d'examen ophtalmologique bisannuel chez les patients diabétiques de seulement 64% en 2018 (9). Des progrès restent donc à effectuer pour mieux dépister cette pathologie potentiellement cécitante alors qu'il existe un traitement efficace si fait à temps.

Physiopathologie

Parmi les complications ophtalmologiques du diabète, nous ne ferons que citer la cataracte, les paralysies oculomotrices, voire le glaucome et dans certains cas la diminution de la sensibilité cornéenne pouvant entraîner ulcère et abcès. Ici nous nous intéresserons préférentiellement à la physiopathologie de la rétinopathie diabétique en nous basant sur l'article de l'Encyclopédie Médico-chirurgicale de 2010 (10), l'article par Brownlee (11) et sur le travail récent de synthèse de Wang et al en 2018 (12).

Comme expliqué précédemment, le principal facteur de risque associé à l'apparition de la RD est le mauvais équilibre glycémique. La conséquence sur la rétine de cette imprégnation en glucose est complexe et met en jeu plusieurs phénomènes. Les lésions qui entraînent une RD menaçante pour la vision (œdème maculaire et néovascularisation) sont en effet l'aboutissement de nombreux phénomènes intriqués : anomalies microvasculaires, inflammation chronique, neurodégénérescence rétinienne, etc....

Les cellules les plus touchées sont celles ayant du mal à garder un équilibre intracellulaire en glucose stable, ce qui explique que toutes les cellules du corps ne souffrent pas de la même façon de l'état d'hyperglycémie. En ne pouvant pas limiter le transport intracellulaire de glucose, les cellules endothéliales notamment (rétines, glomérule du rein..) sont celles qui en connaissent le plus de conséquences.

A. Voie des polyols

La première explication physiopathologique historique concerne la voie de l'aldose réductase dite des polyols. L'accumulation de glucose dans les cellules rétinienne entraîne la fabrication de sorbitol par le biais de l'activité de l'aldose réductase. La fonction classique de cette enzyme est de réduire les aldéhydes toxiques de la cellule en alcool inactif. Cependant lorsque la concentration intracellulaire en glucose augmente trop, l'enzyme commence à réduire le glucose en sorbitol, qui sera plus tard oxydé en fructose.

Ce sorbitol synthétisé ne peut pas traverser les membranes cellulaires et s'accumule donc dans les cellules. Il crée un gradient hyperosmotique qui entraîne une hyperhydratation intra cellulaire. Ce déséquilibre à l'intérieur des cellules rétinienne va perturber leur fonctionnement.

De plus, pour transformer le glucose en sorbitol, cette enzyme va consommer le cofacteur NADPH (Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate). Ce NADPH étant essentiel pour régénérer un antioxydant, le glutathion, en forme réduite, sa consommation en excès va augmenter le stress oxydatif. Ceci va contribuer à un état cellulaire dit de pseudo hypoxie.

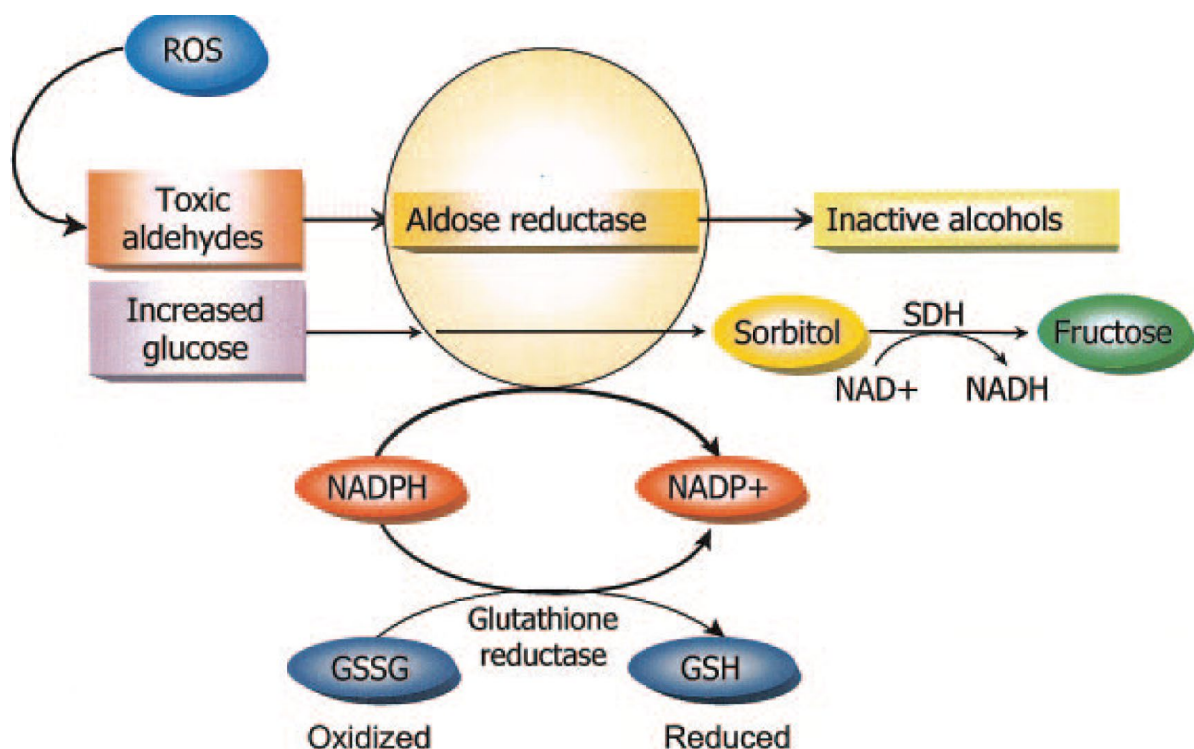


Figure 1 Cascade de réaction de la voie des polyols d'après Brownlee (11)

B. Produits avancés de la glycation (AGE)

Outre l'activité de l'Aldose Réductase, le glucose peut se fixer à d'autres protéines et donner ainsi naissance, après transformations biochimiques complexes successives, aux produits avancés de la glycation (AGE). L'hémoglobine glyquée utilisée pour monitorer l'équilibre glycémique des 3 derniers mois en est l'exemple le plus connu. Ce phénomène de production des AGE peut être physiologique, mais est accentué durant le vieillissement et surtout il est très augmenté en cas d'hyperglycémie chronique. Ces AGE vont eux même se lier à des récepteurs présents à la surface d'autres protéines. Ceci peut entraîner par exemple :

- Une rigidification des tissus par création de liaisons croisées entre les protéines ce qui expliquerait l'épaississement des membranes basales et la rigidification du vitré dans la RD.
- Une altération de protéines responsables de la transcription de l'acide désoxyribonucléique (ADN) des cellules endothéliales et donc le dysfonctionnement de ces cellules.
- Une inflammation chronique par liaison des AGE à la surface des macrophages, avec consécutivement production de cytokines inflammatoires et facteurs de croissance.

Cette inflammation chronique s'exprime de façon visible par la conséquence de la stase leucocytaire. Les leucocytes, activés notamment du fait des AGE, vont en effet adhérer de façon anormale à l'endothélium rétinien et ainsi créer des territoires d'ischémies. Les protéines ICAM-1 (Integrin Cellular Adhesion Molecule) VCAM-1 (Vascular Cell Adhesion Molecule) et selectine jouent un rôle important dans cette adhésion anormale. La perte en péricytes, cellules entourant les cellules endothéliales et jouant un rôle clef dans la structure et la perméabilité capillaire, a été corrélée à la présence de ces AGE.

C. Protéine kinase C (PKC)

L'hyperglycémie va également induire la synthèse de diacylglycérol qui est un puissant cofacteur activant la protéine kinase C (PKC). Il a été montré que cette activation mène à l'augmentation :

- Du stress oxydatif d'une part (diminution NADPH à nouveau par augmentation de NADPH oxydase, augmentation des dérivés réactif de l'oxygène...).
- Des anomalies du flux sanguin (modification des taux de NO (Nitric Oxyd) endothélial et d'endothelin 1 vasoconstrictrice)
- De l'angiogenèse et de la perméabilité vasculaire (fabrication de VEGF (Vascular Endothelial Growth factor)), genèse la néovascularisation et de l'OMD
- D'occlusion vasculaire (augmentation de fibronectine et de collagène, baisse de la fibrinolyse)

D. Voie de l'hexosamine

Le glucose intracellulaire est toutefois majoritairement métabolisé par la voie de la glycolyse, devenant du glucose-6-phosphate puis du fructose-6-phosphate ainsi de suite dans la voie de la glycolyse.

Mais à partir d'un certain point, et ce de façon plus marquée en cas d'hyperglycémie, une autre voie de transformation, nommée voie de l'hexosamine, voit le fructose-6-phosphate se retrouver in fine en UDP-GlcNAc (uridine-5-diphospho-N-acetylgalactosamine) qui va lui-même venir modifier l'expression des gènes de l'ADN et donc altérer le fonctionnement des cellules endothéliales par phosphorylation.

E. Neurodégénérescence

La neurodégénérescence rétinienne est un autre évènement, précoce, dans la marche de la RD. Il a été observé en effet une apoptose des neurones rétiens très tôt dans la pathologie. Plus précisément, des taux de cytochrome C ou d'AIF (Apoptosis-Inducing Factor), facteur pro apoptose fabriqué en excès par les mitochondries, sont significativement plus élevés dans la RD. La réduction d'épaisseur rétinienne induite, et notamment des couches superficielles (limitante interne) semble précéder l'apparition de la RD cliniquement.

F. Néovascularisation

L'hypoxie et l'ischémie rétinienne induite par tous les facteurs précédemment cités (stress oxydatif, inflammation et leucostase, anomalie du flux sanguin, pertes en péricytes et dysfonction voire apoptose des cellules endothéliales, occlusion vasculaire) va contribuer à la production de nombreux facteurs de croissance diffusant dans le vitré : les Fibroblast Growth Factors (FGF) 1 et 2, le Platelet Derived Growth factor (PDGF), l'Insulin-like Growth Factor (IGF) I, et le VEGF. Ces derniers vont être à l'origine du phénomène d'angiogenèse cherchant à contrebalancer l'ischémie et l'hypoxie : on assiste malheureusement à partir d'un certain seuil à un bourgeonnement de néovaisseaux à partir des veinules adjacentes aux territoires ischémiques, en se servant du vitré comme d'un tissu de soutien.

Le facteur de croissance nommé VEGF joue un rôle central. En plus d'être un facteur d'angiogenèse en activant notamment les MAP (Mitogene Activated Proteine), il induit la phosphorylation des protéines responsables des liaisons serrées de des cellules endothéliales et ainsi augmente la perméabilité capillaire, jouant un rôle certain dans la survenue de l'œdème maculaire diabétique.

Diagnostic

Comme nous l'avons vu, de l'hyperglycémie va découler une multitude de conséquences menant à une hypoxie et une ischémie de la rétine. Pour diagnostiquer une RD, l'ophtalmologue s'attache à retrouver les manifestations visibles des conséquences de cette hypoxie et ischémie au niveau rétinien.

A. Sémiologie

- Microanévrismes : ectasies de la paroi des capillaires, favorisés par leur dilatation en bordure d'un micro-territoire rétinien mal perfusé.

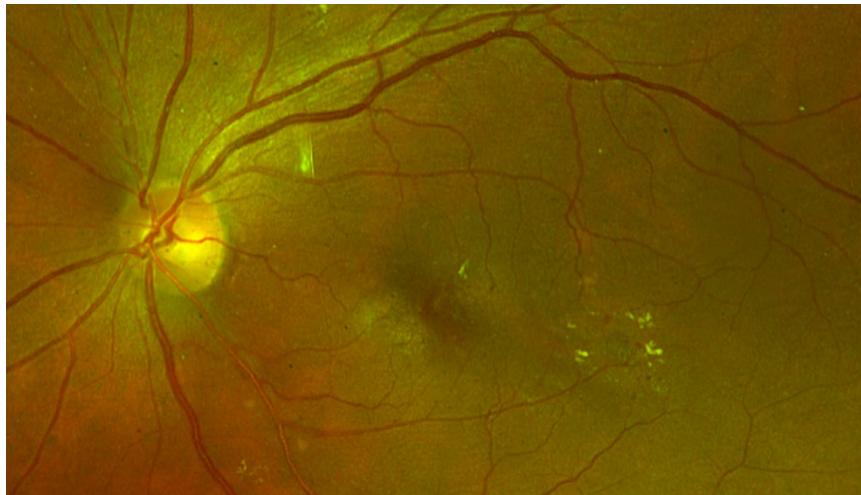


Figure 2 Microanévrismes temporo-maculaires (associés à quelques exsudats)

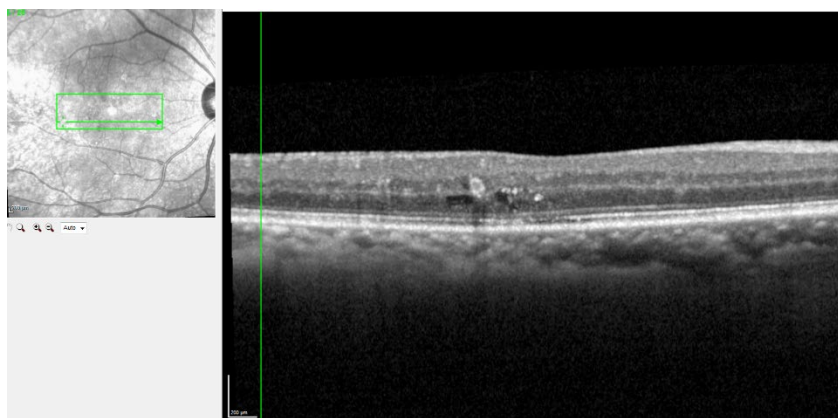


Figure 3 Un microanévrisme visible en coupe OCT avec quelques logettes et exsudats issus de celui-ci. On le reconnaît notamment par sa paroi, qui est hyper-réfléchive.

- Dilatation veineuse en chapelet, par modification du flux sanguin.



Figure 4 Dilatation veineuse, en chapelet, bien visible dans le quadrant supéro-nasal

- Hémorragies rétinienne : punctiformes, elles ont un aspect analogue aux microanévrismes ; en tâche, elles traduisent une souffrance ischémique du tissu rétinien.



Figure 5 - 1 Hémorragie en tâche en supérieur associée à de nombreuses hémorragies punctiformes et anévrismes

- Anomalie microvasculaire intra rétinienne (AMIR) : ce sont des télangiectasies vasculaires intra-rétiniennes, qui sont parfois considérées comme des néovaisseaux à l'intérieur de la rétine. Elles diffusent cependant peu en angiographie comparativement aux néovaisseaux pré-rétiniens.



Figure 6 AMIR visible au centre de l'image

- Œdème maculaire : il s'explique par l'augmentation de la perméabilité capillaire et la perte d'efficacité de la Barrière Hémato Rétinienne par épaissement de la membrane basale, pertes en péricytes et en cellules endothéliales. Il est facilement exploré et visible en tomographie par cohérence optique.

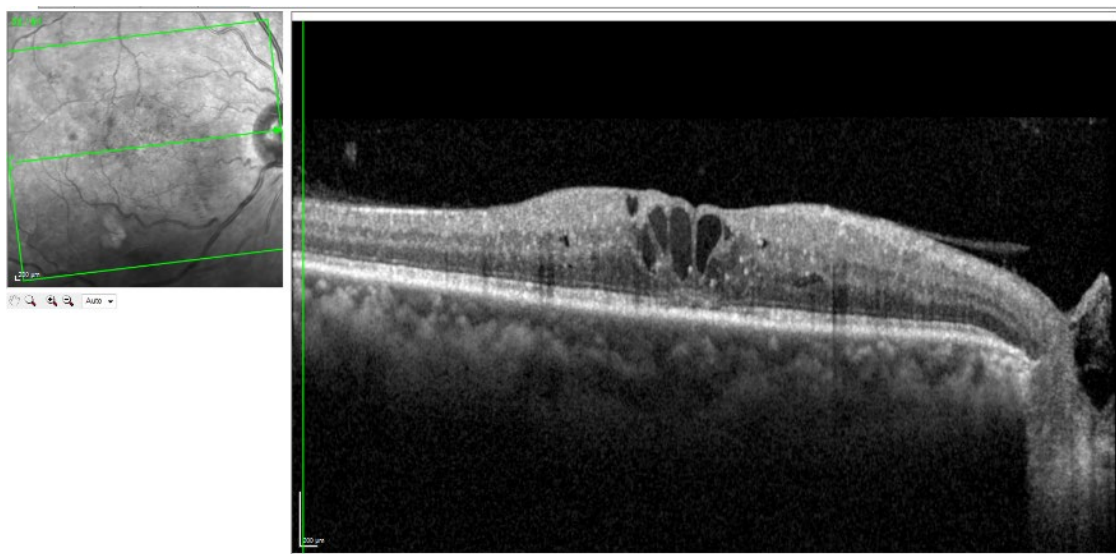


Figure 7 Coupe OCT d'un OMD cystoïde

- Exsudats : résultent de l'accumulation de lipoprotéines à l'intérieur de la rétine. Ce sont donc des dépôts jaunes, habituellement disposés en couronne autour des anomalies microvasculaires dont ils sont issus.

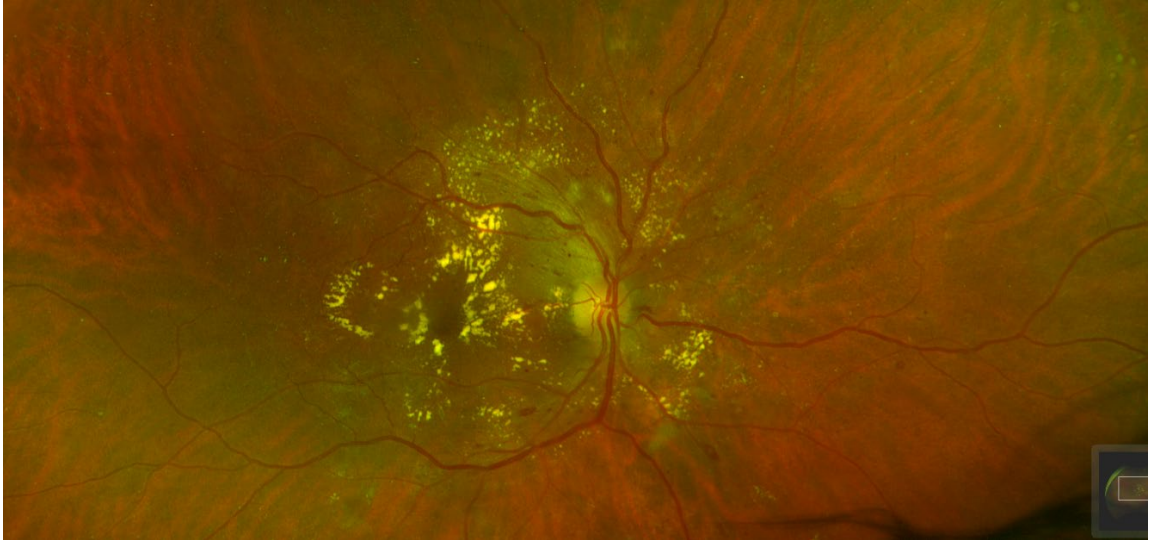


Figure 8 Rétinographie montrant de nombreux exsudats circinés maculaires

- Nodules cotonneux : résultent de l'accumulation de matériel axoplasmique dans les fibres optiques du fait de l'occlusion des artérioles pré-capillaires rétiniennes. Ce sont des lésions blanches, superficielles et de petite taille.



Figure 9 Nodules cotonneux au niveau de l'arcade vasculaire supérieure et inférieure. La survenue des nodules cotonneux est également liée à une part de rétinopathie hypertensive en cas d'hypertension artérielle surajoutée non contrôlée.

Tout l'enjeu consiste à diagnostiquer les atteintes rétiniennes avant le stade dit prolifératif qui entraîne :

- Néovaisseaux pré-rétiniens se développant par l'angiogenèse consécutive à l'expression de facteurs de croissance tel le VEGF. Ils utilisent le vitré comme tissu de soutien. Ils diffusent de façon marquée aux temps tardifs d'une angiographie.

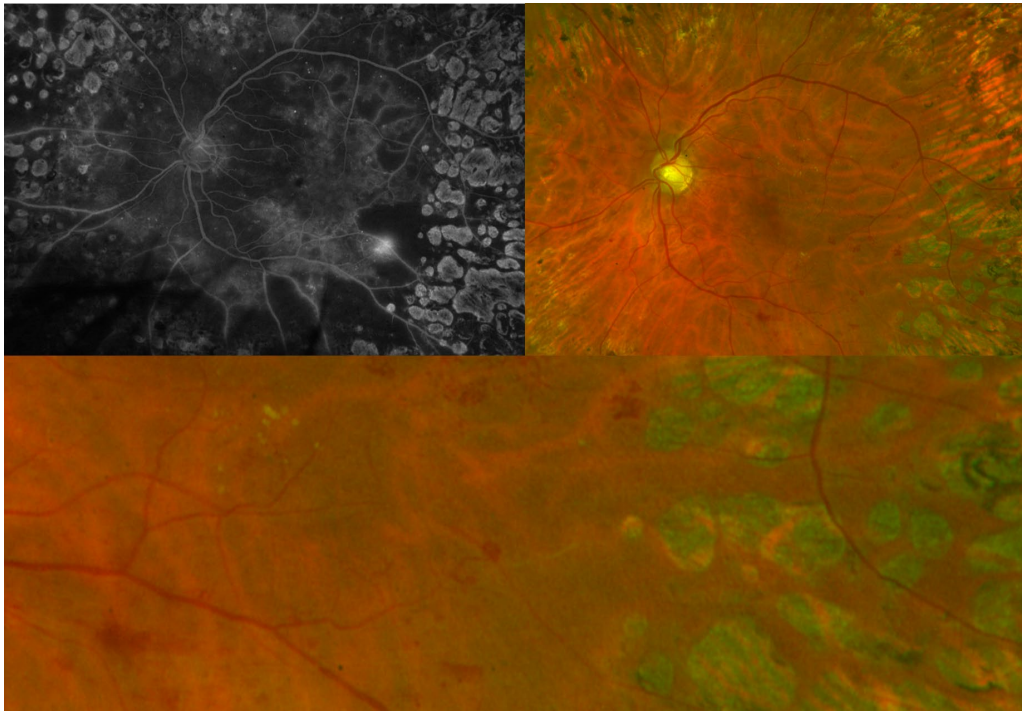


Figure 10 Développement d'un néovaisseau pré-rétinien débutant malgré la présence d'une PPR, en temporal inférieur de la macula. L'angiographie permet de faire la part des choses avec les AMIR ,et d'identifier facilement le néovaisseau grâce à son hyperfluorescence et à sa diffusion. On remarque des territoires non perfusés sans PPR contribuant à cette prolifération.



Figure 11 Voile néo-vasculaire pré-rétinien supéro-papillaire, à un stade plus tardif.

- Hémorragie intra vitréenne (HIV) par fragilité de ces néovaisseaux avec barrière hémato-rétinienne dysfonctionnelle.



Figure 12 Hémorragie intra vitréenne, partant du néovaisseau supéro-papillaire de l'image précédente.

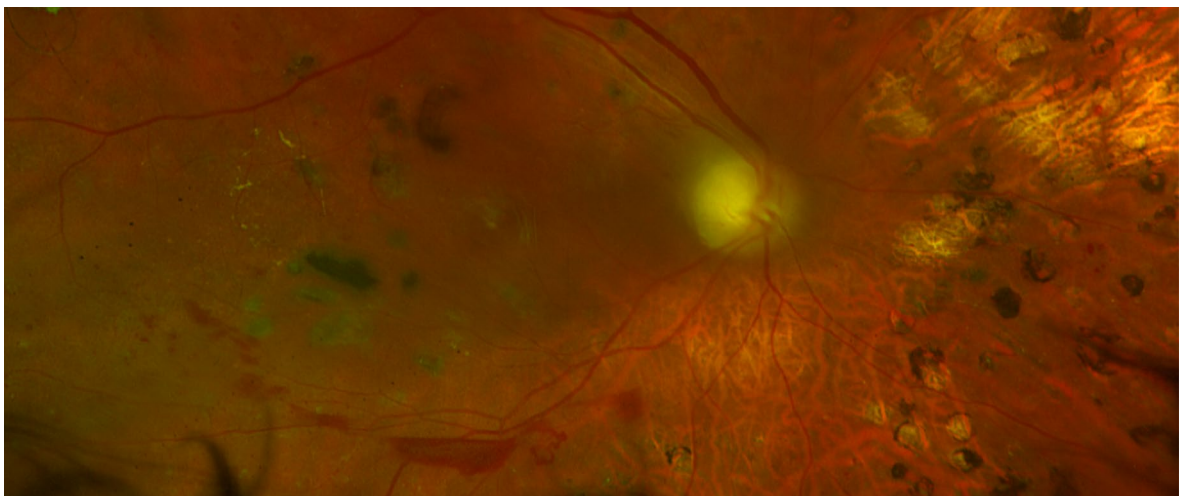


Figure 13 Hémorragie en nappe rétro hyaloïdienne partant d'un néovaisseau pré-rétinien situé sur l'arcade vasculaire temporale inférieure

- Au stade les plus avancés survient le décollement de rétine induit par la traction et contraction sur celle-ci du remaniement tissulaire de soutien des néovaisseaux. En cas de néovascularisation dans le segment antérieur de l'œil, progressant du bord pupillaire à l'angle de résorption de l'humeur aqueuse, on assiste à la naissance du glaucome néo vasculaire.

B. Rythme et mode de dépistage

La méthode de dépistage historique de la RD est l'examen du fond d'œil après dilatation pharmacologique au cabinet de l'ophtalmologue. Cependant l'utilisation de clichés de photographies couleurs de la rétine ont montré leur efficacité.(13)

Selon les recommandations de la Haute Autorité de Santé (HAS) en France de 2011, l'examen doit être pratiqué dès la découverte d'un diabète de type 2 et après 3 ans d'évolution pour un diabétique de type 1. Chez l'enfant, ce dépistage peut commencer à partir de l'âge de 10 ans.

Toujours selon l'HAS, le rythme du suivi recommandé est aujourd'hui de (14) :

- En l'absence de rétinopathie diabétique, chez les diabétiques non insulino-traités, équilibrés pour l'hémoglobine glyquée (HbA1c) et la pression artérielle, un intervalle de dépistage de 2 ans est suffisant après un examen du fond d'œil de référence.
- En cas de diabète et/ou de pression artérielle mal contrôlés, un examen au moins annuel est nécessaire.
- Pour la femme enceinte diabétique (hors diabète gestationnel), il est recommandé un dépistage avant la grossesse, puis trimestriel et en post-partum.

Il faut être particulièrement vigilant chez certains patients. En effet les facteurs de risques d'aggravation d'une rétinopathie diabétique sont : une chirurgie ophtalmologique, la puberté, une équilibration trop rapide de la glycémie et la grossesse.(15)

Actuellement, pour tenter d'améliorer ce taux, le dépistage s'ouvre à la télémédecine. Nous reviendrons sur les protocoles et stratégies possibles dans la partie consacrée, sachant que le dépistage organisé a montré son coût-efficacité au niveau mondial. (4)

Thérapeutique

Le traitement va dépendre du stade de classification de la RD. Sa classification est homogénéisée sur le plan mondial depuis 2003 (16). Un œdème maculaire peut être présent à différents stades et ne modifie pas le degré de sévérité.

Proposed Disease Severity Level	Findings Observable on Dilated Ophthalmoscopy
No apparent retinopathy	No abnormalities
Mild nonproliferative diabetic retinopathy	Microaneurysms only
Moderate nonproliferative diabetic retinopathy	More than just microaneurysms but less than severe nonproliferative diabetic retinopathy
Severe nonproliferative diabetic retinopathy	Any of the following: more than 20 intraretinal hemorrhages in each of 4 quadrants; definite venous beading in 2+ quadrants; Prominent intraretinal microvascular abnormalities in 1+ quadrant <i>And no signs of proliferative retinopathy</i>
Proliferative diabetic retinopathy	One or more of the following: neovascularization, vitreous/preretinal hemorrhage

Figure 14 Score de sévérité de la RD standardisé (16)

En l'absence de RD, une simple surveillance au rythme de 1 à 2 ans en fonction de la prise d'insuline et de l'équilibre de l'HbA1c et de la tension artérielle. Il est rappelé au patient à tout stade la nécessité d'un bon équilibre de ces paramètres.

Au stade minime, où seuls quelques microanévrismes sont retrouvés, la surveillance au moins annuelle est préconisée.

Dès le stade modéré, qui se définit par une RD non sévère présentant plus que quelques microanévrismes, une surveillance rapprochée au moins semestrielle est préconisée, avec la réalisation d'angiographie au cas par cas.

Au stade sévère mais non proliférant (ou dit pré proliférant), qui se définit soit par la présence de plus de 20 hémorragies dans les 4 quadrants, soit par la présence de

dilatations veineuses en chapelet dans 2 quadrants, soit par la présence du moindre AMIR, la réalisation d'une pan photo-coagulation rétinienne (PPR) est discutée, surtout en présence des facteurs de risque d'aggravation cités plus haut. Cette PPR consiste à lasériser la rétine périphérique ischémique, induire une coagulation de celle-ci et ainsi détruire les zones ischémiques produisant les facteurs de croissance pour arrêter la marche en avant vers la néovascularisation.

Si la RD est diagnostiquée à un stade déjà proliférant, avec présence de néovascularisation, la PPR est réalisée en urgence. En sus, une injection intra-vitréenne d'anti-VEGF peut être réalisée en amont d'une chirurgie vitréorétinienne pour décollement de rétine tractionnel ou HIV afin de limiter le saignement per opératoire et simplifier la procédure.

A tout stade, la présence d'un œdème maculaire diabétique fera discuter la réalisation d'injection intra-vitréenne d'anti VEGF ou de corticoïdes en fonction de l'acuité visuelle (classiquement dès 6/10 si l'on retient les AMM des thérapeutiques). En cas d'œdème focal en lien à un microanévrisme, un laser maculaire peut être réalisé pour occlure celui-ci et ainsi tarir l'exsudation.

Il a été prouvé que les taux de VEGF dans le vitré diminuent après la réalisation d'une PPR. Ainsi le fait de provoquer la disparition des facteurs de croissance (ou du tissu de soutien par vitrectomie) arrête le phénomène de néovascularisation, qui reste un phénomène fragile devant être alimenté. S'il n'est pas arrêté, les néovaisseaux mûrissent et deviennent adhérents au vitré en soutenant la croissance d'un tissu glial de soutien, ce qui provoquera à terme le décollement de rétine tractionnel.

Télémédecine et ophtalmologie

Définition

La télémédecine se définit de façon générale comme l'exercice de la médecine à distance, procédé permis par les outils modernes d'information et de communication, en temps réel ou légèrement différé. Son premier encadrement législatif en France est assez récent, et date de 2010 (17). Il recense alors 5 catégories :

- La téléconsultation : une consultation réalisée à distance entre un médecin et un patient.
- La télé-expertise : un médecin demande un avis à un autre professionnel de santé.
- La télé-surveillance : un médecin interprète à distance des données (imagerie, résultats d'examen). L'enregistrement et la transmission des données peuvent être automatisées ou réalisées par le patient lui-même ou par un professionnel de santé.
- La télé-assistance : un médecin aide à distance un autre professionnel de santé dans la réalisation d'un acte technique (chirurgie, ...).
- La régulation médicale : déclenchement à distance d'une prise en charge par appel du Samu par le 15.

L'ophtalmologie est une spécialité très vivante, et une des plus dynamiques sur le plan des innovations technologiques. Aussi, l'ensemble des catégories de télémédecine s'est développé ces dernières années, hormis la régulation médicale qui reste une entité à part.

A. Historique de la communication humaine

Dans l'histoire de la médecine, patients et médecins ont dû depuis l'origine aller à leur rencontre respective de manière physique, à pied puis à cheval, puis en train ou en voiture afin de briser la distance géographique qui les séparaient. La communication longue distance entre humains fut longtemps corrélée à ces moyens de locomotion, car les messages par lettre papyrus ou autre tablette de cire devaient être transportées d'un point A à un point B. Des solutions quasi instantanées bien connues comme les fameux signaux de fumée indiens ou le maillage régulier en tour de guet donnant l'alarme par un feu à leur sommet, existaient bel et bien dès l'antiquité mais l'information véhiculée n'était pas assez riche pour permettre une réelle pratique médicale.

Il est vrai qu'avec le temps, ces deux supports de l'information vont s'améliorer : la vitesse des moyens de transport est crescendo (premier vol d'avion en 1890 par Clément Ader) et les progrès dans l'optique sont majeurs (jumelles ou télescope à partir du XVIème siècle). On notera d'ailleurs l'émergence en France d'un premier vaste réseau de communication au XIXème siècle : le télégraphe optique par Claude Chappe. Des structures surmontées de pales métalliques amovibles reparties tous les 10km-15km permettaient, à l'aide d'un code, de communiquer en quelques minutes une information de Paris à Lille par exemple.

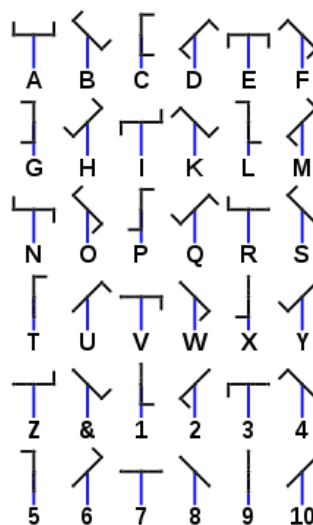


Figure 15 Illustration des télégraphes optiques de Chappe et son code de déchiffrage

Mais les conditions météorologiques et de visibilité se devaient d'être au rendez-vous et ce télégraphe optique ne fut pas utilisé pour la pratique médicale mais surtout administrative dans les temps post révolutionnaires.

Dans ces conditions, il faut donc attendre la découverte de l'électricité et toutes les inventions qui en découlent (télégraphe électrique vers 1840 par Samuel Morse et Téléphone vers 1876 par Graham Bell) pour que l'information s'affranchisse réellement des barrières géographiques.

Les premières téléconsultations purent donc probablement avoir lieu à la fin XIX^{ème} début XX^{ème} siècle sans que la pratique ne soit alors encadrée. Il est toutefois admis qu'on atteste véritablement la naissance de la télémédecine par l'envoi par ligne téléphonique d'un électrocardiogramme en 1906 par Willem Einthoven. (18)

Avec les années, l'information va circuler de plus en plus vite, des câbles sous-marins vont relier les continents, l'augmentation de puissance des ordinateurs sera exponentielle, des protocoles de communication entre ces derniers vont former l'internet, la fibre optique se répandra et des satellites de communication seront envoyés dans l'espace : la possibilité d'échange d'information médicale n'a jamais été aussi rapide, elle est désormais possible en quasi temps réel à travers le globe. (19)

B. Contexte d'utilisation en ophtalmologie

L'utilisation de la télémédecine en ophtalmologie est une des réponses possibles à la problématique des déserts médicaux et plus largement des délais d'attente en ophtalmologie.

En France, on compte en 2020 selon la DREES (Direction de la Recherche, des Etudes, de l'Evaluation et des Statistiques) 5850 ophtalmologues, ce qui fait un taux de 8.7 pour 100 000 habitants, dans la moyenne européenne de 9 (20). Cependant, leur répartition sur le territoire est très inégale.

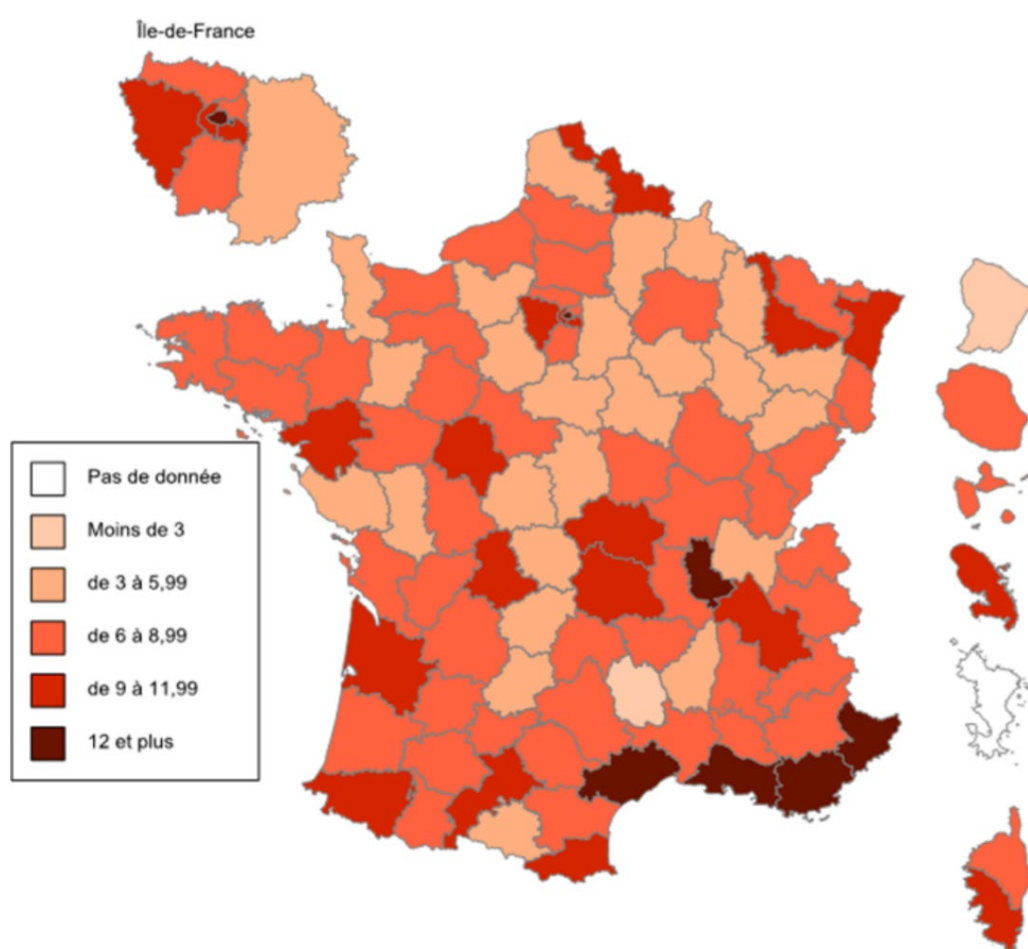


Figure 16 Densité des ophtalmologues en France selon données RPPS 2017 (21)

Ainsi alors que Paris ou le sud de la France, notamment la côte méditerranéenne semblent très bien pourvus en ophtalmologues, avec parfois plus de 12 ophtalmologues pour 100 000 habitants, d'autres territoires en sont sous dotés, la Lozère étant le cas le plus extrême, ayant moins de 3 ophtalmologues pour 100 000 habitants.

Le délai moyen constaté pour obtenir un rendez-vous sur l'ensemble du pays est de 61 jours en 2020, nettement en recul. En 2012, une étude IFOP (Institut Français d'Opinion Publique) pour l'observatoire Jalma estimait en effet les délais à 104 jours en moyenne. Ceci a été rendu possible grâce au développement du travail aidé et à l'utilisation de protocoles organisationnels permis par la télémedecine. (22) (23)

Mais là encore, il existe de nombreuses disparités entre départements et régions au niveau des délais d'attente, hors urgences (24) :

CABINETS D'OPHTALMOLOGIE : DÉLAIS MOYENS D'ATTENTE AVANT UN RENDEZ-VOUS EN FRANCE

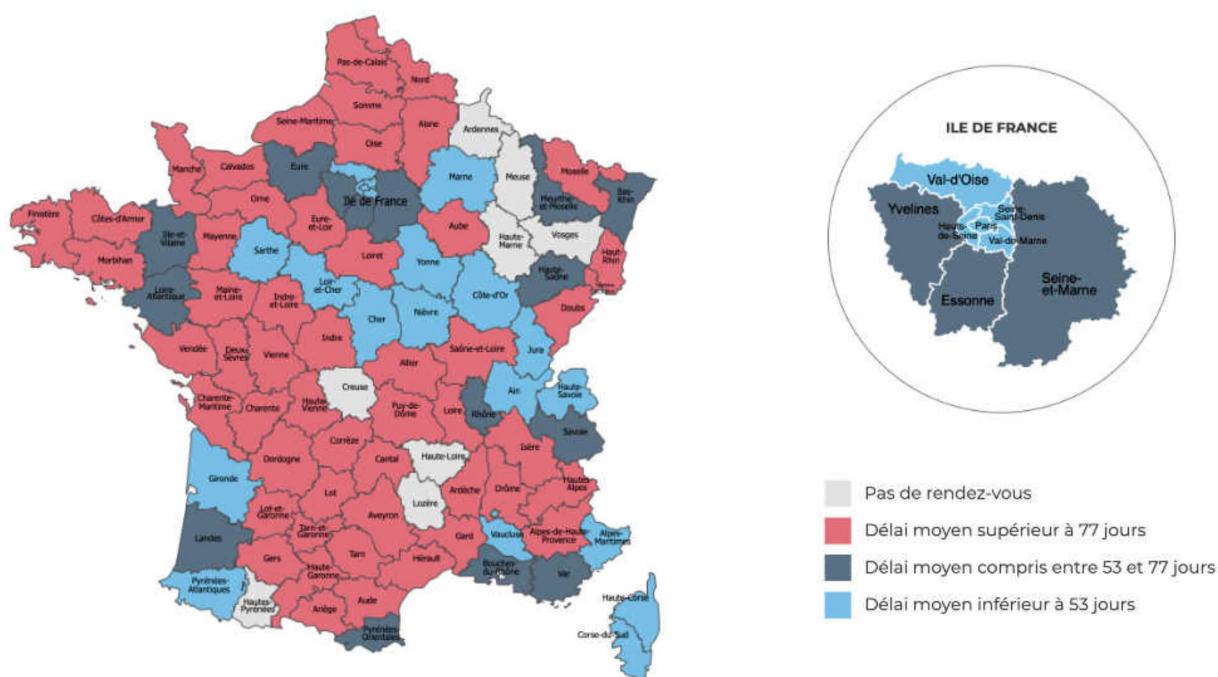


Figure 17 Carte issue d'une enquête « patient mystère » a été menée à l'échelle nationale auprès de l'ensemble des 4721 ophtalmologues conventionnés en exercice au sein de 6045 cabinets d'ophtalmologie conventionnés et centres de consultations privées hospitaliers en 2020 (24)

Huit départements semblent facilement être considérés comme désert médical, où la prise de rendez-vous apparaît très difficile voire impossible hors urgences : Les Hautes Pyrénées, la Lozère, la Haute Loire, la Creuse, La Haute Marne, les Vosges, la Meuse et les Ardennes. Encore une fois, même si on remarque que la corrélation n'est pas parfaite entre densité et délais de rendez-vous, Paris et la côte méditerranéenne se portent mieux.

Continuer le développement de la télémedecine reste donc un enjeu important pour une prise en charge équilibrée entre nos territoires, en réduisant les délais de consultation, surtout en zone sous dotée en ophtalmologues.

Ressources et sécurité

A. Sécurité

Afin de pratiquer une téléconsultation, il suffit en théorie d'être équipé d'un ordinateur, d'une webcam et d'une connexion internet. Les logiciels de communication doivent cependant répondre à une exigence de sécurité des données. L'HAS ne recommande pas d'utiliser simplement les applications répandues comme Skype ou Zoom. Une attention particulière doit être portée sur la sécurité et la protection des données personnelles de santé, l'utilisation d'outils dédiés est donc vivement encouragée (25). Il en existe plusieurs sur le marché, respectant le cahier des charges du cadre d'interopérabilité des systèmes d'information de santé (CI-SIS).(26) Voici comment se présente ce cahier des charges :

Téléconsultation patient "autonome"			
Référence de l'exigence	Nom	Énoncé	Description
Gestion et administration des identités			
Gestion des médecins téléconsultants			
Identification des médecins téléconsultants et création de compte			
IDM.1.1	Création d'un compte médecin téléconsultant	Le système DOIT permettre à un médecin téléconsultant de créer et gérer un compte utilisateur personnel	Le médecin téléconsultant doit pouvoir créer un compte utilisateur, le mettre à jour et le supprimer au besoin. Le système doit être conforme au référentiel d'identification de la PGSSIS. Il évite au médecin téléconsultant la saisie de ses données d'identité d'état civil et sectorielles, déjà collectées au préalable, et contenues dans les référentiels d'identité nationaux (RPPS à date). L'identification du médecin téléconsultant et la création de son compte doivent se faire selon 2 modalités par ordre de priorité : 1° Le système gère l'utilisation de la CPS ou e-CPS : la collecte des traits d'identité du médecin téléconsultant se fait automatiquement par la lecture de sa CPS. Les modalités d'authentification sont identiques pour le médecin téléconsultant. 2° Le système ne gère pas l'utilisation de la CPS ou e-CPS : le système doit alors gérer la collecte des traits d'identité du médecin téléconsultant par l'interrogation du webservice de l'ANS (service annuaire santé), sur la base des éléments suivants renseignés par le médecin téléconsultant : - Son identifiant légal de profession (numéro RPPS) - Tous les documents nécessaires à la justification de l'identité et de la profession du médecin téléconsultant Dans la 2ème modalité, le médecin téléconsultant doit renseigner en supplément un identifiant de connexion au SI (ex: n° RPPS) afin de pouvoir s'authentifier. Se reporter au référentiel d'identification des acteurs sanitaires, médico-sociaux et sociaux pour plus de précisions sur le processus d'enregistrement à suivre. Un administrateur fonctionnel du SI devrait pouvoir créer et gérer des comptes pour des personnes morales (structures médicales et médico-sociales), ainsi que pour des services rattachés à ses personnes morales. Des comptes gestionnaire référent devraient pouvoir être autorisés à administrer les comptes structures et services médicaux d'une structure. Traits d'identité à minima : Dénomination de la structure, identifiants légaux de la structure (identifiants FINESS E1, FINESS ET, ROR, SIREN, SIRET, RNA), type de structure, activités de la structure, adresse
IDM.1.2	Création d'un compte structure ou service médical	Le système DEVRAIT permettre de créer et gérer des comptes de gestion d'une structure ou de service médical d'une structure, et d'habiller un ou plusieurs gestionnaires référents pour une structure ou les services médicaux d'une structure	Un administrateur fonctionnel devrait pouvoir créer et gérer des comptes de gestionnaire référent de structure ou service médical de structure. Le gestionnaire référent est un médecin téléconsultant ou non, habilité à gérer des tâches administratives et d'accompagnement du patient pour le compte d'un ou plusieurs médecins téléconsultants (ex : secrétaire médical, cadre infirmier, responsable administratif, ...). Le gestionnaire peut intervenir de bout en bout dans l'acte de téléconsultation. Il peut être habilité à gérer pour le compte d'un ou plusieurs médecins téléconsultants les rendez-vous, la préparation des actes, l'envoi de compte rendu et prescription, le paiement et la facturation. La gestion des droits et habilitations des gestionnaires référents dépend de l'organisation de chaque structure, et doit être paramétrée dans l'interface d'administration du système. Traits d'identité à minima : Nom, prénom, identifiant légal le cas échéant (numéro RPPS, numéro SIREN/SIRET), structure et service médical de rattachement, adresse email, numéro de téléphone, adresse postale
IDM.1.3	Création d'un compte gestionnaire référent de structure	Le système DEVRAIT permettre de créer et gérer des comptes pour des gestionnaires référents de structure ou de service médical de structure	Un administrateur fonctionnel devrait pouvoir créer et gérer des comptes de gestionnaire référent de structure ou service médical de structure. Le gestionnaire référent est un médecin téléconsultant ou non, habilité à gérer des tâches administratives et d'accompagnement du patient pour le compte d'un ou plusieurs médecins téléconsultants (ex : secrétaire médical, cadre infirmier, responsable administratif, ...). Le gestionnaire peut intervenir de bout en bout dans l'acte de téléconsultation. Il peut être habilité à gérer pour le compte d'un ou plusieurs médecins téléconsultants les rendez-vous, la préparation des actes, l'envoi de compte rendu et prescription, le paiement et la facturation. La gestion des droits et habilitations des gestionnaires référents dépend de l'organisation de chaque structure, et doit être paramétrée dans l'interface d'administration du système. Traits d'identité à minima : Nom, prénom, identifiant légal le cas échéant (numéro RPPS, numéro SIREN/SIRET), structure et service médical de rattachement, adresse email, numéro de téléphone, adresse postale
IDM.1.4	Création de comptes médecin téléconsultant par un gestionnaire référent de structure	Si le système permet de gérer des structures, ALORS le système DEVRAIT permettre à un gestionnaire référent d'une structure ou d'un service médical d'une structure de créer des comptes	Un gestionnaire référent de structure ou de service médical d'une structure devrait pouvoir créer un compte utilisateur pour un médecin téléconsultant, le mettre à jour et le supprimer au besoin.

Figure 18 Référentiel fonctionnel socle pour les logiciels de télémédecine, CI-SIS (26)

Ci-joint quelques recommandations tirées du guide de bonnes pratiques de l'HAS :

- Pour l'échange des données, une messagerie sécurisée de santé doit être utilisée (le recours aux messageries électroniques personnelles est à exclure)
- Pour le partage des données, une plateforme de partage garantissant les conditions de confidentialité et de sécurité dues au traitement des données de santé doit être utilisée (une plateforme de téléchargement permet le partage de données à distance, en temps réel ou en différé, avec un patient ou un autre professionnel)

- Si le dispositif de télémédecine implique une externalisation des données, l'hébergement des données de santé doit être réalisé par un hébergeur agréé ou certifié pour l'hébergement, le stockage, la conservation de données de santé.

Une donnée personnelle est définie par le règlement général sur la protection des données (RGPD) comme « toute information se rapportant à une personne physique identifiée ou identifiable ». Les traitements de données à caractère personnel utilisés pour la mise en œuvre des actes de télémédecine suivent la même réglementation que les actes de médecine en présentiel (ex : tenue du registre des activités de traitement, responsable de traitement, respect des droits du patient d'accès, de rectification et d'opposition à leurs données) et ne font l'objet d'aucune démarche spécifique auprès de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL) (27).

Pour la télésurveillance ou la télé-expertise notamment, les hébergeurs de données de santé sur support numérique à caractère personnel recueillies à l'occasion d'activités de prévention, de diagnostic, de soins ou de suivi social et médico-social doivent faire l'objet d'une certification auprès de la COFRAC (COmité FRançais d'ACcréditation) d'après les conditions prévues à l'article L1111-8 du code de la santé publique (28).

Un guide édité par la CNIL peut être utilisé pour s'aider à garantir la sécurité des données personnelles (29).

 LES GUIDES DE LA CNIL LA SÉCURITÉ DES DONNÉES PERSONNELLES		
SOMMAIRE	Introduction : Gérer les risques sur la vie privée	4
	FICHE N° 1 : Sensibiliser les utilisateurs	7
	FICHE N° 2 : Authentifier les utilisateurs	9
	FICHE N° 3 : Gérer les habilitations	11
	FICHE N° 4 : Tracer les accès et gérer les incidents	12
	FICHE N° 5 : Sécuriser les postes de travail	13
	FICHE N° 6 : Sécuriser l'informatique mobile	15
	FICHE N° 7 : Protéger le réseau informatique interne	16
	FICHE N° 8 : Sécuriser les serveurs	17
	FICHE N° 9 : Sécuriser les sites web	19
	FICHE N° 10 : Sauvegarder et prévoir la continuité d'activité	20
	FICHE N° 11 : Archiver de manière sécurisée	21
	FICHE N° 12 : Encadrer la maintenance et la destruction des données	22
	FICHE N° 13 : Gérer la sous-traitance	23
	FICHE N° 14 : Sécuriser les échanges avec d'autres organismes	25
	FICHE N° 15 : Protéger les locaux	26
	FICHE N° 16 : Encadrer les développements informatiques	27
	FICHE N° 17 : Chiffrer, garantir l'intégrité ou signer	28
	Évaluer le niveau de sécurité des données personnelles de votre organisme	30

Figure 19 Guide de la CNIL sur la sécurité des données personnelles. (29)

B. Matériel et logiciel

En pratique, des dizaines et des dizaines de solutions logicielles sont déjà disponibles respectant les recommandations de la CNIL et de l'HAS pour l'exercice de la télémedecine. Ils ont fait l'objet d'un recensement en 2020 : le ministère des Solidarités et de la Santé en dénombrait exactement 190 (30). Applicables plus spécifiquement en ophtalmologie, on peut citer dans cette liste par exemple : Therap-e, Eye Need, e-ophtalmo... Le principe de base est commun entre les différents logiciels ainsi le choix est vaste et à discrétion de chacun en fonction de ses besoins.

Nous présentons succinctement à titre d'exemple Therap-e développé par la société GCS Normand'e-Santé sous l'égide de l'ARS de Normandie et du Fonds Européen de développement régional, en tant que solution la plus utilisée en Basse-Normandie. Il couvre tous les usages de la télémedecine depuis sa création en 2012 (Téléexpertise, Téléconsultation, Télésurveillance, Téléassistance). Il est utilisable par tout professionnel de santé, hospitalier, salarié ou libéral. Il est accessible à la fois en format logiciel, en navigateur web et en version application pour smartphone. Ses principales fonctionnalités énumérées par l'ARS :

- Une fiche de liaison simple permettant de collecter les informations du patient
- Une fonction de transfert sécurisé de documents nécessaires à la prise en charge
- Un système de visioconférence, permettant un échange en direct entre le patient et le médecin (et l'utilisation de dispositifs médicaux, si nécessaire, en lien avec un infirmier accompagnant le patient)
- Un compte-rendu, une ordonnance et d'autres documents sont diffusables aux participants
- Une demande de paiement en ligne peut être émise vers le patient

On notera que pour le dépistage de la RD à distance avec interprétation dans les 7 jours au sein d'un même groupement d'ophtalmologue (par exemple une orthoptiste réalisant un dépistage de RD dans un cabinet secondaire), les logiciels métiers plus classiques comme Oplus ou Softalmo sont le plus souvent utilisés, permettant déjà l'accès partagé au dossier patient entre les différents lieux d'exercice.

Pour l'exercice de la télémedecine, en sus de la solution logicielle, du matériel spécifique est nécessaire. Pour la réalisation d'une téléconsultation en ophtalmologie, outre le matériel considéré comme standard (tonomètre, réfracteur...), il faudra donc s'équiper idéalement avec :

- Un rétinophotographe de qualité, grand champ ou non, fixe ou portable, mydriatique ou non
- Une lampe à fente équipée d'un module d'imagerie
- Une webcam
- Un microphone

Pour le dépistage de la RD, c'est évidemment le combo logiciel de télémedecine et appareil de rétinophotographie de qualité qui est nécessaire.

Exemple des coûts structurels (31) (32) :

- Rétinophotographe fixe, pour une meilleure qualité mais un plus fort encombrement. De la mosaïque recomposée allant jusqu'à l'ultra grand champ en une image, voici des exemples : Topcon RC-NW400, Optos Daytona ou Zeiss Clarus : à partir de 20 000€ à plus de 50 000€ pour les plus perfectionnés.

Ou

- Rétinophotographe portable non mydriatique, pour un usage plus versatile: exemple : Rétinographe Aurora avec Module Rétine seule 9.900,00 € TTC, DragonFly FC 160 de chez MediWorks 5.665,00 € TTC.
- Solution logicielle : exemple Therap-e : 10€/mois par utilisateur (ou 600€ par mois pour un CHU, 400€ pour un hôpital) pour un pack complet comprenant paiement en ligne, utilisation d'un dispositif médical connecté (e.g. rétinophotographe) et intégration du Dossier Médical Partagé.

Prise en charge

A partir du 15 septembre 2018, la téléconsultation devient accessible sur l'ensemble du territoire en France : tout médecin, quelle que soit sa spécialité, peut désormais proposer à ses patients de réaliser une consultation à distance au lieu d'une consultation en présentiel, pour toute situation médicale qu'il jugera adaptée.

A. Cotation et remboursement

Téléconsultation

Par décret et signature d'une nouvelle convention médicale, depuis 2018, l'assurance maladie rembourse les téléconsultations sur la même base qu'une consultation en face à face, soit entre 23 € et 58,50 € selon la spécialité et le secteur d'exercice du médecin (secteur 1, secteur 2) (33) (34).

Comme pour toute consultation, le tiers payant est appliqué, dans son intégralité pour les patients en affection de longue durée, les femmes enceintes, et les patients bénéficiaires de la Complémentaire santé solidaire (ex CMU-C) ou de l'aide à l'acquisition d'une complémentaire santé (ACS).

Deux actes de téléconsultation, codés « TCG » et « TC », ont été créés à la nomenclature générale des actes professionnels (NGAP). Le TCG ne concerne que les téléconsultations pour médecins généralistes en secteur 1 ou en secteur 2 avec OPTAM (Option Pratique Tarifaire Maîtrisée) ou respect des tarifs opposables.

Pour l'ophtalmologie, on utilisera donc le code TC. La base du remboursement par l'assurance maladie se fait comme suit : (35)

	Médecin S1 ou S2 OPTAM/OPTAM-CO ou S2 sans OPTAM/OPTAM- CO si respect des tarifs opposables	Médecin S2 sans OPTAM/OPTAM-CO (si non application des tarifs opposables)
Téléconsultation du médecin correspondant avec retour au médecin traitant	TC (23 €) + MPC (2 €) + MCS (5 €) = 30 €	TC = 23 €
Téléconsultation du médecin traitant	TC (23 €) + MPC (2 €) = 25 €	TC = 23 €

Figure 20 Cotation de l'acte TC pour un médecin spécialiste (35)

On notera donc que les majorations habituelles de type MPC (majoration médecin spécialiste) ou MCS (majoration de coordination) sont possibles et s'appliquent de la même façon qu'avec une CS (consultation). De même, il est possible de joindre les cotations F et CRD (jour férié ou dimanche) ou encore CRN et CRM (majoration de nuit) au code TC.

Quelques remarques pertinentes concernant la téléconsultation sont rappelées par l'assurance maladie :

A noter

- Sont exclus du champ du recours aux actes de téléconsultation :
 - les consultations complexes ou très complexes car elles ne peuvent se faire sans un examen physique direct du patient,
 - l'avis ponctuel de consultant,
 - la consultation spécifique au cabinet par un médecin spécialiste en pathologie cardiovasculaire ou en cardiologie et médecine des affections vasculaires qui implique l'examen du patient en présentiel.
- Comme une consultation, les médecins libéraux ont la possibilité de facturer un dépassement d'honoraires dans les conditions habituelles (secteur 2, etc.).
- Le médecin qui accompagne, le cas échéant, le patient lors d'une téléconsultation réalisée par un autre médecin, peut facturer une consultation dans les conditions habituelles, parallèlement à la facturation de la téléconsultation par le médecin téléconsultant.
- Pour les établissements de santé, la téléconsultation suit les mêmes règles que les autres consultations facturables en établissement, en particulier seules les majorations définies dans le cadre de l'Arrêté du 27 avril 2017, relatif aux majorations applicables aux tarifs des actes et consultations externes des établissements de santé publics et des établissements de santé privés, sont applicables.

Figure 21 Remarques concernant l'exercice d'une téléconsultation, formulées par l'assurance maladie (35)

Tout comme le mode de remboursement, le mode de règlement est le même qu'une consultation classique : chèque, paiement en ligne par carte bleue, virement bancaire. Seul le paiement en espèce n'est pas possible.

Dans l'incapacité de pouvoir utiliser le support « physique » carte vitale, le professionnel de santé retrouve dans la base de données de l'assurance maladie (grâce à l'outil ADRi (Acquisition des DRoits intégrée)) la situation médico-administrative du patient et déclenche ainsi la facturation avec le logiciel SeSAM-vital. Les informations retournées par ADRi sont exploitées automatiquement par le logiciel métier pour constituer la Feuille de Soins Electronique (36). Il est toujours possible de réaliser et d'envoyer une feuille de soins papier en cas de dysfonctionnement.

Télé-expertise

Pour les actes de la télé-expertise, un médecin va solliciter l'avis d'un confrère. Il est à noter que le médecin requis n'est pas obligé de connaître auparavant le patient. Un logiciel de discussion et de partage de données sécurisées identiques à la téléconsultation doit être employé sans que la vidéotransmission lors de la discussion ne soit obligatoire, ni la réponse en temps réel.

Deux actes ont été créés à la NGAP depuis février 2019 (37):

- L'acte codé « TE1 » pour les téléexpertises de niveau 1, question circonscrite qui ne nécessite pas de réaliser une étude approfondie de la situation médicale du patient. Par exemple : l'interprétation d'une photographie de tympan, ou de pathologie amygdalienne, la lecture d'une rétinographie, l'étude d'une spirométrie, la lecture de photos pour une lésion cutanée, pour le suivi d'une plaie chronique d'évolution favorable, etc.
On retiendra par exemple en ophtalmologie l'aide à la lecture d'un examen complémentaire (une rétinophotographie, un OCT, ...)
- L'acte codé « TE2 » pour les téléexpertises de niveau 2. Ce doit être un avis en réponse à une situation médicale complexe après étude approfondie du dossier. Par exemple : de la surveillance en cancérologie dans le cadre de la suspicion d'une évolution, du suivi d'une plaie chronique en état d'aggravation, du suivi d'évolution complexe de maladie inflammatoire chronique, de l'adaptation d'un traitement antiépileptique, d'un bilan pré-chimiothérapie, lors de son initiation. On pourrait imaginer pour l'ophtalmologie l'adaptation d'un traitement d'uvéite chronique, en fonction de plusieurs examens complémentaires.

Pour le médecin requis, il s'agit d'une rémunération à l'acte :

TE 1 : 12€ dans la limite de 4 actes pour un même patient, par an et par médecin.

TE 2 : 20 € dans la limite de 2 actes pour un même patient par an et par médecin.

Pour le médecin requérant :

Forfait annuel : 5 € par télé expertise de niveau 1 et 10 € par télé expertise de niveau 2 demandée, dans la limite de 500 € par an. Le calcul sera réalisé automatiquement par l'Assurance Maladie : aucun acte n'aura besoin d'être facturé par le médecin requérant.

La télé expertise fait l'objet d'une facturation directe entre l'Assurance Maladie et les médecins libéraux, donc transparente pour le patient.

Télésurveillance

On retrouve des actes de télésurveillance pour les ophtalmologues, mais ils ne sont pas classés dans le NGAP mais dans la CCAM (Classification Commune des Actes Médicaux). Depuis 2005, un seul acte est paru en ophtalmologie pour le dépistage de la rétinopathie diabétique :

BGQP140 : Lecture différée d'une rétinographie en couleur, sans la présence du patient.

C'est le premier acte de télémedecine dans la nomenclature, toutes spécialités confondues. L'acte est rémunéré à hauteur de 12€ pour l'ophtalmologiste, sous réserve du respect des conditions d'exécution émises par l'HAS : (13)

(i) Utilisation facultative d'un mydriatique (tropicamide à 0,5 %, 2 mg/0,4 ml) :

- sans danger dans la majorité des cas ;
- contre-indiquée en cas d'antécédents de chirurgie de la cataracte avec implant irien (en général posé avant 1978), en cas d'allergie au tropicamide et en cas de chirurgie oculaire datant de moins de 2 semaines ;
- peut être réalisée par du personnel formé à cet effet, notamment infirmier et orthoptiste.

(ii) Photographie :

- 2 clichés numériques de chaque œil sont nécessaires : l'un centré sur la macula, l'autre sur la papille ;
- les photographies doivent être prises par du personnel formé à cet effet, notamment infirmier et orthoptiste ;
- des procédures d'assurance qualité doivent être mises en place pour contrôler le pourcentage de photographies non interprétables ;
- la compression des images ne doit pas excéder un niveau de compression de 20 : 1 JPEG ;
- la résolution des images numériques doit être d'au moins 2 millions de pixels ;
- il est préférable d'utiliser une télétransmission sécurisée des clichés.

(iii) Lecture des clichés :

- les photographies (images numériques) doivent être lues par des ophtalmologistes, dans un délai d'une semaine maximum ;
- des procédures de double lecture d'assurance qualité doivent être mises en place pour contrôler la lecture ;
- les lecteurs doivent lire les photographies d'au moins 500 patients par an ;
- un écran d'au moins 19 pouces doit être utilisé pour la lecture des images.

(iv) Délai d'envoi des patients à l'ophtalmologiste :

- inférieur à 2 mois, pour les patients ayant une rétinopathie diabétique non proliférante modérée ou sévère ou une maculopathie ;
- inférieur à 2 semaines, pour une rétinopathie diabétique proliférante.

Figure 22 Rappel des conditions d'exécution et exigences de qualité et de sécurité définies en cas de lecture différée de photographies du fond d'œil d'après l'HAS

A ceci s'ajoute le tarif NGAP de l'orthoptiste ayant réalisé les clichés dans le cadre du dépistage de la rétinopathie diabétique par rétinographie en couleur à distance :

- AMY 6.7 : 17,42 € en cas de télétransmission des photos.
- AMY 6.1 : 15,86 € en cas de transmission par tout autre moyen (voie postale, remise en main propre, etc...)

Ceci s'applique sous réserve (38) :

- d'une formation spécifique reçue par l'orthoptiste
- de la réalisation de 2 clichés numériques de chaque œil : l'un centré sur la macula, l'autre sur la papille
- de la transmission dans un délai maximum de 48 heures des rétinographies au médecin lecteur, transmission accompagnée des données administratives d'identification du patient et du prescripteur et éventuellement des informations complémentaires communiquées par le prescripteur.

La profession d'infirmière peut également contribuer à la prise en charge d'un patient en télémédecine en accompagnant le patient lors d'une téléconsultation, voire en réalisant des examens complémentaires (rétinophotographie par exemple). Une nouvelle cotation est prévue pour cet usage dans leur propre NGAP :

TLS : Accompagnement téléconsultation réalisée lors d'un soin prévu	10,00 €
TLL : Accompagnement téléconsultation réalisé de manière spécifique dans un lieu dédié aux téléconsultations	12,00 €
TLD : Accompagnement téléconsultation réalisé de manière spécifique à domicile (pas au décours d'un soin prévu)	15,00 €

Figure 23 Tarif applicable aux infirmiers libéraux en télémédecine (39)

Télésoins

Récemment la télémédecine a été englobée dans une entité plus large, la télésanté. Cette dernière regroupe donc la télémédecine comme définie plus tôt ainsi que les télésoins.

Les télésoins sont les activités réalisées à distance par un professionnel paramédical ou par un pharmacien. Il sont encadrés par la loi depuis juin 2021 (40). 18 professions sont autorisées à pratiquer le télésoin :

• Audioprothésistes • Diététiciens • Épithésistes • Ergothérapeutes • Infirmiers • Manipulateurs d'électroradiologie médicale • Masseurs-kinésithérapeutes • Ocularistes • Opticiens-lunetiers	• Orthopédistes-orthésistes • Orthophonistes • Orthoprothésistes • Orthoptistes • Pédicures-podologues • Pharmaciens • Podo-orthésistes • Psychomotriciens • Techniciens de laboratoire médical
--	---

On retrouve donc dans les métiers de la santé visuelle les opticiens et les orthoptistes.

Il est à noter cependant que la réfraction n'est pour l'heure pas autorisée à être pratiquée par télésoin par ces professions. L'entrée en vigueur de la loi étant relativement récente, nous n'avons que peu de recul sur l'utilisation qui sera faite des télésoins. Nul doute que des applications pratiques verront le jour dans les prochains mois, comme des séances de rééducation par exemple.

B. Aide à l'investissement pour le praticien

S'équiper en nouveau matériel et mettre à jour l'ancien pour permettre l'exercice de la télémedecine représente un coût. Certaines aides existent.

Aide de la sécurité sociale

La convention médicale signée avec la sécurité sociale permet par le biais du 'forfait structure' une rémunération supplémentaire aux praticiens qui investissent dans la mise en place d'outils et d'organisations nouvelles notamment en télémedecine depuis 2019. Tous les médecins libéraux exerçant dans le champ conventionnel sont éligibles à cette rémunération forfaitaire, sans distinction de secteur d'exercice. (41)

Le volet 1 est constitué de 5 indicateurs, qui doivent être tous atteints pour bénéficier de la rémunération correspondante. Pour accéder à la rémunération liée aux indicateurs du second volet du forfait, le volet 1 doit être complet. On remarque que l'indicateur 2 valorise l'utilisation de messagerie sécurisée permettant l'exercice de télé expertise par exemple.

Champs	Indicateurs	Nombre de points en 2020	Equivalent en €	Type d'indicateur	Justificatif
Volet 1 PRE-REQUIS (tous ces indicateurs doivent être atteints pour permettre une rémunération et déclencher celle du volet 2)	Indicateur 1 : Disposer d'un logiciel métier avec LAP certifié par la HAS, compatible DMP	280	1960 €	Déclaratif avec pré-alimentation	Facture/ attestation de l'éditeur
	Indicateur 2 : Utiliser une messagerie sécurisée de santé			Déclaratif avec pré-alimentation	Pré-alimentation ou attestation sur l'honneur
	Indicateur 3 : Disposer d'une Version du cahier des charges SESAM - Vitale intégrant les avenants publiés sur le site du GIE SESAM-Vitale au 31/12 de l'année N-1 par rapport à l'année de référence pour le calcul de la rémunération			Automatisé	Pas de justificatif demandé
	Indicateur 4 : Taux de télétransmission supérieur ou égal à 2/3 de l'ensemble des feuilles de soins émises			Automatisé	Pas de justificatif demandé
	Indicateur 5 : Affichage sur le site Annuaire Santé des horaires d'ouverture du cabinet			Déclaratif avec pré-alimentation	Pas de justificatif demandé
TOTAL		280 points	1960 €		

Figure 24 Forfait Structure CNAM 2020 Volet 1

Le volet 2 est constitué d'indicateurs optionnels et indépendants les uns des autres.

On remarque que les indicateurs 6 et 7 valorisent l'équipement en vidéotransmission et en équipement médicaux connectés pour l'exercice de téléconsultation par exemple.

Champs	Indicateurs	Nombre de points en 2020	Equivalent en €	Type d'indicateur	Justificatifs
Volet 2 (rémunération uniquement si les indicateurs du volet 1 sont atteints ; chaque indicateur du volet 2 est indépendant des autres)	Indicateur 1 : Dématérialisation des téléservices	90	630€	Automatisé	
	Indicateur 2 : Capacité à coder les données médicales	50	350€	Déclaratif	Attestation sur l'honneur
	Indicateur 3 : Implication dans les démarches de prise en charge coordonnées de patients	120	840€	Déclaratif	Attestation sur l'honneur
	Indicateur 4 : Amélioration du service offert aux patients	70	490€	Déclaratif	Attestation sur l'honneur
	Indicateur 5 : Valorisation de la fonction de maître de stage	50	350€	Déclaratif	Attestation sur l'honneur
	Indicateur 6 : valoriser le recours à la télémedecine – aide à l'équipement pour vidéotransmission sécurisée.	50	350€	Déclaratif	Attestation sur l'honneur
	Indicateur 7 : valoriser le recours à la télémedecine – aide à l'équipement en équipements médicaux connectés	25	175€	Déclaratif	Attestation sur l'honneur
	Indicateur 8 (nouveau) : valoriser la prise en charge des soins non programmés dans le cadre d'une organisation territoriale régulée	150	1050 €	Déclaratif	Attestation sur l'honneur
TOTAL		605 points	4 235€		

Figure 25 Forfait Structure CNAM 2020 Volet 2

Les équipements médicaux reconnus par l'assurance maladie dans le cadre de l'indicateur 7 sont nombreux à ce jour mais un seul concerne l'ophtalmologie :

- Outils de tests visuels. Par exemple un auto refractomètre portable. Les 175 € semblent assez faibles comparés au tarif d'un tel équipement (3600 à 7000€)(42)

Pour mémoire les autres sont :

- Oxymètre connecté - Stéthoscope connecté - Dermatoscope connecté - Otoscope connecté - Glucomètre connecté - ECG connecté - Sonde doppler connectée - Echographe connecté - Mesure pression artérielle connectée - Caméra (utile pour regarder l'état de la peau par exemple) connectée audiogramme connectés - Matériel d'exploration fonctionnelle respiratoire dont le spiromètre et le tympanomètre connectés.

Aide de l'Etat

L'état subventionne tous les EHPAD (établissements d'hébergement pour personnes âgées dépendantes) et toutes les zones sous-denses depuis quelques années afin qu'ils s'équipent d'un matériel permettant la téléconsultation afin d'éviter les hospitalisations inutiles et améliorer la qualité du suivi des patients résidents. Il est prévu 28 000 euros par établissement sanitaire ou médico-social ou structure d'exercice coordonné pour l'accompagnement, la mise à disposition de locaux et l'investissement nécessaire à la télémédecine (43). Les crédits du Fonds d'Intervention Régional (FIR) destinés au développement de la télémédecine ont été doublés dès 2018 pour passer à 18 millions d'euros.

Imaginer un bilan ophtalmologique pour dépister une RD par rétinophotographies faites sur place en EHPAD par le personnel et télé-adressé à un ophtalmologue pour interprétation est déjà d'actualité. Depuis mars 2020, la plateforme e-ophtalmo basée à Lyon propose par exemple ce service, en faisant réaliser par une orthoptiste les rétinophotographies qu'elle envoie aux ophtalmologues membres du réseau pour interprétation et prise en charge le cas échéant. Un bilan plus complet est aussi proposé, avec réfraction acuité visuelle, et prise de tension oculaire (44).

Aide régionale

D'autres subventions sont possibles au niveau régional. Sans recenser tous les cas spécifiques de chaque région française, nous pouvons citer par exemple l'Agence Régionale de Santé (ARS) de Normandie. Elle a initié une mise à disposition gratuite, pendant les 12 premiers mois, de la plateforme régionale de télémédecine therap-e depuis Mars 2020, au vu du contexte sanitaire lié au Covid-19, afin d'en promouvoir son usage (45).

Avantages

A. Avantages pour le patient

La télémédecine permet d'améliorer l'accès aux soins ophtalmologiques en abolissant les distances, et en permettant un suivi même en cas d'absence d'ophtalmologue proche du domicile comme dans les déserts médicaux. Elle peut éviter ainsi les renoncements aux soins (46).

Le patient gagne du temps par ce biais, il n'a pas d'attente sur place dans le cabinet d'ophtalmologue et il n'a pas le temps de déplacement pour se rendre au cabinet du médecin (47). La lecture différée dans les 7 jours du dépistage lui permet de partir dès que les photographies sont réalisées dans le cadre du dépistage de la RD.

La télémédecine peut permettre une prise en charge plus en amont dans l'histoire naturelle de la pathologie. Il est reconnu que plus la RD est prise en charge tôt, plus la vision est conservée à long terme. Le risque de cécité causée par la RD est diminué par un dépistage précoce, dont la télémédecine est un acteur intéressant (47).

B. Avantages pour le praticien

En permettant de désengorger sa salle d'attente par exemple des simples dépistages de rétinopathies diabétiques, les ophtalmologues pourront réduire encore les délais d'attente pour un rendez-vous. Ils pourront se dégager du temps médical pour se consacrer à la pathologie et également aux urgences. En montrant leur capacité à réduire les délais, les ophtalmologues ne se verront pas délester de certaines prérogatives par d'autres professions par leur manque de disponibilité (prescription de correction optique par exemple).

Dans une moindre mesure, en augmentant le nombre de patients dépistés, ils pourraient accroître leur chiffre d'affaire tout en remplissant leur mission de préserver la santé visuelle française.

C. Avantages pour la société

Désert médical

En garantissant un accès au soin plus facile à la population victime du désert médical, la télémédecine est un outil intéressant pour résoudre cette problématique. Comme le remarque un rapport du Sénat, les inégalités territoriales d'accès aux soins portent une atteinte particulière au pacte républicain, qui repose sur la solidarité nationale pour le financement de notre modèle social, et empêchent aujourd'hui de garantir à tous les Français un accès équitable à des soins de qualité, dans les mêmes conditions et délais. (48)

On rappellera de plus que l'égalité d'accès aux soins est, avec la qualité des soins et la solidarité, l'un des 3 principes fondateurs de l'Assurance Maladie depuis 1945 (49).

Transport Sanitaire

L'essor de la télémédecine pourrait entraîner une baisse des coûts du remboursement des transports sanitaires en permettant une consultation ou un dépistage à distance. La consommation en transport sanitaire est en constante augmentation ces dernières années. En 2018, il représente une dépense de santé de plus de 5 milliards d'euros. Le nombre élevé d'usagers présentant une affection de longue durée (ALD) pris en charge à 100%, comme le diabète, explique en grande partie ces chiffres. Les taxis, utilisés majoritairement pour se rendre en consultation hors contexte d'urgence, représentent 41% de cette dépense.(50)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Consommation totale (en millions €)	3 572	3 749	3 852	4 074	4 288	4 413	4 604	4 806	4 987	5 117
Valeur	6,0	4,9	2,8	5,8	5,3	2,9	4,3	4,4	3,8	2,6
Évolution (en %) Prix	3,2	0,8	0,7	1,5	1,9	1,4	1,3	0,1	0,2	0,7
Volume	2,7	4,1	2,1	4,2	3,3	1,5	3,0	4,3	3,5	1,9

Sources > DREES, comptes de la santé ; Insee pour l'indice des prix à la consommation.

Figure 26 Evolution de la consommation de transports sanitaires en France

Au total, bien que la mise en place de la télémedecine soit assez recente, des premieres études ont tenté d'estimer le coût-efficacité de celle-ci. Par exemple à Singapour, une étude a évalué le coût-efficacité du dépistage de la rétinopathie diabétique par rétinophotographies à distance comparativement à la stratégie classique du dépistage chez l'ophtalmologue. Avec un modèle de Markov, il en ressort une économie d'environ 173 dollars par patient diabétique sur son existence entière avec la nouvelle stratégie utilisant la télémedecine. En multipliant ce nombre par la population diabétique, des millions peuvent être économisés (170 000 patients diabétiques à Singapour, soit une économie potentielle de 29.3Millions de dollars) (51).

Pour corroborer ces résultats dans la RD, on peut citer une méta analyse canadienne portant sur l'évaluation des consultations de télémedecine dans le glaucome cette fois ci. Ils retrouvent des résultats similaires avec une économie potentielle de 175.9 dollars par patient, tout en réduisant la durée de la consultation pour le praticien (52).

Protocoles actuels

A. Généraux

Sur le terrain plusieurs protocoles utilisant la télémédecine ont vu le jour en ophtalmologie et sont aujourd'hui utilisés en pratique courante.

RNO et RNM (ou protocole Muraine)

Le protocole RNO (**Re**Nouvellement correction **O**ptique) a été promulgué en 2018 après plusieurs années d'expérimentation (53). Il se définit comme la « réalisation d'un bilan visuel par l'orthoptiste dans le cadre du renouvellement/adaptation des corrections optiques chez un patient de 6 à 50 ans »

- Il permet un bilan visuel effectué par une orthoptiste en l'absence de l'ophtalmologiste, mais dans un lieu d'exercice unique
- Le bilan réalisé par l'orthoptiste inclut au moins l'interrogatoire, la détermination de l'acuité visuelle et de la réfraction, la recherche de déséquilibre oculomoteur, la mesure du tonus oculaire avec un tonomètre à air (au-delà de 16 ans), la prise de rétinophotographie
- Les examens doivent être lus par l'ophtalmologue dans les 8 jours
- Le patient doit être connu de l'ophtalmologue (ou un de ses associés)

Sont exclus les patients :

- présentant des signes d'affection aiguës de l'œil
- dont la dernière consultation avec l'ophtalmologue ou un de ses associés remonte à plus de cinq ans
- porteurs d'une pathologie chronique connue et suivie
- dont les traitements ou pathologies générales nécessitent un suivi ophtalmologique régulier ;
- adressés par un autre médecin

Le code de cotation est RNO, elle est de 28€, et les dépassements d'honoraires sont interdits.

Le protocole RNM (issu de **R**étinographe **N**on **M**ydriatique) ou protocole expérimental Muraine, et le pendant télémedecine du protocole RNO. Il est actuellement toujours en expérimentation et son utilisation dérogatoire doit être déclaré en ARS. Son financement dérogatoire a été reconduit récemment en Mars 2021, avant sa possible entrée au droit commun dans le futur (54) (55).

Ses principales différences avec le RNM sont donc :

- La possibilité pour l'orthoptiste de réaliser le bilan à distance et de le télétransmettre
- La possibilité pour l'orthoptiste de recevoir des patients inconnus de l'ophtalmologue
- Le code de cotation est RNM, elle est de 28€, et les dépassements d'honoraires sont interdits. Au moins 60% de la rémunération doit revenir à l'orthoptiste.

En sus, le protocole RNM propose des seuils de rémunération bonus en fin d'année en fonction d'un seuil d'activité, à se partager entre l'ophtalmologue et l'orthoptiste (toujours soumis au principe d'une rémunération minimale de l'orthoptiste de 60%) (56) :

1000€ à partir de 500 actes, 2500€ à partir de 1000 actes, 5000€ à partir de 2000 actes et 7500€ au-delà de 3000 actes.

Soit environ 2 € supplémentaire par acte, débloqué sous réserve de remplir 3 conditions supplémentaires :

- Taux d'obtention de RDV dans le mois supérieur à 80% (sondage)
- Taux d'ordonnance sous 8 jours supérieur 95% (déclaratif)
- Taux de re-convocation inférieur à 5% (déclaratif)

Dépistage ROP en télé médecine

Le dépistage de la rétinopathie des prématurés par télé expertise est pratiquée dans de nombreuses régions françaises. Par exemple en Normandie, notre service d'ophtalmologie du CHU de Caen dirigé par le Pr Quintyn interprète sous la coordination du Dr Anne-Laure Lux les rétinophotographies des services de pédiatrie du Groupement Hospitalier du Havre et du Centre Hospitalier Public du Cotentin à Cherbourg (57). Ces services sont en effet équipés d'une Panocam, une caméra à fibres optiques portable qui permet la réalisation d'une image numérique de la rétine en l'absence d'un ophtalmologue. Ces clichés sont réalisés par les pédiatres ou infirmières du service respectif et télétransmis à l'aide de la plateforme Therap-e, pour y être interprétés à distance. En cas de nécessité, une consultation physique est alors organisée (57).

Téléconsultation

Même si les protocoles organisationnels restent majoritaires dans notre profession, des initiatives de téléconsultation germent :

- Un camion de téléconsultation, équipé de vidéotransmission, d'une salle d'attente, et d'un box de consultation se déplace au sud de l'Ile-de-France depuis 2018. Les patients sont accueillis par une orthoptiste qui assiste l'ophtalmologue pour réaliser les examens, tandis que Dr Haddad, en liaison vidéo, et installé dans son cabinet des Hauts-de-Seine, les interprète (58).

La cotation se fait en secteur 1 donc sans dépassement d'honoraire

- Le Point Vision de Lille expérimente une téléconsultation par visio-conférence dans ce même principe mais dans un cabinet fixe (59).
- Des plateformes Doctolib ou Qare proposent dans leur annuaire des ophtalmologues organisés et équipés pour pratiquer des téléconsultations. Mais leur nombre reste faible, tout comme leur disponibilité. Si l'ophtalmologue réalise une téléconsultation par simple vidéo, son exercice clinique est limité, mais peut permettre de réaliser un premier tri du seuil d'urgence.

Qare [Connexion](#)

Spécialité
Médecin Ophtalmologue

Localisation
Toute la France

Consulter un praticien de votre département vous garantit une meilleure prise en charge des frais de téléconsultation.

Tarification
☐ Sans dépassement d'honoraires
☐ Applique le tiers-payant

52 résultats pour **Médecin Ophtalmologue** | Toute la France

Dr Julien GOZLAN
Médecin Ophtalmologue

Tarif: 40€ à 50€ • Secteur 2
Lieu d'exercice: Paris (75)

Mer. 18/08: 23:00, 23:10, 23:20, 23:30
Jeu. 19/08: 22:50, 23:00, 23:10, 23:20

[Voir l'agenda complet](#)

Dr Nabil MESSAOUDI
Médecin Ophtalmologue

Tarif: 30€ • Secteur 2
Lieu d'exercice: Point Vision, Yvelines (78)

Aucune disponibilité à venir

Dr Souhir ZAAFOURI
Médecin Ophtalmologue

Tarif: 30€ • Secteur 1
Lieu d'exercice: Aisne (02)

Aucune disponibilité à venir

Figure 27 Plateforme Qare : un ophtalmologue possède des créneaux disponibles, sur les 52 recensés sur la plateforme proposant une téléconsultation.

Doctolib Vous êtes professionnel de santé ? [Besoin d'aide ?](#) [Se connecter](#) [Gérer mes RDV](#)

Dr Sos Oeil Téléconsultations
Ophtalmologue

[L'essentiel](#) [Carte](#) [Présentation](#) [Horaires](#) [Tarifs](#)

Dr Sos Oeil Téléconsultations vous propose la consultation vidéo [En savoir plus](#)

- Obtenez un rendez-vous plus rapidement
- Consultez votre praticien de chez vous
- Échangez des documents en toute sécurité

Tarifs et remboursements
Conventionné secteur 2
Carte Vitale acceptée
Tiers payant : Sécurité sociale
[Voir les tarifs](#)

Moyens de paiement
Chèques, espèces et cartes bancaires

Expertises et actes
 Chirurgie de la cataracte Chirurgie de la réfraction Chirurgie des paupières Glaucome
 OCT Lentilles de contact Angiographie Chirurgie ophtalmologique
[Voir plus](#)

Les téléconsultations proposées par SOS Oeil permettent dans le cadre de l'urgence uniquement de proposer un traitement si cela est possible à distance. Dans le cas contraire vous serez orienté vers un ophtalmologiste. Plus d'info ci dessous.

Prenez votre rendez-vous en ligne
Renseignez les informations suivantes

Type de consultation
☐ Au cabinet*
 *actuellement indisponible
☒ En vidéo

Catégorie de motif
Consultation vidéo

Motif de consultation
Choisissez un motif

dim. 15 août lun. 16 août mar. 17 août mer. 18 août

Figure 28 Doctolib : Proposition d'une consultation avec usage seule de la vidéo, limitant l'exercice médical mais permettant un tri dans le seuil d'urgence à réaliser une consultation physique.

B. Spécifiques au diabète

Protocole organisationnel du dépistage de la rétinopathie diabétique en Télémédecine

Sur prescription médicale et dans le cadre d'un protocole organisationnel, un orthoptiste peut réaliser le dépistage de la rétinopathie diabétique à distance et télétransmettre des rétinophotographies à un ophtalmologue qui aura 10 jours pour l'interpréter et la facturer. Un compte-rendu est adressé aux patients et aux médecins traitants. Si nécessaire, une consultation complémentaire est programmée. Le protocole est accessible en annexe 1.

La cotation déjà citée plus haut comprend pour l'orthoptiste :

- AMY 6.7 : 17,42 € en cas de télétransmission des photos.
- AMY 6.1 : 15,86 € en cas de transmission par tout autre moyen (voie postale, reprise en main propre, etc...).

En cas mesure de l'acuité visuelle et de la réfraction, l'orthoptiste peut coder en sus :

- AMY 8.5 : 22,1 €. Mais ceci ne doit pas être systématique et correspondre à une nécessité. Ceci entraîne la division par 2 du premier Code AMY 6.1 ou 6.7.

L'ophtalmologue pourra coder de son côté :

- BGQP140 : lecture différée d'une rétinographie en couleur, sans la présence du patient, pour 12 €. Aucun dépassement d'honoraires n'est possible.

Le Syndicat National des Ophtalmologues (SNOF) rappelle les situations où le protocole ne s'applique pas :

- Refus du patient d'intégrer le protocole
- Œil rouge et/ou douloureux
- Baisse d'acuité visuelle profonde, brutale et récente
- Rétinopathie diabétique à un stade modéré ou avancé

- Pathologie oculaire suivie ou connue
- Traitement ou pathologie générale nécessitant un suivi ophtalmologique

L'ophtalmologiste reste maître de sa décision de proposer ou non l'inclusion dans le protocole en fonction de la connaissance qu'il a du patient.

La mise en place d'un tel protocole est toujours soumise à une déclaration auprès de l'ARS, en attendant son intégration au droit commun. A noter qu'une infirmière est autorisée à réaliser le dépistage d'après la dernière mise à jour de la loi de Mars 2021 encadrant ce protocole (60).

Dans cette même loi, il existe 3 actes dérogatoires autorisés. Ainsi on retiendra qu'un orthoptiste peut dilater un patient sans prescription médicale voire même réaliser le dépistage sans prescription médicale.

ITEMS	ELEMENTS DE REPONSE
Actes dérogatoires	-Interrogatoire (pour l'orthoptiste) - Prise de rétinographies avec un rétinographe non mydriatique (RNM) sans instillation de collyre mydriatique, sans que cet examen ait fait l'objet d'une prescription médicale tel que stipulé dans l'article R. 4342-5 du CSP - Prise de rétinographies avec un RNM après instillation de collyre mydriatique, en l'absence d'un médecin en mesure d'en contrôler l'exécution et d'intervenir immédiatement tel que stipulé dans l'article R. 4342-6 du CSP

Figure 29 Actes dérogatoire lors de l'utilisation du protocole organisationnel du dépistage de la RD (60)

Le réseau de télémedecine OphDiaT (Ophtalmologie DIAbète Télémédecine) a été mis en place par l'AP-HP (Assistance Publique des Hôpitaux de Paris) en 2004. C'est un réseau de télémedecine pour le dépistage de la rétinopathie diabétique, par photographies numériques du fond d'œil. Le Pr Pascale Massin en est le responsable. A ce jour il existe 46 centres.

Localisation des sites en Ile De France

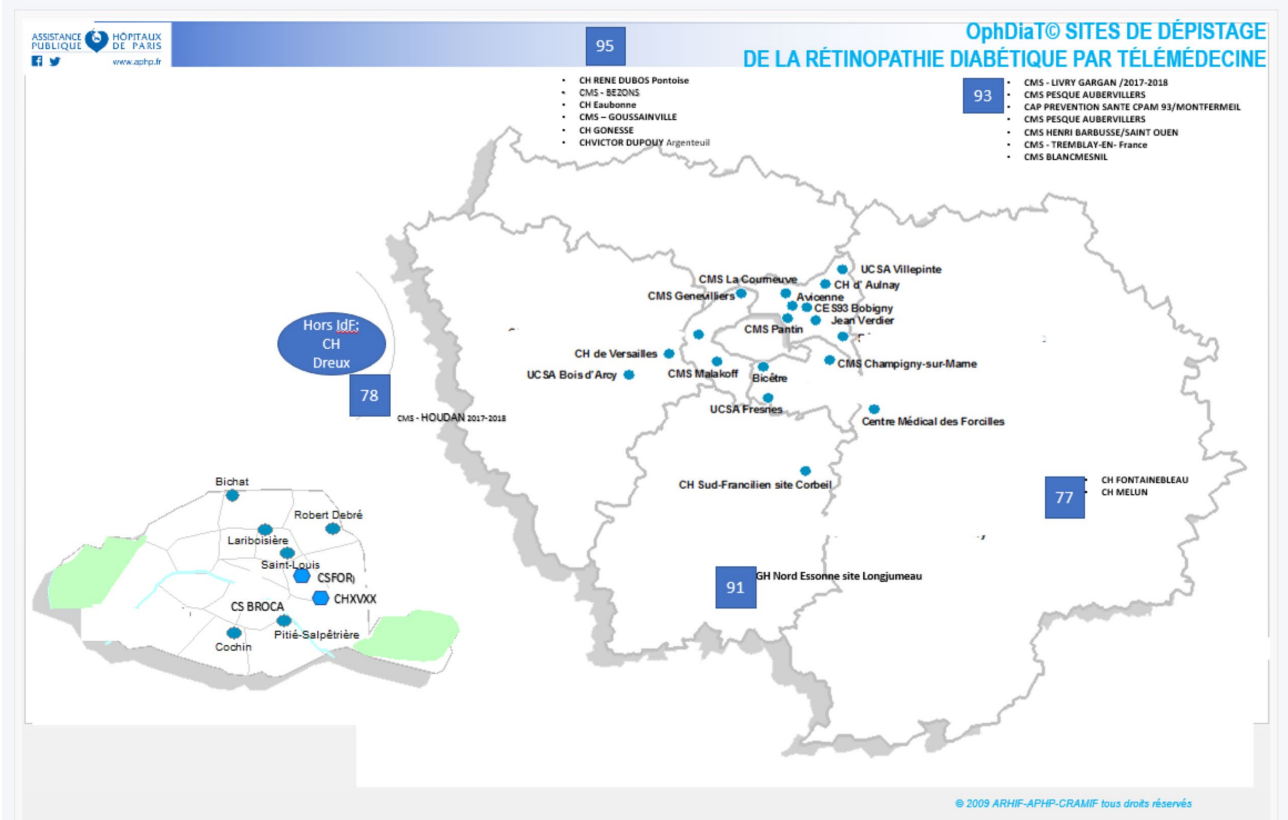


Figure 30 Carte représentant les sites de dépistage du réseau OphDiaT en Ile de France, issue de leur site internet (61)

Leur site internet nous présente leur organisation : (61)

Ce réseau est constitué de sites de dépistage, d'un serveur et d'un centre de lecture. Le réseau a obtenu l'avis positif de la CNIL en 2004, date à laquelle la télémedecine n'était pas encore totalement définie par la loi française. Le professionnel paramédical du site de dépistage, constitue le dossier administratif et médical du patient et le transmet vers le serveur. Il recueille le type de diabète, sa durée d'évolution, son traitement et l'HbA1c.

Une orthoptiste ou une infirmière réalise les rétinophotographies, les joint au dossier, puis télétransmet l'ensemble vers le centre de lecture OphDiaT. Les rétinophotographies utilisées sont des appareils non mydriatiques avec camera 45° (Canon CR-DGI/ Topcon TRC-NW6). Deux photographies par œil sont réalisées, une centrée sur le nerf optique et une sur la macula.

Les photographies sont lues par un ophtalmologue, dans les 48 heures (pour 97% des rétinophotographies de 2018), le compte rendu est signé et est rendu disponible sur le serveur ou il sera récupéré par le site de dépistage. 5% sont tirés au sort pour une double lecture en aveugle et la concordance est évaluée pour assurer une qualité lecture.

Le compte rendu est ensuite envoyé par le site de dépistage au médecin prescripteur.

Sur le serveur : les dossiers et les comptes-rendus sont accessibles durant 5 ans pour les personnes autorisées. Au-delà de 5 ans les dossiers sont archivés et accessibles en s'adressant à la coordination de OphDiaT.

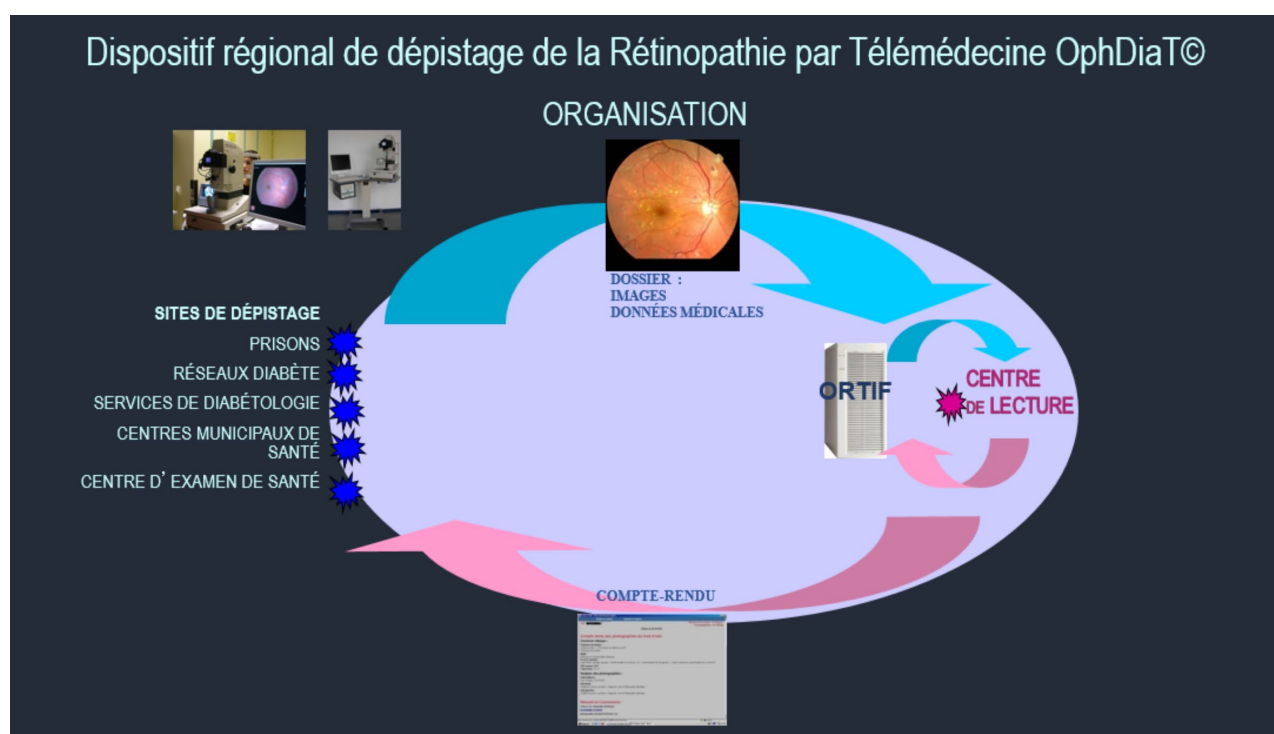


Figure 31 Reproduction du schéma d'organisation du réseau OphDiaT 1/2

L'ORTIF signifie Outil Régional de Télémédecine d'Île-de-France. C'est la plateforme utilisée par l'APHP pour la pratique de la télémédecine.

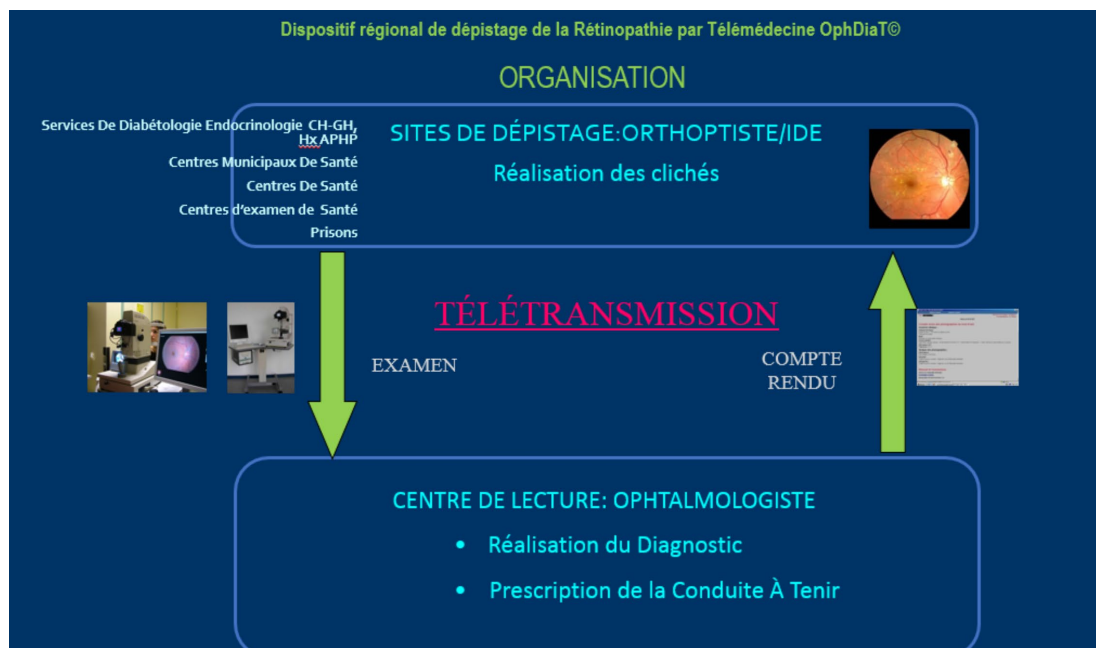


Figure 32 Reproduction du schéma d'organisation du réseau OphDiaT 2/2 On note la diversité des sites (prison, centre de santé...)

De juin 2004 à septembre 2017, le réseau a effectué 164 634 examens. Leur dernière étude sur leur expérience de plus de 10 ans de dépistage a été publiée en 2020 et plusieurs résultats méritent d'être cités : (52)

- L'incidence cumulée sur 10 ans d'une RD devant être adressée à un ophtalmologue est de 19.10% pour le diabète de type 1 et de 17.03% pour le diabète de type 2.

- Leur travail leur a permis de proposer récemment une modification des délais de surveillance de la RD. Il serait envisageable de réaliser un contrôle tous les 3 ans pour les diabétiques de type 2 indemnes de RD au premier examen. Voir tous les 4 ans en l'absence de traitement par insuline avec une HbA1c inférieure à 7.5%. En pratique, l'HAS ne le recommande pas à ce jour. Espacer les délais de contrôle pourrait faire baisser encore l'adhérence des patients et diminuer l'efficacité même du dépistage, comme tester dans différents scénarii du rapport de 2011 sur le dépistage de la RD en France. Déjà, dans l'histoire du réseau OphDiaT, 55 842 des patients soit 67% de patients dépistés sont perdus de vue avec un premier dépistage négatif.

- Un autre résultat est intéressant et rejoint notre pratique clinique quotidienne : l'HbA1c est manquante dans les dossiers pour 57% des participants alors même qu'il est un point essentiel pour la prédictivité de la survenue d'une RD, étant le principal facteur de risque de survenue de RD. Une vraie sensibilisation est à poursuivre auprès de nos patients pour qu'ils connaissent leur équilibre glycémique.

Autre réseau de dépistage

Plusieurs régions françaises proposent des solutions de télémédecine à leur population afin d'augmenter le dépistage de la RD et d'offrir un accès aux soins à tous. Leurs chiffres d'utilisation restent certes marginaux (quelques centaines par an), mais le service rendu à la population est indéniable.

Ainsi en Bourgogne-Franche-Comté depuis 2004, un fourgon aménagé et un orthoptiste sillonne des villages pour proposer un dépistage de la RD à la population diabétique n'ayant pas consulté un ophtalmologue dans les deux dernières années.

Deux clichés du fond de l'œil et de la mesure de la tension oculaire sont réalisés. Les résultats sont ensuite analysés au service d'ophtalmologie du CHU de Dijon. Les patients, ayant eu une anomalie détectée, reçoivent la liste des ophtalmologues bourguignons s'étant engagés à les recevoir en cas d'urgence, accompagnée du compte rendu.

En 2015, le taux de découverte de nouvelles RD était de 18% (62). Malgré cette initiative, l'adhésion des patients n'est pas toujours au rendez-vous. Ainsi en 2020, 390 personnes ont bénéficié de ce dépistage sur 1910 invitations envoyées à des patients rencontrant les critères sus nommés (63).



Figure 33 Photographie du véhicule réalisant le dépistage de la RD en Bourgogne-Franche Comté (63).

Le département de la Dordogne, en coopération avec la CPAM et l'ARS organise un dépistage similaire sur prescription médicale (64). Ils visent les patients diabétiques de moins de 70 ans sans rétinopathie diabétique connue n'ayant pas eu d'examen ophtalmologique depuis plus de 2 ans et sans cataracte connue.

L'orthoptiste réalise les clichés avec un rétinographie portable non mydriatique de type caméra main Horus et télétransmet les clichés à un des 3 ophtalmologues partenaires via une messagerie sécurisée. En 2017, 148 ont bénéficié de ce dépistage contre 168 en 2016 (65). Les chiffres du taux de découverte de RD ne sont pas communiqués à ce jour.

Le réseau de dépistage coordonné développé en Dordogne

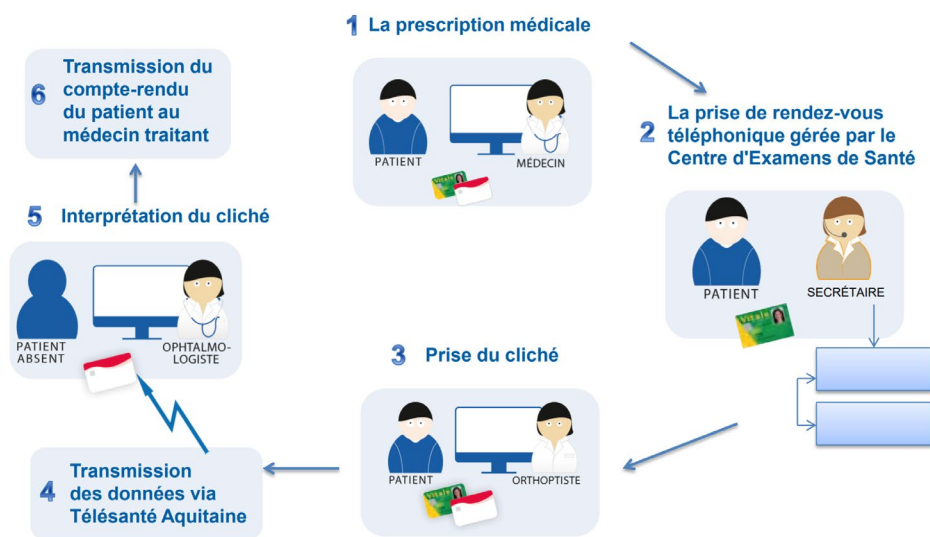


Figure 34 Reproduction du réseau de dépistage coordonné développé en Dordogne

Dans le Sud Manche, grâce à une Coopération entre la CPAM de la Manche, l'ARS et le centre d'ophtalmologie de la Baie d'Avranches, un dépistage de RD par télémedecine a débuté en 2015 (66). 240 patients ont été dépistés entre avril 2015 et novembre 2017 par la réalisation de deux rétinographies par un orthoptiste (2 champs, centre et nasal) puis télétransmis immédiatement. Les clichés étaient lus par l'ophtalmologue dans les 48h. Ils ont dépisté 34 RD, soit 14.7% des effectifs testés. 1% des patients dépistés ont nécessité une prise en charge rapide par photocoagulation laser. Un compte rendu est ensuite adressé au patient, au médecin traitant, et au diabétologue.

Application mobile

Plusieurs applications de télémédecine voient le jour ces dernières années. Odysight par exemple est une application gratuite à installer sur son smartphone développé par Novartis et Tylak Healthcare en partenariat avec des ophtalmologues et des spécialistes du jeu vidéo. C'est un jeu avec modules médicaux, disponible sur prescription médicale, à utiliser régulièrement entre les consultations d'ophtalmologie dans le cadre du suivi à distance du patient.

L'application propose deux modules médicaux : la mesure de l'acuité visuelle de près et la grille d'Amsler.

Si l'application détecte une baisse d'acuité visuelle, elle déclenche une pré-alerte incitant le patient à refaire un test le jour suivant. Si le second test confirme les résultats, une notification est envoyée au patient l'incitant à prendre rapidement rendez-vous. Celui-ci est ainsi dans un cycle de suivi qu'il peut gérer de façon autonome : il réalise ses tests quotidiennement, et, en cas d'alerte, est incité à prendre rendez-vous. S'il n'a pas d'alerte, il poursuit normalement son protocole de traitement (67).

L'utilisation de l'application a pu montrer son efficacité à détecter la survenue d'un scotome de métamorphopsie ou d'une baisse d'acuité visuelle, via à une grille d'Amsler intégrée à l'application et une approximation de l'acuité visuelle (68). L'utilisation dans le suivi d'un œdème maculaire diabétique peut donc s'envisager (69).

La principale limite est la redondance dans son utilisation quotidienne et le risque de lassitude peut s'installer. D'un autre côté, le contrôle de sa vue ne doit pas devenir une obsession de chaque minute en testant sans cesse celle-ci.

Limites

A. Attachement au réel

Un groupement d'ophtalmologue du Sud Manche rapporte un faible nombre des patients dépistés par rapport à la population diabétique dans leur secteur. D'après leurs conclusions, la diminution nette des délais de consultation chez les médecins ophtalmologistes dans le secteur Sud Manche, suite au développement du travail aidé et surtout à l'arrivée de nouveaux praticiens malgré des départs en retraite, est une piste pouvant expliquer leur résultat. Il y aurait en effet une préférence nette des patients pour leur circuit habituel en cas de disponibilité des praticiens. (communication directe avec le médecin, lien médecin-patient...) (66). De plus la nécessité actuelle de consulter physiquement pour le suivi classique hors diabète (changement de correction optique par exemple) encouragerait les patients à consulter au cabinet pour « faire d'une pierre deux coups ».

Consulter un médecin rassure le patient même lorsque ce passage n'est pas obligatoire. Par exemple, un sondage commandé par le SNOF en 2019 montrait que 76% des patients préfèrent consulter un ophtalmologiste, malgré la possibilité de passer directement par l'opticien, pour réaliser un renouvellement de correction optique (70).

Le risque de déshumanisation de la relation médecin patient est une préoccupation majeure des patients et apparaît comme une des principales réserves émises par la population, par l'abolition du contact physique. Ainsi en 2019, selon un sondage portant sur 3012 personnes représentatives de la population française, 75% des patients interrogés et 68% des médecins partageaient ce sentiment de déshumanisation par le biais de la télémedecine (71).

B. Fraude

Exercice illégal de la télé médecine

L'exercice de la télé médecine doit se conformer au code de la déontologie médicale et de la santé publique. Le Conseil National de l'Ordre des Médecins (CNOM) rappelle que si le médecin téléconsultant n'est pas dans le même territoire que le patient, la méconnaissance de la réalité du terrain par le médecin peut poser difficultés (72). Il ne peut donc être accepté qu'un médecin prenne en charge un patient :

- sans possibilité de procéder à un examen clinique chaque fois que cela est souhaitable
- sans aucun ancrage territorial ni aucune connaissance du tissu sanitaire et médicosocial
- sans se préoccuper de son parcours de soins
- sans apporter une garantie que la continuité des soins pourra être assurée

La prise en charge de patients, exclusivement en téléconsultation, porte atteinte aux exigences déontologiques de qualité, de sécurité et de continuité des soins.

Au vu de cela, il est interdit par la réglementation française que des médecins qui exerceraient à l'étranger interprètent des examens comme des rétinophotographies dans le cadre du dépistage de la RD.

La téléconsultation ne peut, dans la perspective de la convention, qu'être délivrée accessoirement ou subsidiairement à une activité principale de consultation réelle, pour suppléer notamment à l'absence de praticiens, ou à la difficulté du patient de se déplacer. Le Tribunal Judiciaire de Paris, dans un jugement en référé du 6 novembre 2020 rendu à la demande du CNOM et de la CNAM, a ainsi considéré que la proposition d'une offre de téléconsultations par des médecins susceptibles de donner des consultations, prescrire des soins et délivrer des arrêts de travail de manière indépendante de l'organisation territoriale prévue par la convention nationale était illégale (73).

La participation de médecins au fonctionnement des sites commerciaux qui proposent des prestations médicales instantanées à distance est donc contraire à la déontologie médicale et de tout façon illégale. Les plateformes de télé médecine de par leur publicité

peuvent parfois flirter avec la légalité et la pratique commerciale, il faut rester vigilant sur ce point. L'ordre des médecins a d'ailleurs déjà par le passé mis en demeure la plateforme Qare de faire cesser ses campagnes publicitaires (74).

Dans le même esprit en 2018, Krys leader français de l'optique, avait tenté de mettre en place une téléconsultation ophtalmologique pour un changement de correction optique directement initié en magasin d'optique, avant de faire marche arrière, devant le conflit d'intérêt évident (75). On trouve cependant toujours en 2021 sur leur site internet des offres commerciales comme une adhésion de 15 mois offerte à la plateforme de téléconsultation MédecinDirect en cas d'achat d'un équipement optique...

En synthèse, on doit retenir que la téléconsultation doit rester un outil à l'exercice de la médecine dans un territoire donné sans devenir un bien de consommation instantané par internet. L'article du 19 du code de santé publique indique : la médecine ne doit pas être pratiquée comme un commerce (76).

Téléconseil

Un « téléconseil » n'est pas une téléconsultation. Il n'en découle ni diagnostic, ni prescription. Un avis téléphonique donné à un patient ne doit pas engendrer une cotation pour téléconsultation. Ceci est inscrit à l'article 53 alinéa du code de la santé publique : le simple avis ou conseil dispensé à un patient par téléphone ou par correspondance ne peut donner lieu à aucun honoraire (77). La Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF) a procédé à des contrôles concernant l'utilisation de la télémédecine en France, principalement les sièges de plateforme et des officines de pharmacie. Son rapport de 2020 pointe que sur les 103 contrôles effectués, 23 % présentaient une anomalie qui a donné lieu à 12 avertissements et 5 injonctions de mise en conformité. Des suites pédagogiques et correctives ayant été privilégiées dans ce secteur au développement très récent. Outre des défauts d'information sur les tarifs et les honoraires, liés généralement à une méconnaissance de la réglementation, ont également été constatées des pratiques commerciales trompeuses comme, par exemple, la présentation confuse d'un service de « télé conseil » non pris en charge par l'Assurance Maladie à la différence d'une téléconsultation (78).

C. Risque de piratage

Malgré les standards de sécurité déployés en France et évoqués plus haut, les attaques de piratage contre les données de santé stockées en ligne sont une réalité. La télémédecine, de par sa nature même, est donc particulièrement exposée à cette problématique. Le mobile des pirates est très souvent l'appât du gain, ces données ayant une grande valeur marchande à la revente. A titre d'exemple, elles peuvent servir pour une attaque de phishing personnalisé (envoi de faux mails personnalisés afin de récupérer d'autres informations ou de l'argent) ou bien des rançons sont demandées pour récupérer l'accès aux données qui ont été cryptées et rendues inaccessibles par un logiciel malveillant (ransomware).

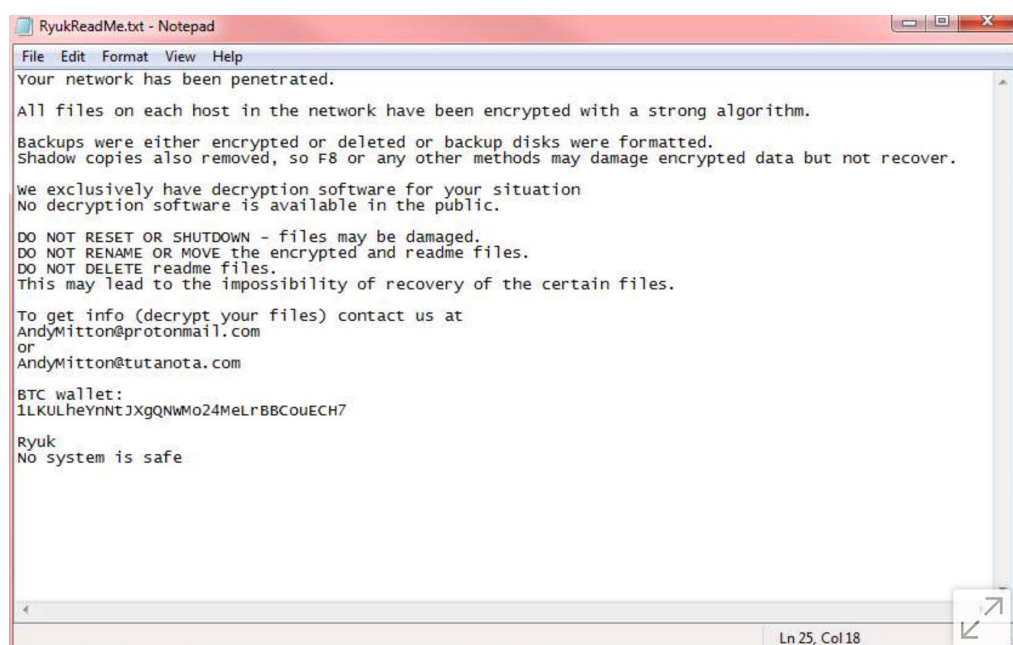


Figure 35 Ransomware Ryuk : message et demande de rançon pour débloquent l'accès à des dossiers patients

Ces attaques sont en plein essor depuis l'arrivée des cryptomonnaies qui permettent un paiement de rançon difficilement traçable, contrairement au virement bancaire classique ou aux valises de billets nécessitant une logistique importante (79).

Ces rançons peuvent atteindre des millions d'euros, sans garantie de récupération, et de nombreux hôpitaux se sont ainsi retrouvés paralysés ces dernières années par l'incapacité d'accès au dossier des patients (80).

Encore récemment, en février 2021, la presse française révélait la fuite de données médicales de près 500 000 personnes, essentiellement en Bretagne. Ces données

comportaient les noms de patients associés à des coordonnées (adresse postale, téléphone, email) et un numéro de sécurité sociale, accompagnés le cas échéant d'indications sur le groupe sanguin, le médecin traitant ou la mutuelle, ou encore de commentaires sur l'état de santé (grossesse...), des traitements médicamenteux, ou des pathologies (VIH...). Cette fuite provenait d'une attaque informatique menée contre des laboratoires de biologie médicale (81).

Selon le secrétaire d'État à la transition numérique, Cédric O, les hôpitaux français ont fait l'objet de 27 cyber-attaques majeures en 2020, et le rythme ne faiblit pas, avec une attaque hebdomadaire en 2021 (82).

Voici les conseils d'un rapport d'expert en cybersécurité (83) :

- 1 – Être conscient que l'on sera victime d'une attaque un jour ou l'autre et s'y préparer.
- 2- Faire donc des copies/sauvegardes des données, idéalement selon la règle 3-2-1 (trois copies, 2 supports différents, 1 hors ligne).
- 3 et 4 – Avoir des systèmes de protection des données à jour, voir s'entourer d'un spécialiste de la cyber sécurité.
- 5 – Ne pas payer une rançon le cas échéant. La récupération des données est très incertaine et inefficace (2/3 des données dans le meilleur des cas, sans aucune garantie).
- 6 – Préparer une solution pour travailler en mode dégradé si malgré les défenses mises en place, une attaque réussie à notre encontre.

D. Réseau

Les zones sous densément peuplées en médecins, ou déserts médicaux, se superposent parfois si ce n'est souvent à des zones blanches ou zones mal couvertes par le très haut débit, posant un frein indéniable à l'accès à la télémédecine comme moyen d'accès aux soins. Un rapport du Sénat rappelle que la résorption de la fracture numérique constituera une condition sine qua non à la résorption des inégalités territoriales d'accès aux soins. Les objectifs du plan France très haut débit parmi lesquels la couverture intégrale du territoire en très haut débit d'ici 2022 et du New Deal mobile visant notamment à résorber les zones blanches par un dispositif de couverture ciblée, devront donc être tenus afin de faire de la télémédecine un remède pour les zones sous-denses (48). Ce rapport indique donc que l'installation de cabines de

télémédecine dans des lieux facilement accessibles aux patients et ayant accès au réseau haut débit peut être une solution, au moins provisoire. Les pharmacies qui sont bien réparties sur le territoire sont de bonnes candidates pour pallier cette limite de la télémédecine. Un dépistage de RD organisé dans celle-ci semble faire sens.

E. Considération écologique

A l'heure du réchauffement climatique, le terme écologie est souvent utilisé, parfois galvaudé, dans notre actualité quotidienne. Mais se pencher sur l'impact écologique de la télémédecine semble compréhensible : quelle quantité d'énergie supplémentaire est par exemple nécessaire pour prendre et stocker une rétinophotographie dans un data center en attendant son interprétation comparativement à l'examen du fond d'œil réalisé par le praticien avec sa lentille 90D ?

Il est difficile de répondre simplement à cette question, le monde hyperconnecté n'ayant pas attendu la télémédecine pour se développer. Il ne faut pas tomber dans un faux débat : nos habitudes sont désormais bien ancrées, un retour en arrière à court terme n'étant pas envisageable, personne ne s'imaginant désormais troquer les mails et web-meetings contre une correspondance épistolaire ou l'envoi de pigeon voyageur. Mais il est indéniable que la télémédecine implique une consommation énergétique nouvelle. Aussi nous présenterons simplement quelques chiffres sur l'impact environnemental des télécommunications, à balancer avec la diminution d'utilisation des moyens de transport énergivore et pollueur qu'elles induisent en contrepartie.

Mail

En fonction des sources, entre 4g et 20g de CO₂ en moyenne sont dégagés pour l'envoi d'un mail (84). 20g, c'est ce qu'on obtient pour l'envoi d'une lettre verte de Caen (Calvados) à Aurillac (Cantal) avec le simulateur que La Poste met à disposition sur son site internet (85). Le problème : nous envoyons beaucoup plus de mails que nous n'avons jamais envoyés de lettres. Au total, près de 300 milliards d'emails sont envoyés dans le monde, chaque jour d'après l'institut Statista (86). En prenant un rejet moyen de 10g de CO₂ par mail, c'est donc 1 095 millions de tonnes de CO₂ par an qui sont générés dans le monde.

Par comparaison, le transport aérien mondial a, quant à lui, produit 915 millions de tonnes de CO2 en 2019 (87).

Outre la pollution, envoyer un courrier électronique de 1 Mo à 1 personne équivaldrait à la consommation directe de 25 Wh, soit 25 min d'utilisation d'une ampoule de 60 W (88).

Data center

Définition : Le data center (centre de traitement des données en français) est l'un des éléments nécessaires au traitement et stockage des données numériques. Concrètement, il s'agit d'un lieu physique contenant les serveurs informatiques qui stockent les données numériques (89).

Les data centers représentaient en 2018, 1% de la consommation électrique mondiale, soit 205 Téra Watt heure. Leurs impacts sont réels, bien que d'importants progrès aient été réalisés pour améliorer les performances énergétiques des serveurs (nouvelles techniques de refroidissement, rationalisation de leur utilisation...), voyant ainsi leur capacité de travail augmenter de 550% pour seulement 6% de consommation électrique supplémentaire entre 2010 et 2018 (90) (91).

En synthèse, on peut retenir que l'utilisation de la télémédecine comme tout moyen de télécommunication n'est pas neutre tant en consommation électrique et qu'en pollution bien qu'ils soient moins visibles que le gaz d'échappement d'un véhicule.

Bilan actuel de la télémedecine en France

Le Covid 19 a rebattu les cartes de la télémedecine en général. Il y eu 5.5 millions de téléconsultations remboursées entre mars et avril 2020 par l'Assurance Maladie en France. De quelques milliers par semaine avant les mesures de confinement début mars 2020, le nombre moyen hebdomadaire de téléconsultations a atteint, au plus fort de la crise sanitaire, près d'un million (92).

Concernant le dépistage de la RD par télémedecine en ophtalmologie, les chiffres post COVID 19 ne sont pas encore connus mais on peut imaginer une tendance à la hausse de son utilisation pour sa réalisation. Les chiffres présentés jusqu'alors pour son utilisation restaient à la marge ces dernières années, et n'ont pas encore fait progresser le taux de dépistage moyen dans la population diabétique qui reste stable ses 20 dernières années. Mais si les initiatives continuent à se généraliser, on espère assister à une augmentation nette de ce taux. Mais pour être tout à fait complet et honnête, la télémedecine ne permettra pas d'atteindre 100 % de diabétiques dépistés. Des barrières, autres que géographiques ou liées à la disponibilité des médecins ont été identifiées par une méta-analyse anglaise (93). En 2016, elle a décrit les populations diabétiques n'étant pas observantes vis à vis du dépistage de la RD, afin d'en extraire les autres freins potentiels. Il en ressortait que la plupart de ces patients appartenaient à un milieu social défavorisé, que leurs priorités n'étaient pas leur santé, qu'ils ne se sentaient pas concernés par leur pathologie et qu'ils n'allaient par eux même se rendre à un rendez-vous de dépistage même près de leur habitation, qu'ils étaient même anxieux à l'idée de subir cet examen.

Elle précisait tout de même que certaines voies à étaient à explorer pour améliorer le dépistage, comme de l'intégrer avec d'autres soins en lien au diabète, dans des lieux accessibles facilement et sans rendez-vous (ce qui résoudrait les problèmes d'adresses de convocation ou d'oubli du rendez-vous). Pour contribuer à cette croissance du taux de dépistage de la RD, une étude pilote innovante se met en place en Normandie : l'étude DiabEyeIA, mêlant rétinophographie télétransmise et IA en pharmacie. Cette approche innovante serait donc à même de répondre à ces contraintes. Le patient n'aura pas de démarche supplémentaire à réaliser car le dépistage se fera lors du renouvellement de son ordonnance. Nous allons donc maintenant présenter le développement et le principe sous-jacent à l'IA qui sera utilisé lors de ce projet.

Intelligence Artificielle

Définition

L'intelligence est d'après le dictionnaire la faculté de connaître, de comprendre ; à fortiori un esprit est dit intelligent s'il comprend et s'adapte facilement (94). L'adjectif « Artificiel » quant à lui renvoie à l'origine de l'objet qu'il qualifie : celui-ci a été fabriqué par l'homme, il n'est pas issu de la nature.

Dès lors, on pourrait en conclure que l'intelligence artificielle est le transfert d'une intelligence, créée par l'homme et à son image, dans une machine qui en est initialement dépourvue ; soit donner la capacité à un objet de sa conception d'analyser une situation pour en déduire une action à entreprendre.

A. Intelligence Humaine

Tentons de mieux définir les différentes formes que peut revêtir l'intelligence humaine afin de mieux cerner les enjeux que représentent la construction d'une intelligence artificielle. En réalité, en effet, le spectre de la connaissance et de la compréhension est vaste. Il existe de nombreuses théories scientifiques sur la multiplicité de l'intelligence humaine qui sont toujours débattues aujourd'hui.

Le Modèle CHC (Cattell-Horn-Carroll)

C'est le modèle le plus communément admis dans la communauté scientifique. Il y décrit l'intelligence humaine de façon hiérarchique. Le facteur g représente l'intelligence dans son ensemble, soit l'intelligence générale. Ce facteur g est le corollaire de différentes formes d'intelligences, à différents niveaux. Il trône donc schématiquement au sommet d'une pyramide formée de facteurs secondaires. Les intelligences du niveau 1 vont contribuer à former des ensembles plus grands d'intelligence de niveau 2. C'est la somme des intelligences du niveau 2 de cette représentation qui va définir le facteur g situé au niveau 3. Voici un schéma plus parlant du modèle CHC :

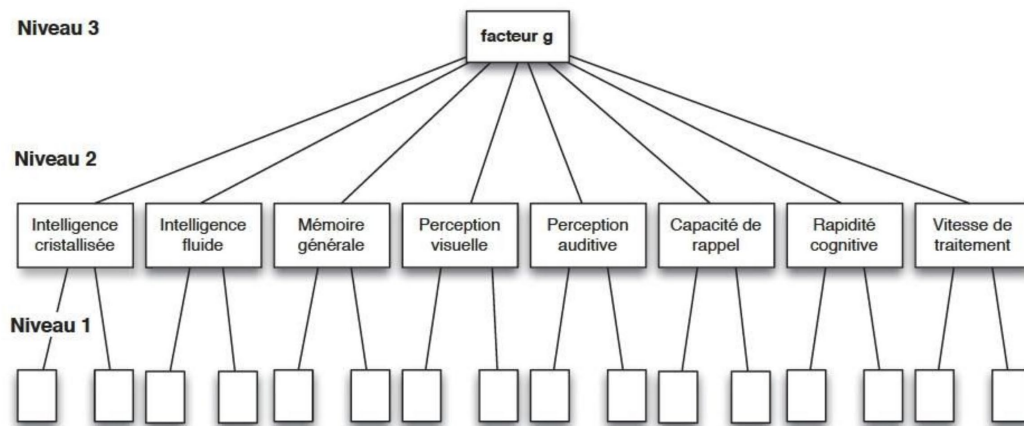


Figure 36 Modèle hiérarchique modélisant l'intelligence selon la théorie CHC (95)

Au niveau 2, on va retrouver par exemple l'intelligence cristallisée, qui renvoie à l'aptitude à mobiliser ses connaissances et son expérience. Elle augmente donc au cours de la vie. L'intelligence fluide est a contrario la capacité à résoudre un problème dans des conditions nouvelles, indépendamment de ses connaissances, comme la faculté de réaliser des déductions ou inductions.

A ce même niveau, on notera également la présence des capacités de mémorisation, de perception sensorielle, et de vitesse de réflexion.

Au niveau 1, on retrouvera par contre des habilités primaires plus spécifiques comme la connaissance lexicale, la compréhension verbale, la facilité numérique...

La théorie triarchique de l'intelligence

Pour Robert Sternberg, le facteur g n'explique qu'une partie de notre intelligence humaine, l'intelligence analytique. Il voit deux autres piliers nécessaires pour une bonne adaptation aux différentes situations que nous pouvons rencontrer dans la vie, l'intelligence créative (imagination, originalité dans la prise de décision) et l'intelligence pratique (sens pratique, intuition dans la résolution des problèmes). Il renommara d'ailleurs son modèle : théorie de l'intelligence à succès, pour souligner l'importance de considérer l'intelligence comme la condition sine qua none de la réussite dans la vie. En pratique, les études semblent montrer une forte corrélation chez un individu entre ces deux intelligences supplémentaires qu'il propose et le facteur g. Elles pourraient donc déjà être intégrées dans le modèle CHC (96).

Les 8 formes d'intelligence

Gardner va plus loin en proposant 8 formes d'intelligence pour expliquer la réussite dans la vie au-delà du simple facteur g retenue par la psychométrie (mesure quantitative de l'intelligence, le plus célèbre étant le Quotient Intellectuel). En définissant toujours une intelligence comme la faculté à comprendre et à s'adapter à une situation, voici sa proposition résumée (97) :

Intelligences	Compétences	Exemple de Métier
Intelligence Linguistique	Ou Intelligence verbale, Communication efficace, éloquence	Politique, enseignant
Intelligence Logico-mathématique	Ou Intelligence analytique, Capacité hypothético-déductive, logique et mémoire	Scientifique Chercheur
Intelligence Musicale	Sens du rythme, oreille absolue, créativité, virtuose	Musicien, Danseur
Intelligence Visuo-spatiale	Représentation spatiale du monde mentalement, sens de l'orientation	Architecte
Intelligence Kinesthésique	Intelligence des sens, faculté exacerbée à ressentir les choses et à maîtriser son corps	Basketteur, Chirurgien
Intelligence Naturaliste	Connaissance du milieu naturel, faculté à la survie dans cet environnement	Chef cuisinier, botaniste
Intelligence interpersonnelle	Ou Intelligence sociale : ensemble des compétences sociales permettant la collaboration, perception des sentiments d'autrui, charisme	Commerçant
Intelligence intrapersonnelle	Ou Intelligence émotionnelle, Conscience de soi, travail d'introspection pour relever des défis	Philosophe, Ecrivain, poète

Figure 37 - 8 formes d'Intelligence selon Gardner

On retrouve pour la 3ème fois l'Intelligence analytique, ici comme une forme d'intelligence parmi d'autres. Elle est donc présente dans la totalité des modèles tentant d'expliquer l'intelligence Humaine. Et c'est de celle-ci dont on souhaite doter la machine aujourd'hui afin qu'elle nous assiste dans nos tâches.

Quotient Intellectuel

Afin de quantifier cette intelligence analytique chez l'homme, ou intelligence générale ou facteur g en fonction des théories, un test psychométrique a traversé le siècle passé : le QI ou Quotient Intellectuel. La volonté de quantifier l'intelligence humaine est certainement plus ancienne, mais on la situe généralement au début du XXème siècle : le test Simon-Binet, du nom de ses auteurs, proposent alors d'attribuer à un élève un âge mental. Après avoir répondu à une série de questions, les résultats sont comparés à la moyenne des élèves de chaque tranche d'âge. Le but était alors de dépister un retard afin de proposer un encadrement personnalisé aux élèves en difficulté.

DIFFÉRENTES ÉPREUVES	ÉCOLES DE M. L. ET DE M. M. SITUÉES A PARIS RUE DES RÉCOLLETS ET RUE SAMBRE-ET-MEUSE				
	ÂGE DES ENFANTS				
	7 ans.	8 ans.	9 ans.	10 ans.	12 ans.
6 ans.					
Distinguer matin et soir.	10	10			
Définir par l'usage.	10	10			
Copier losange.	9	10			
Compter 13 sous simples.	9	10			
Comparer 2 figures esthétiques.	9	10			
7 ans.					
Main droite, oreille gauche.	8	10			
Décrire une gravure.	7	10			
Exécuter 3 commissions.	7	10			
Compter 9 sous simples et doubles.	4	9	10		
Nommer 4 couleurs.	4	9	10		
8 ans.					
Comparer 2 objets de souvenir.	4	8	10	10	
Compter de 20 à 0.	3	9	10	9	
Indiquer lacunes figures.	3	8			
Donner date du jour.	4	8	10	10	
Répéter 5 chiffres.	2	5			
9 ans.					
Rendre sur 20 sous.		4	10	9	10
Définir mieux que par l'usage.		3	6	7	7
Pièces de monnaie.		2	10	9	9
Mois.		2	8	10	9
Comprendre des questions faciles.		2	9	9	10
10 ans.					
Ordonner poids.		1	5	6	
Copier dessin mémoire.		2	4	5	
Critiquer phrases absurdes.			4	5	8
Loger 3 mots en 2 phrases.			3	5	8
Comprendre questions difficiles.			3	3	7
12 ans.					
Suggestion de lignes.			2	3	
3 mots en 1 phrase.			2	4	8
60 mots en 3 minutes.			2	4	5
Définitions abstraites.			1	2	4
Phrases désarticulées.			1	4	7

Figure 38 1ère échelle métrique de l'intelligence, Test de Simon Binet 1906 (98)

L'invention du terme QI fait suite à ce test : William Stern propose de faire le rapport entre l'âge mental sur le l'âge réel multiplié par 100 afin quantifier le résultat (QI de 120 si un enfant de 10 ans arrive à répondre aux questions d'un enfant de 12 ans).

Plus tard David Wechsler en 1939 gardera le terme consacré QI, même si le score qu'il crée, encore actuellement utilisé, n'est pas le fruit d'une division mais une représentation standardisée normalisée des résultats de tests d'association logique. Le résultat du QI de la population devient une courbe de gauss centrée sur 100 avec un écart de type classique de 15 (95% de la population entre 70 et 130).

On remarquera donc qu'en tout état de cause la mesure de l'intelligence se fait comparativement à nos congénères, et non de façon absolue. De plus, il n'y pas de façon universelle de concevoir l'intelligence humaine.

Malgré cela, pour ne pas perdre de vue notre objectif, on peut retenir que l'intelligence artificielle serait cette capacité, conférée par les humains aux machines, de mémoriser et d'apprendre sur la base de l'expérience, de penser et de créer, de parler, de juger et de décider (99).

B. Intelligence artificielle

Comme vu précédemment l'Intelligence Artificielle va donc tenter de reproduire l'intelligence humaine par une machine.

Là où l'intelligence humaine utilise le cerveau comme support physique, l'ordinateur va s'équiper d'une carte mère, de processeurs et de mémoire vive. Là où le cerveau humain va analyser les données fournies par les sens pour comprendre le monde qui l'entoure (vue, ouïe, odorat etc.), l'ordinateur va utiliser une base de données. Et enfin là où l'humain va agir et s'adapter à son environnement par le biais de son éducation, son expérience et de ses réflexes innés, l'ordinateur va se servir d'algorithmes pour traiter l'information.

Toutefois, à ce jour, l'IA 'forte', ou IA générale ou encore IA véritable, n'est pas une réalité, l'ordinateur n'est pas devenu l'égal d'un humain. En effet, la machine n'a pas de conscience propre, n'est pas capable intelligence émotionnelle, ou d'intelligence kinesthésique, encore moins de sens pratique. Et qui sait si un jour un scénario inspiré de Matrix prendra forme pour façonner notre futur. A ce jour on parle donc plutôt d'intelligence artificielle 'faible' pour évoquer l'IA actuelle, une IA essentiellement analytique, capable de traiter une information qu'elle reçoit pour résoudre un problème dans un cadre précis défini par l'humain qui la contrôle. C'est dans cette configuration que l'IA peut nous assister en médecine.

Base de données

Les bases de données de qualité sont un véritable enjeu : en servant de base d'apprentissage à l'intelligence artificielle, elles se doivent d'être de qualité, à la fois représentatives du sujet étudié et profuses afin de viser l'exhaustivité.

La première étape consiste souvent à numériser les données afin que la machine soit à même de les lire (pixels) : on appelle cela la dématérialisation.

Les données peuvent être dites brutes, non labellisées : elles ne comportent aucune annotation ou description. Au contraire, elles sont dites étiquetées ou encore labellisées si des informations leurs sont associées par un humain expert. Ce travail peut être très fastidieux car des milliers ou millions de données d'occurrence sont à traiter. Les données labellisées sont donc une ressource précieuse. Par exemple des banques de données d'images labellisées de rétinopathie diabétique ont été créées en France pour étudier la pathologie, et celles-ci sont utilisées dans le monde entier (Messidor, E-ophta).

Comme nous le verrons plus tard, les algorithmes implicites nécessitent en effet de grandes quantités de données pour la phase d'entraînement. Taille et diversité des données d'apprentissage permettront d'extraire l'ensemble des corrélations et des schémas répétitifs et représentatifs présents dans les scénarii du problème à résoudre.

Algorithme

Par définition un algorithme est une suite de règles formelles à suivre dans un but précis. Ainsi stricto sensu, une recette de cuisine peut être considérée comme telle. Aujourd'hui par extension, on considère surtout un algorithme sur son versant mathématique, comme étant une séquence d'opérations de calculs utilisés pour répondre à un problème. Ils vont être la recette que l'IA suit pour répondre à la question donnée. Historiquement, ils étaient effectués à la main, désormais ils sont conçus pour s'intégrer dans un code informatique compréhensible par un ordinateur. Ce dernier peut donc en exécuter de beaucoup plus complexes, on les appelle les algorithmes computationnels.

Ces algorithmes peuvent répondre à une logique d'IA explicite ou implicite. L'angle de résolution du problème s'oppose entre ces types d'IA, entre déduction et induction :

- Dans l'IA explicite, c'est l'application pure et dure de l'algorithme, créée par l'humain, sur les données disponibles qui va orienter le raisonnement de la simulation et donc la résolution du problème. L'approche est dite orientée par le modèle, et se rapproche de la programmation. L'avantage principal : les résultats obtenus sont facilement explicables, la logique appliquée est connue, car commandée par l'humain. Pour une application en médecine, cela permet une transparence appréciable. Son défaut principal : il faut être à même de théoriser précisément, de mathématiser le problème à résoudre, pour écrire l'algorithme. Par exemple, la description exhaustive précise d'une lésion de RD (forme, taille, couleur...quasi infinie) sur une rétinophotographie est presque impossible, un algorithme écrit par l'humain serait dans l'incapacité d'avoir une fiabilité systématique. On parle d'ailleurs d'explosion combinatoire quand le nombre de possibilités à décrire devient trop complexe à programmer.
- Dans l'IA implicite, au contraire, c'est par l'analyse et l'apprentissage de nombreuses données disponibles, effectuée par un premier algorithme, que l'ordinateur va générer lui-même un deuxième algorithme de résolution, sorte de mise à jour adaptative du premier, pour répondre au problème posé. Le modèle est dit orienté par la donnée, et se base sur le Machine Learning. Ainsi, si des millions de rétinophotographies accompagnées de leur interprétation sont apprises par la machine, l'IA implicite va construire sa propre logique pour associer correctement les bonnes images avec le bon diagnostic. Ceci va créer un niveau d'abstraction qui peut apparaître comme un défaut car les résultats et la décision finale de l'IA va rester plus opaque à l'humain, ce dernier ne pouvant plus expliquer précisément le mode de résolution utilisé par l'ordinateur.

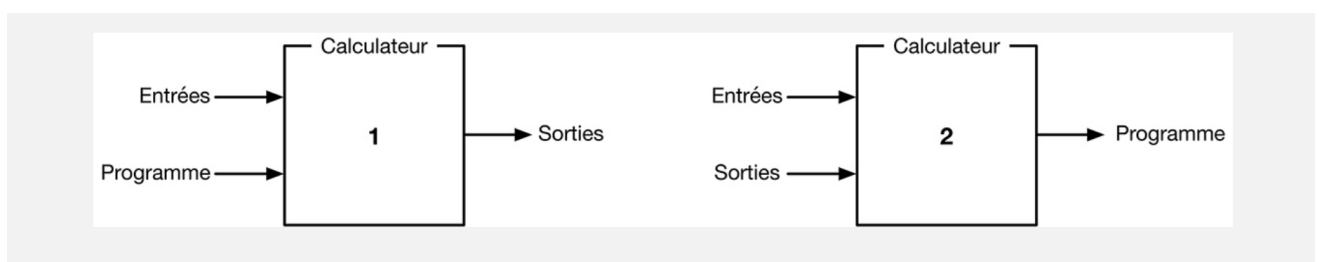


Figure 39 Déduction contre induction. La machine 1 applique un programme sur des entrées afin d'en déduire les sorties : IA explicite. La machine 2 compile les entrées et les sorties pour en induire un programme pouvant les mettre en relation : IA implicite.(100)

Mais comment apprendre à apprendre à une machine ? Il existe plusieurs façons de pratiquer le Machine Learning, ceci en fonction de la situation, du sujet et du type de données. C'est l'utilisation du bon algorithme d'apprentissage automatique qui va être la clef de la réussite du projet d'IA implicite. Si l'apprentissage est biaisé, le résultat le sera également. Sans entrer dans les détails très techniques, voici un schéma représentant les différents modèles d'algorithme utilisables en fonction de la situation :

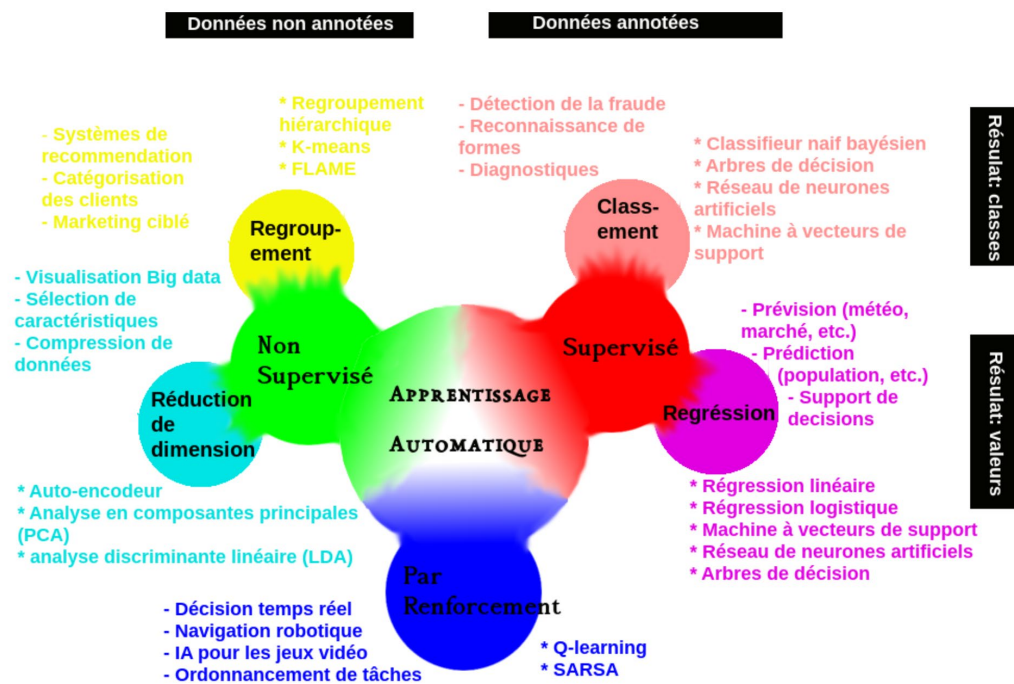


Figure 40 Schéma présentant les différents algorithmes d'apprentissage automatique (101) Les – représentent des situations, les * représentent des algorithmes correspondant pouvant être utilisés.

- ✓ En apprentissage supervisé, les données sont labellisées. La bonne réponse attendue au problème est donc disponible pendant la phase entraînement, l'algorithme sait d'avance ce à quoi les valeurs de sortie du modèle doivent correspondre. Par conséquent, à chaque entraînement, le modèle va ajuster ses paramètres de façon à diminuer l'écart entre les résultats obtenus et les résultats attendus. Le but étant qu'après la phase d'entraînement, le modèle puisse généraliser et donner une prédiction correcte lors de la présentation d'une nouvelle donnée inconnue, non étiquetée.

Par exemple, après lui avoir montré des millions de rétino-photographies annotées d'une description humaine de celles-ci pendant la phase d'apprentissage (nombre

hémorragies, d'exsudats, stade de la RD...) le logiciel classera lui-même en sain ou pathologique les futures images en respectant la classification qu'il a lui-même établi d'après sa propre logique.

On notera que les données peuvent être discrètes ou continues. Dans le premier cas, on utilisera des algorithmes de classement (variables qualitatives). Ce sont celles de notre exemple pour le dépistage de la RD. Dans le second cas, on utilisera des algorithmes de régression (variable quantitative).

✓ En revanche, l'apprentissage non supervisé utilise des données brutes. La réponse au problème donné n'est pas disponible, il est alors impossible à l'algorithme de calculer un score de réussite a priori. L'algorithme va plutôt chercher à déterminer en autonomie la structure sous-jacente des données, en tentant seul de faire des ensembles logiques de celles-ci. Il peut le faire par deux méthodes parfois complémentaires :

- Par regroupement logique de données, en partitionnant celles-ci (algorithmes des k-means) ou en faisant des regroupements hiérarchiques (classification ascendante hiérarchique (CAH)). En simplifiant, l'algorithme va créer des groupes (ou clusters), et va tenter de les rendre cohérents entre eux, utilisant entre autres des associations statistiques entre les données et les classes représentatives.

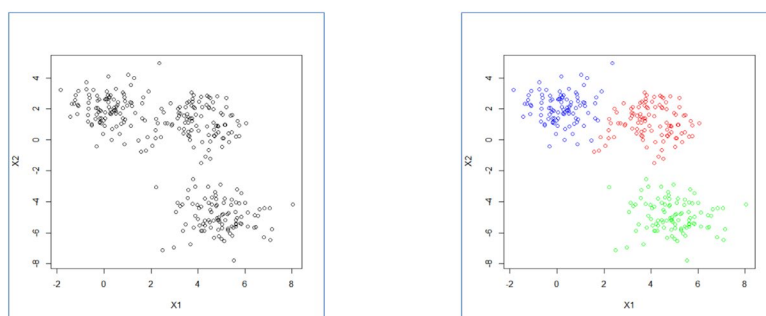


Figure 41 Par la méthode des k-means, l'IA va créer de novo 3 sous-groupes bleu/vert/rouge en se basant sur leur répartition dans l'espace et en calculant leur distance au centre de 'gravité'. Le centre est mobile si de nouveaux points apparaissent(102).

Intérêt et utilisation : par exemple l'IA va pouvoir caractériser une personne et la faire appartenir à un groupe, pour ainsi prédire ses habitudes en se basant sur les habitudes de son groupe (publicité ciblée sur internet, médecine prédictive d'une cohorte ainsi créée ...)

- Par réduction de dimension des données : l'algorithme va soit sélectionner seulement les variables pertinentes et éliminer les autres indépendantes du problème (méthode de filtrage, d'encapsulation), soit créer de nouvelles variables plus pertinentes, processus nommé extraction de données, pour les regrouper (compression par auto-encodeur, factorisation matricielle). Classiquement, l'algorithme va chercher à sélectionner les caractéristiques prédictives du problème et évacuer tout le bruit et les fonctionnalités redondantes ou trompeuses. Les avantages principaux de la réduction de dimension sont de faciliter le traitement des données en le simplifiant, améliorer la vitesse de calcul en allégeant les données, diminuer l'espace nécessaire au stockage, d'éviter le surapprentissage etc... pour augmenter la performance du modèle (103). En résumé, seul un petit nombre de variables explicatives va être conservé.

Un exemple parlant d'IA utilisant un regroupement et une réduction de dimension est l'algorithme de recommandations du site de streaming vidéo Netflix. L'utilisateur doit faire son choix dans un catalogue estimé à plus de 100 millions d'heures de visionnage, sans passer lui-même des heures à sélectionner un programme qui l'intéresse. Pour cela, l'IA utilise entre autres, après caractérisation, la factorisation matricielle. En décomposant ainsi la matrice, le poids des données à stocker est bien moindre (des millions de relations nulles sont ainsi évacuées), la recommandation devient plus rapide et plus ciblée.

Pour chaque utilisateur

Programme	Intérêt
n°1	0,1
n°2	1
n°3	0,5
n°4	0
.....	
n°100 000 000	0

à multiplier par le nombre d'abonnés

Caractérisation
->
Factorisation matricielle
->

Pour chaque groupe constitué par caractérisation

Produit des facteurs explicatifs ->	Recommandations
historique de visionnage	Programme n°2 n°10 etc....
Evaluation de titres supplémentaires	
Choix des utilisateurs similaires	
Informations du titre (acteur, genre)	

A multiplier par le nombre de groupe

Figure 42 Proposition d'un schéma très simplifié illustrant la factorisation matricielle et la caractérisation effectuées par une IA de recommandations comme celle de Netflix afin de diminuer le stockage en données et améliorer sa pertinence. Soit la matrice le tableau à deux entrées comportant pour chaque utilisateur, et pour chaque programme, la probabilité d'être intéressée. Alors, plutôt que de considérer chaque matrice dans son ensemble pour chaque client, l'IA ne retient que les facteurs explicatifs de cette matrice (interaction passée avec le service, historique de visionnage, évaluation d'autres titres, choix des utilisateurs similaires, informations liés à chaque titre (catégorie, acteur)). De plus on notera l'utilisation de la caractérisation en faisant appartenir un individu à un groupe lui ressemblant statistiquement sur ses préférences.

- ✓ En apprentissage par renforcement, l'algorithme apprend et s'enrichit de manière incrémentale en fonction d'une récompense, positive ou négative, reçue par le programme pour chaque réussite ou échec des actions entreprises. De façon schématique, on fixe un objectif à une IA. Pour y parvenir, elle va explorer initialement de façon aléatoire les milliers/millions de possibilités. Lorsque la tentative est un échec, elle reçoit une pénalité, ou au contraire une récompense en cas de succès. Elle va donc apprendre de ses erreurs et finir par parvenir à son but, en ne reproduisant que les tentatives couronnées de succès, les tactiques déployées devenant de plus en plus sophistiquées au fur et à mesure du temps écoulé. Cette méthode est très efficace, essentiellement car une intelligence artificielle peut effectuer des milliers de tentatives à une vitesse inaccessible à un humain.

L'exemple classique souvent repris pour illustrer l'apprentissage par renforcement est celui d'un robot totalement fonctionnel qui ne disposerait initialement pas d'un programme lui permettant de se déplacer, mais d'un algorithme d'apprentissage par renforcement comme le Q-Learning. Son IA va recevoir une récompense pour chaque action lui permettant un déplacement le rapprochant de son objectif, et au contraire une pénalité pour chaque action entreprise inutile l'en éloignant. Au fur et à mesure d'essai infructueux, le robot devrait être capable de se déplacer d'un point A à un point B si tel était son objectif, sans qu'aucun code ne lui ait formellement appris à se déplacer.

Les frontières entre les différentes méthodes d'apprentissage automatique ne sont évidemment pas aussi strictes que présentées sommairement ici dans un but didactique. Ainsi la combinaison de plusieurs algorithmes est tout à fait possible.

Pour améliorer encore sa capacité d'analyse, l'IA implicite a eu ces dernières années de plus en plus recours à l'apprentissage automatique profond (ou Deep Learning). Cela signifie que les algorithmes d'apprentissage vont utiliser des couches superposées de réseaux neuronaux artificiels (architecture inspirée de la biologie animale). Ce processus a été une vraie révolution dans l'apprentissage automatique et a considérablement accru la faculté d'apprentissage autonome des machines au cours de la décennie écoulée. Nous allons tenter d'en exposer le principe de fonctionnement.

Le neurone artificiel ou neurone formel, est l'unité de base autonome du système. En sommant ses multiples entrées (équivalent dendrite), il va calculer une information unique de sortie (équivalent axone), et la transmettre au prochain neurone sous forme binaire (1 ou 0).

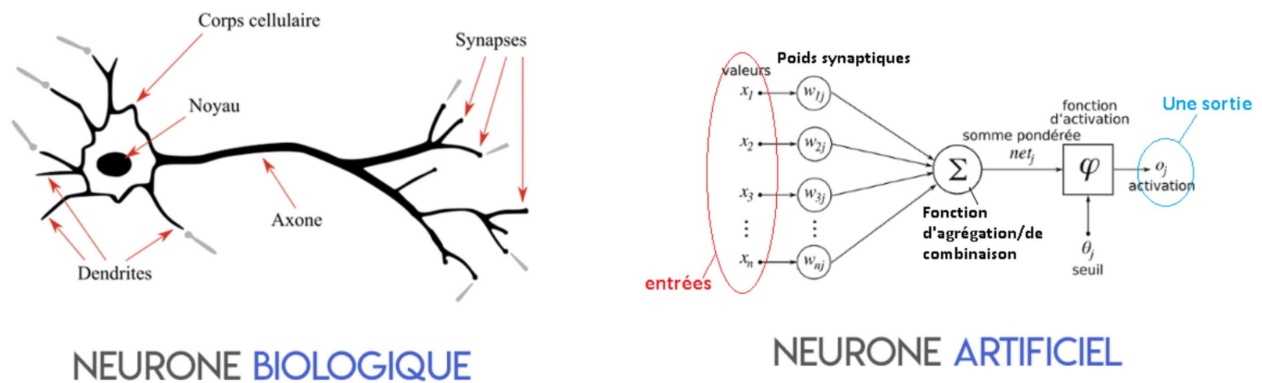


Figure 43 Schémas comparant la structure d'un neurone biologique avec un neurone artificiel. Les entrées d'informations dans le neurone sont multiples et leurs poids peuvent être pondérés (poids synaptique), pour amplifier ou minimiser un signal d'entrée. La sortie est unique, 0 ou 1, en fonction du seuil d'activation. (104)

La mise en relation et la connexion des neurones entre eux va former plusieurs couches de neurones formels superposées : le réseau neuronal profond. A chaque couche va correspondre un niveau d'abstraction et de décomposition de la donnée analysée.

Dans une configuration d'IA à reconnaissance visuelle, par exemple, entraînée à partir de photographies (105) :

La première couche de neurones peut analyser l'intensité des pixels, la seconde contiendra un encodage des lignes ou des zones de contraste de l'image, la troisième détectera l'existence de certaines formes géométriques simples comme des cercles ou des arrêtes, la quatrième identifiera certains agencements particuliers de ces figures comme celles qui représentent un '8' formé de deux cercles juxtaposés ou des formes géométriques construites à partir des arêtes et ainsi de suite jusqu'à construire des entités particulières de plus en plus complexes. In fine des formes remarquables vont émerger. (Pour la reconnaissance d'un animal, par exemple, l'oreille, le pied, le nez ou le cou d'une girafe mais attention sur ce point, sans que la machine ne soit véritablement capable de nommer ces différents patterns, on ne lui a jamais appris. Cela reste des données abstraites pour elle, elle saura simplement déterminer si certains patterns sont discriminants à reconnaître pour remplir son objectif et répondre correctement à la question posée).

Ensuite le poids statistique de chaque entrée de chaque neurone formel va être déterminé par un calcul d'optimisation, tout comme la valeur du seuil d'activation du neurone. Cette

optimisation permettra de trouver la solution correcte, soit une correspondance fiable entre la donnée présentée et le résultat escompté de cette donnée labellisée (si on travaille en mode supervisé.) Le poids statistique de la reconnaissance du cou d'une girafe sera par exemple majoré par rapport à ses sabots. La précision du réseau neuronal va ainsi s'affiner au fur et à mesure des entraînements, en faisant varier de façon autonome la valeur et la pondération des différents nœuds du réseau, afin de maximiser son taux de réussite à trouver la réponse attendue. Des milliers voire des millions d'exemples sont nécessaires pour fiabiliser le système.

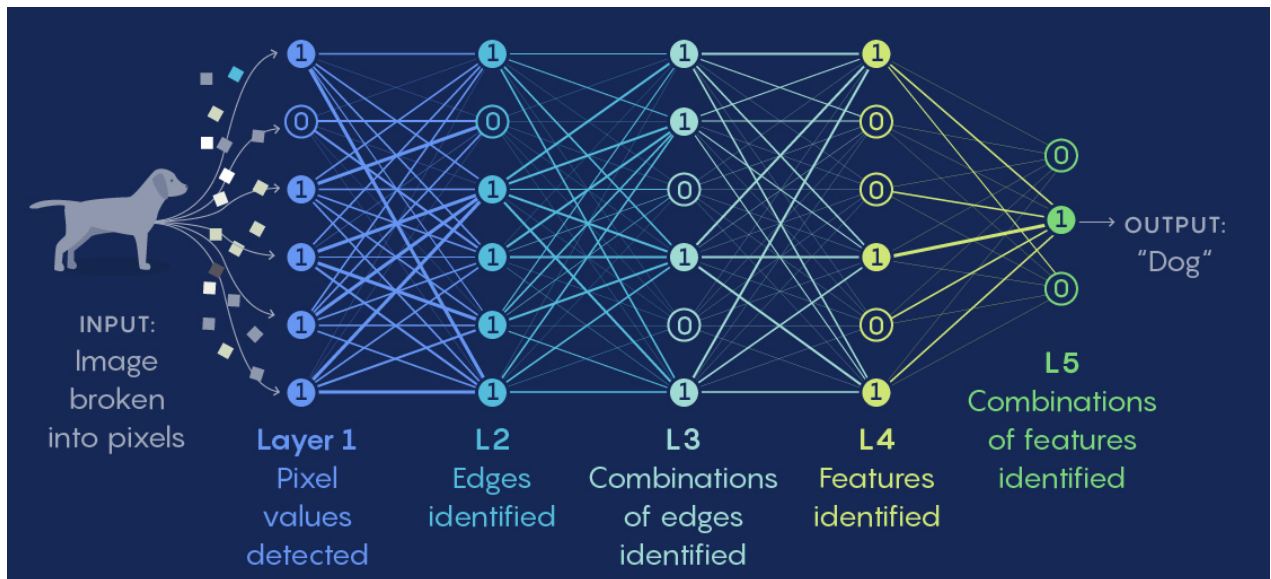


Figure 44 Exemple d'un réseau neuronal permettant à l'IA de déterminer si l'image présentée est un chien. On notera la progression par couches successives de neurones pour déterminer et transmettre les caractéristiques déterminantes et discriminantes (👁️ ou 🐕), dont la combinaison permet in fine de trouver une réponse correcte (105). L'humain n'aura jamais eu à décrire un chien à la machine au cours du processus, elle aura elle-même déterminé le moyen de le plus fiable de le reconnaître au fur et à mesure des exemples présentés.

Pour mémoire, les réseaux de neurones profonds sont aussi utilisés en mode non supervisé. Sans données labellisées, l'IA Google a pu conceptualiser un chat en 2012. On peut aussi par exemple demander une réduction de dimension par auto-encodeur. Il va ainsi rendre abstraite une image complexe pour gagner en espace de stockage par exemple.

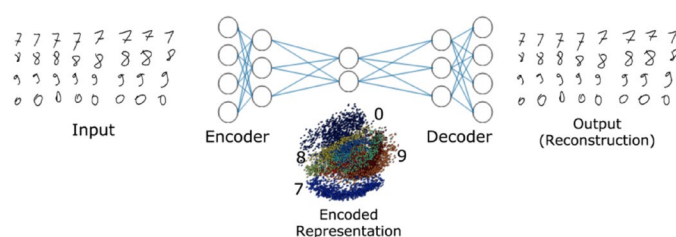


Figure 45 La figure suivante schématise un auto-encodeur simple, dont l'encodeur traite des images (inputs), afin de les représenter comme des points dans un espace à deux dimensions (encoded representation). Le décodage est ensuite possible pour retrouver les données d'origine (106).

Pour finir, on retiendra que l'apprentissage automatique ne se résume pas à un ensemble d'algorithmes, mais suit une succession d'étapes (107). Voici un exemple de marche à suivre pour mener à bien un projet d'IA dans le dépistage de la RD :

1- Définir le problème à résoudre : par exemple, définir sur une rétinophotographie la présence ou non d'une RD, et classer sa sévérité le cas échéant.

2- Acquérir des données : l'algorithme se nourrissant des données en entrée comme vue précédemment, c'est une étape importante. Les données doivent être pertinentes et en quantité et qualité suffisante, et en évitant tout biais dans leur représentativité. Il faut donc posséder une large banque de données de rétinophotographies dans notre cas.

3- Analyser et explorer les données : c'est-à-dire trouver des structures intéressantes ou des motifs particuliers à rechercher. Ici on va rechercher les différentes lésions de la RD qui nous intéressent (hémorragies, microanévrismes, dilatation des vaisseaux...)

4- Préparer et nettoyer les données : les données recueillies doivent être retouchées avant utilisation et surtout labellisés. On va donc indiquer le stade de sévérité de la RD, recadrer des images, supprimer celles qui sont floues...

5- Réduction de dimension : sélection ou extraction de caractéristiques seront appliquées afin d'améliorer la performance du modèle et réduire la nécessité en stockage de données. On peut par exemple éliminer des rétinophotographies toutes les données non discriminantes afin d'alléger le poids de stockage et d'accélérer les vitesses de calcul.

6- Choisir le bon algorithme d'apprentissage automatique, adapté au problème, la liste présentée plus haut n'étant pas exhaustive. Pour la RD un apprentissage supervisé par réseau neuronal profond de classement semble adéquat.

7- Entraîner, évaluer et optimiser : l'algorithme d'apprentissage automatique est entraîné et validé sur un premier jeu de données pour optimiser ses hyperparamètres (taille du réseau de neurones, nombre de couches, etc...)

8- Evaluer notre modèle sur un deuxième jeu de données test non labellisé, indépendant de l'entraînement, pour vérifier l'absence de surapprentissage. Ce phénomène survient par sur ajustement, l'IA devenant trop spécifique des données d'entraînement et est donc incapable de généraliser son apprentissage. Par exemple, le logiciel ne reconnaîtrait que les exsudats parfaitement identiques à ceux présentés dans les images d'entraînement.

9- Déploiement, IA envoyée en production pour faire des prédictions, et potentiellement utiliser les futures données en entrée pour se ré-entraîner et continuer de s'améliorer. Phase de commercialisation du logiciel de reconnaissance automatisé de la RD.

Historique d'application

A. Culture générale

Quelle est l'histoire de la reproduction de l'intelligence humaine par une machine ?

Voici une rétrospective rapide des événements marquants :

- 1943 : Un premier modèle mathématique et informatique du neurone formel est présenté par Warren McCulloch et Walter Pitts.(108)
- 1950 : Alan Turing, célèbre pour avoir participé au déchiffrement des messages Enigma des forces de l'Axe durant la seconde guerre mondiale, s'interroge dans son livre *Computing machinery and intelligence* (109) : 'Can Machines think ?'. Il va proposer un test, nommé 'imitation game', pour tenter de répondre à cette question : une machine et un être humain dialoguent entre eux. Si un observateur, en aveugle, ne peut distinguer et correctement désigner la machine de l'être humain, on pourrait dire qu'une machine est dotée de pensée.
- 1951 : Première expérience d'apprentissage automatique, utilisant un réseau de neurones et du renforcement. La machine SNARC de Marvin Minsky simule le déplacement d'un rat à la recherche de nourriture dans un labyrinthe (110).
- 1956 : Le terme Intelligence Artificielle est officiellement adopté par la communauté scientifique au Dartmouth Summer Research Project de John McCarthy. Elle désignera désormais le vaste domaine de recherche et l'ensemble de sciences, théories et techniques (notamment logique mathématique, statistiques, probabilités, neurobiologie computationnelle, informatique) qui ambitionne d'imiter les capacités cognitives d'un être humain.

- 1957 : Un psychologue américain Frank Rosenblatt invente le perceptron. C'est un neurone artificiel dont le poids optimal de ses entrées va pouvoir être automatiquement calculé par l'algorithme, et non calibré par l'humain (111).
- 1965 : Premier réseau de perceptron organisé en multicouches par Ivakhnenko and Lapa, nommé alors méthode de traitement des données en groupe (112).
- 1969 : En démontrant les limites théoriques d'un perceptron (impossible de résoudre des problèmes non linéaires, ou réaliser une fonction logique simple comme XOR ('OU' exclusif) Marvin Lee Minsky et Seymour Papert portent un coup d'arrêt à la recherche en connexionnisme (courant scientifique en faveur des réseaux de neurones, alors en conflit avec les partisans d'une IA symbolique où l'apprentissage de la machine n'est pas automatisée, mais contrôlée et conceptualisée par l'homme, plus proche des IA explicites que nous avons définies plus tôt) (113).
- 1986 : Naissance véritable du Deep Learning : deux Américains (David E. Rumelhart et Ronald J. Williams) et un Canadien (Geoffrey E. Hinton), et avec des variantes, le Français Yann LeCun en 1988, mettent au point la rétropropagation de gradient. Cette technique lève les limites précédentes (fonction non linéaire, XOR) en utilisant un réseau de perceptron multicouches et en permettant à celui-ci apprentissage automatique de ses erreurs. Chaque poids de chaque neurone de chaque couche du réseau sera potentiellement mis à jour afin de classer au mieux une base de données, corrigeant les erreurs en partant de la dernière couche et remontant jusqu'à la première. Cependant cette technique s'avère très vorace en puissance de calcul et en mémoire, et les bases de données gigantesques nécessaires ne sont pas disponibles. Son utilisation s'en retrouve limitée, les autres techniques d'IA ayant alors des résultats supérieurs à moindre puissance (114) (115).
- 1997 : Deeper Blue, supercalculateur conçu par IBM, bat aux échecs le champion du monde de l'époque Garry Kasparov (évaluation en temps réel d'un coup et de ses conséquences, en consultant sa base de données historique de

milliers de parties d'échecs. Il joue celui ayant la plus forte probabilité de victoire).

- 2012 : Révolution du Deep Learning. Les réseaux de neurones profonds peuvent enfin donner leur pleine mesure grâce notamment à l'augmentation de la puissance de calculs et l'explosion des bases de données. La compétition ImageNet, consistant à tester et comparer la précision de son algorithme de reconnaissance d'image, est remportée pour la première fois par une IA utilisant l'apprentissage profond, et ce en écrasant la concurrence (100). Dès lors les IA implicites à base de réseaux de neurones profonds, mis de côté pendant près de 30 ans, vont enfin démultiplier leur usage (Reconnaissance visuelle pour voiture autonome, traduction automatique, recommandations internet, colorisation d'images noir et blanc, etc...)
- 2016 : Le programme Alphago bat au jeu de go ayant Lee Sedol, considéré comme le meilleur de joueur de la planète, en utilisant un apprentissage par réseaux de neurones profonds, clôturant ainsi la suprématie humaine dans les jeux de plateau. Le jeu de go résistait jusqu'alors de par sa très importante possibilité combinatoire, comparativement à d'autres jeux de plateaux (10^{170} position légitime au go, 'seulement' 10^{50} aux échecs).

B. Médecine

De façon semblable, dans l'histoire de l'utilisation de l'IA en médecine, l'approche la plus ancienne a été de doter la machine d'algorithme basée sur la logique, la classification et la hiérarchisation programmées par un humain pour en déduire le bon diagnostic ou le bon traitement. Voici des applications d'IA en médecine :

- Le système expert Mycin, développé à partir 1972 par Buchanan & Shortliffe. (116) Ce système était capable de proposer un diagnostic dans le domaine des infections bactériennes (notamment méningite) et de proposer un traitement en fonction. En tant que système expert, il pouvait rendre un résultat en appliquant un arbre de

décision et des règles d'inférence programmées par l'humain, à partir de sa base de données, de règles pré-établies et de la base de faits renseignée par l'utilisateur (données du dossier patient, résultat d'examen).

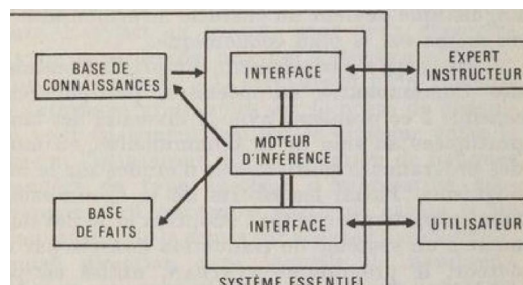


Figure 46 Schéma d'une IA explicite dans un système expert. Le logiciel produit un résultat grâce à son moteur d'inférence programmé par un humain. (117)

En 1978, 10 cas réels sont soumis à 10 participants (logiciel Mycin + 9 autres praticiens), le 'gold standard' étant assuré par 8 spécialistes de la méningite :

	(1) Sur 80	(2) Sur 10	(3) Sur 10
MYCIN	52	7	0
Enseignant 1	50	5	1
Enseignant 2	48	5	1
Chercheur	48	5	1
Enseignant 3	46	4	0
Médecins traitant	46	7	0
Enseignant 4	44	5	0
Interne	36	3	1
Enseignant 5	34	3	0
Etudiant	24	1	3

Figure 47 Tableau représentant les résultats des 10 participants à diagnostiquer et traiter 10 cas de méningites. (116)

Colonne 1 : 1 point par diagnostic correct attribué par chaque expert (donc sur 80). Colonne 2 : résultat ramené sur 10 points après consensus des 8 experts. Colonne 3 : Nombre de cas où la thérapeutique mise en œuvre oublie de traiter un pathogène.

Malgré la preuve de son efficacité, avec un diagnostic plus précis et sans erreur majeure de traitement, le logiciel Mycin n'a jamais été utilisé à grande échelle en pratique courante. En effet en tant que système expert (langage Lysp), le hardware nécessaire à son utilisation était onéreux et peu répandu à l'époque. L'informatisation des services de médecine en était alors à ses tout débuts. De fait, il n'a même jamais été commercialisé.

Mais son impact a été important dans le développement des IA futures, ayant fait la preuve du concept : une machine pouvait rivaliser sur des tâches bien précises avec les médecins.

- Dans le même esprit, une solution experte appelée Sphinx fut développée pour la détection d'ictères en France (Université Aix-Marseille) (118) et une autre, Puff, pour les affections pulmonaires, dans les années 1980 (117).

Puis, la redécouverte des algorithmes de Deep Learning dans les années 2010 a permis une nouvelle approche des problématiques médicales. Désormais, on ne fournit plus forcément le programme logique de résolution à la machine, mais on l'entraîne avec des bases de données gigantesques, pour qu'elle génère par elle-même sa propre logique de résolution en utilisant son réseau de neurones artificiels organisé en couches :

- 2015 : L'IA Watson-Health est créée par la société américaine IBM, orientée dans le domaine de la cancérologie. C'est une évolution du programme Watson ayant vaincu deux champions humains de JEOPARDY en 2011 (équivalent Questions pour un Champion aux USA). Cette solution est spécialisée dans la reconnaissance du langage, oral ou écrit. Ainsi, l'IA est constamment à jour de l'ensemble des publications du monde médical. La promesse : en croisant ces informations avec le dossier médical du patient, le logiciel serait à même de poser le diagnostic le plus probable et de proposer le meilleur traitement recommandé. WatsonHealth a par exemple été capable de redresser le diagnostic d'une forme rare de leucémie au Japon en 2016 après lecture de 20 millions d'études d'oncologie clinique (119). A ce jour, des études ont corroboré la possibilité d'utiliser les réseaux de neurones artificiels pour le diagnostic des leucémies lymphoïdes chroniques (120). Cependant, malgré des investissements colossaux de plusieurs milliards de dollars, la solution WatsonHealth est toujours en phase de test et n'a pas encore su s'imposer dans le milieu médical. Les principales limites qui lui sont reprochées : des promesses marketing irréalistes qui le desservent en créant des attentes démesurées qui ont déçu (créer de nouvelles connaissances pour éradiquer le cancer alors qu'il ne peut que synthétiser les connaissances actuelles), le fait que la médecine ne soit pas une science exacte (33% de concordance entre l'IA WatsonHealth et l'avis des médecins experts au Danemark), le fait que la lecture des dossiers patients soit fastidieuse (l'IA ne reconnaît pas aisément les acronymes, phrases abrégées etc..) et que WatsonHealth ait une nette préférence de confiance dans la littérature et recommandation américaine (121).

- 2017 : En entraînant un réseau de neurones artificiels profonds à la reconnaissance des lésions cutanées cancéreuses, des scientifiques américains ont créé une IA qui concurrence la sensibilité et la spécificité du diagnostic réalisé par des dermatologues humains. Dans les faits, leur algorithme a été entraîné à partir de 129 450 images labélisées qui comportaient 2032 diagnostics différents (122).

Puis ils ont fait concourir vingt-cinq dermatologues contre leur IA au cours de trois exercices de reconnaissance de lésions cutanées. Le diagnostic de certitude était assuré histologiquement par une biopsie.

1^{er} exercice : distinguer un carcinome d'une lésion séborrhéique bénigne

2^{ème} exercice : distinguer un mélanome d'un naevus

3^{ème} exercice idem que le 2^{ème} mais les dermatologues utilisent un dermatoscope.

Voici les résultats :

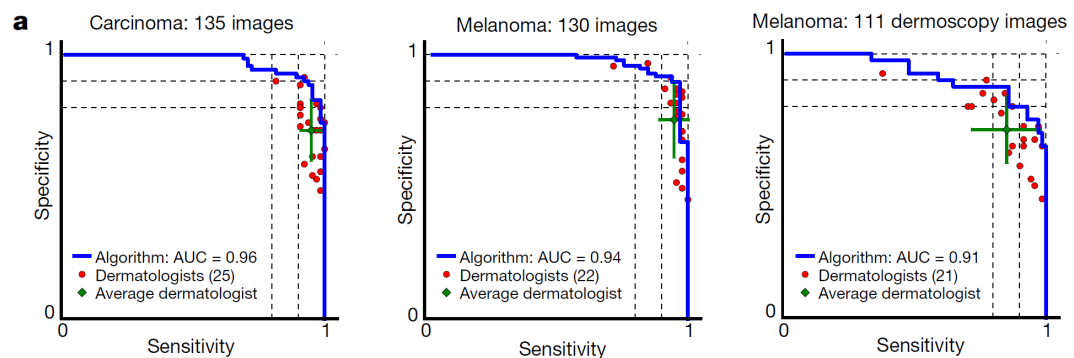


Figure 48 Sensibilité et spécificité au cours des 3 exercices comparant l'IA et les 25 dermatologues (122)

Leur étude a conclu à une non-infériorité de l'IA dans ces trois exercices.

- 2018 : Démonstration du Deep Learning dans le diagnostic radiologique de la tuberculose (123). Deux IA utilisant les réseaux de neurones profonds déjà entraînés sur plus d'un million d'images généralistes, GoogLeNet et AxelNet, ont été supervisés sur 1000 radiographies pulmonaires. Les résultats sont très prometteurs : en phase de test sur 150 radiologies, l'aire sous la courbe est de 0.99 en combinant les deux IA. L'approche recommandée par cette étude est la suivante : réaliser une coopération entre les IA et le radiologue. Si les résultats des deux IA concordent, les résultats sont validés, sinon, le radiologue procède à une troisième lecture pour poser le diagnostic. Ce système a pu atteindre une sensibilité de 97.3% et une spécificité de 100% dans leur étude. Ils proposent de nommer cette approche la « radiologie augmentée ».

Application en ophtalmologie pour la RD

L'ophtalmologie, en tant que spécialité très visuelle, a et va aussi bénéficier des progrès faits en matière d'IA dans le domaine de la reconnaissance d'image. Dans le futur, la majorité de nos examens d'imagerie, OCT, champs visuels, rétinophotographies, devraient voir émerger, si ce n'est déjà le cas, des solutions d'interprétations par intelligence artificielle basée sur le Deep Learning. En soin primaire, le couple télémédecine et IA pourrait ainsi être l'avenir pour le dépistage et le suivi des patients à distance, en permettant de recevoir en consultation physique les seuls patients pathologiques (124). L'IA est à ce titre une vraie rupture technologique, par cette faculté de tri qu'elle rend possible, notamment dans les zones sous densément peuplées en ophtalmologie, et pourrait permettre de mieux répartir le temps médecin-patient et le réserver aux cas seulement nécessaires (125).

En octobre 2016, une étude menée par l'équipe américaine de Michael Abràmoff s'intéressa au dépistage de la RD par réseau de neurones artificiels profonds. En 2013, leur programme de Machine Learning (Iowa Detection Program IDP), dépourvu de Deep Learning, n'avait qu'une spécificité aux alentours de 60% (126). Trois ans plus tard, leur IA a été capable de détecter une RD menaçante avec une sensibilité de 96.8% et une spécificité de 87% pour une aire sous la courbe de 0.98 en s'entraînant sur la base de données MESSIDOR-2 (127).

La base de données Messidor 2 est une banque de données de rétinophotographies issue du projet Messidor (Méthode pour Evaluer la Segmentation et technique d'Index en Ophtalmologie Rétinienne). Ce projet a été pensé dès 2004, et financé par le gouvernement français, pour étudier les possibilités de détection automatique des lésions de RD dans une rétinophotographie. La banque de données historique Messidor comprend 1200 images numérisées de fond d'œil du pôle postérieur sur 45° (800 dilatée par tropicamide 0.5% et 400 non). Ces images sont labellisées sur le grade de la RD et le risque de présence d'un OMD (par analyse des exsudats). Les images sont issues des services d'ophtalmologie du CHU de Brest, de Saint Etienne et de l'APHP, et ont été prises avec un Topcon (résolution 1440*960, 2240*1488 or 2304*1536 pixels) (128).

Messidor-2 est une extension de la base de données Messidor, enrichie de clichés du CHU de Brest, et qui ne contient que des clichés par paire d'œil droit et gauche (1 cliché centré sur la macula pour chaque œil), soit 1748 images pour 874 patients.

EN 2018, le logiciel développé par l'équipe d'Abràmoff, IDx-DR, encore amélioré, est autorisé par le FDA (Food Drug Administration) des Etats-Unis. Il devient ainsi la première IA autonome autorisée à proposer un diagnostic. Le taux de lecture d'une image est alors de 96.1% pour une sensibilité de 87.2% et une spécificité de 90.7% lors d'un test réalisé sur 892 personnes réparties sur 10 centres de soins aux Etats-Unis (129).

Son principal concurrent est le logiciel français OphtAI des sociétés ADCIS et Evolucare. Son ancêtre, Teleophta, dépourvu d'apprentissage profond et de réseau artificiel de neurones, s'était heurté aux mêmes limites que son homologue américain IDP : malgré des trésors d'ingéniosité développés en IA explicite, la spécificité du dépistage de la RD plafonnait entre 68 et 70% (130). Le logiciel OphtAI, développé à partir du projet Retinoptic, s'est entraîné sur une autre base de données française, E-ophta, financés par l'Agence nationale de la recherche française.

E-ophta comportait initialement, en 2009, 25702 examens collectés depuis le réseau parisien OPHDIAT présenté plus haut. Chaque examen contient 4 photos (2 par œil). Soit plus de 100 000 fonds d'œil au total dans la base de données. Ces images sont labellisées avec le score de sévérité de la RD pour chaque œil, ainsi que la décision thérapeutique par le lecteur du réseau OPHDIAT (131). OphtAI s'est ensuite entraîné avec les données de Kaggle (88 704 yeux), plateforme spécialisée dans l'organisation de compétitions en science des données.

Le logiciel OphtAI dispose du marquage CE depuis 2019. Au titre de ce marquage, il est reconnu comme un dispositif médical d'aide au diagnostic. Après son entraînement, il a été testé sur la base de données Messidor-2. Il revendique une spécificité et une sensibilité dans le dépistage de la RD pouvant aller jusqu'à respectivement 90,2 % et 99,0%. A ce jour, il n'y pas encore d'étude de vraie vie à grande échelle publiée.

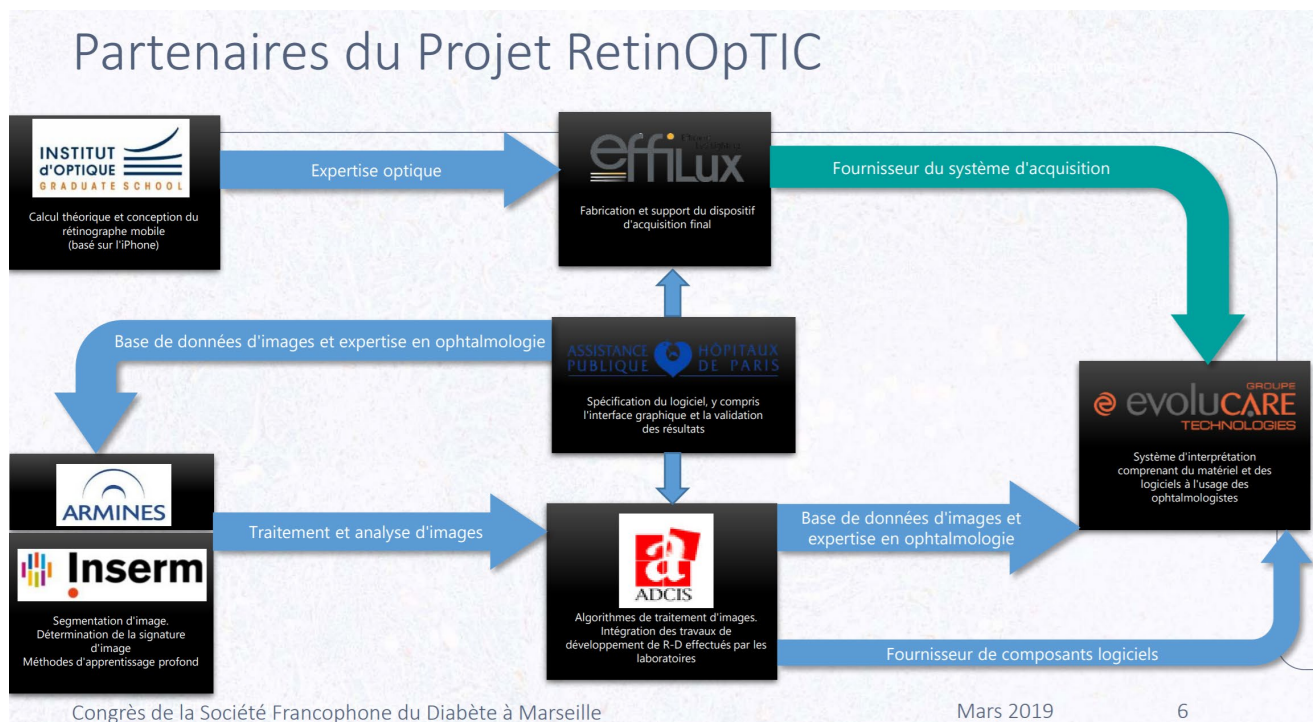


Figure 49 Présentation des partenaires du projet RetinOpTIC qui a mené à la conception de l'algorithme OPHTAI pour le dépistage automatisé de la RD (132)

Pour mémoire :

- OphtAI commercialise également à ce jour des solutions de dépistage automatisé du glaucome (sensibilité 92.5%, spécificité 86.4%) et de DMLA (sensibilité 96.4% spécificité 95.4%) sur le même principe à partir de rétinophotographies prises avec n'importe quel rétinographe du marché (133).
- Le dépistage automatisé de la rétinopathie du prématuré va aussi bénéficier des progrès réalisés en IA avec les réseaux de neurones profonds. L'algorithme testé par Brown et al en 2018 a déjà montré des résultats qui sont prometteurs : après avoir entraîné leur algorithme avec plus de 6000 images labellisées, ils ont pu dépister les stades « plus » de la ROP sur un test de 100 rétinophotographies, en rivalisant avec 8 spécialistes ayant au moins 10 ans d'expérience (134).

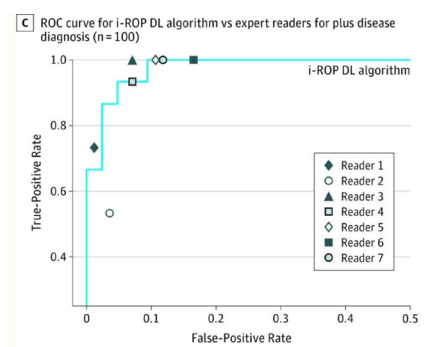


Figure 50 Graphique tiré de l'étude de Brown montrant les résultats pour le diagnostic du stade plus de la ROP entre l'algorithme d'IA et 8 experts lors d'un test sur 100 images

Pour revenir à notre sujet principal, d'autres logiciels basés sur le Deep Learning pour le dépistage de la RD à partir de rétinophotographies sont également déjà commercialisés dans le monde, comme EyeArt développé par l'américain Eyenuk. Il dispose aussi du marquage CE et FDA. EyeArt a été éprouvé sur une vaste étude rétrospective en 2018. Passant en revue 101 710 examens réalisés aux Etats Unis, la sensibilité lors de ce dépistage massif de EyeArt était de 91.3% et la spécificité de 91.1% (135). Il est usuel d'avoir des chiffres en vraie vie légèrement moins bons qu'en phase de test sur image calibrée. On notera que seulement 0.9% des clichés ont été ininterprétables.

Demain, il est même envisageable que le patient réalise lui-même son propre dépistage de RD avec son propre smartphone, si les progrès continuent au niveau du module de caméra de nos téléphones. Une étude indienne de 2018 a pour l'instant testé un adaptateur de smartphone et les résultats étaient encourageants. Leur module, Fundus On Phone (FOP), assisté de l'algorithme EyeArt, a permis lors d'un test sur 201 patients de dépister une RD avec un sensibilité de 95.8% et une spécificité de 80.2% (136). L'intérêt selon les auteurs est un appareil à moindre coût dans un pays comme l'Inde où les moyens de dépistage sont très inégaux et globalement insuffisants (seulement 6 des 72 millions de patients diabétiques seraient dépistés pour la RD) (137).

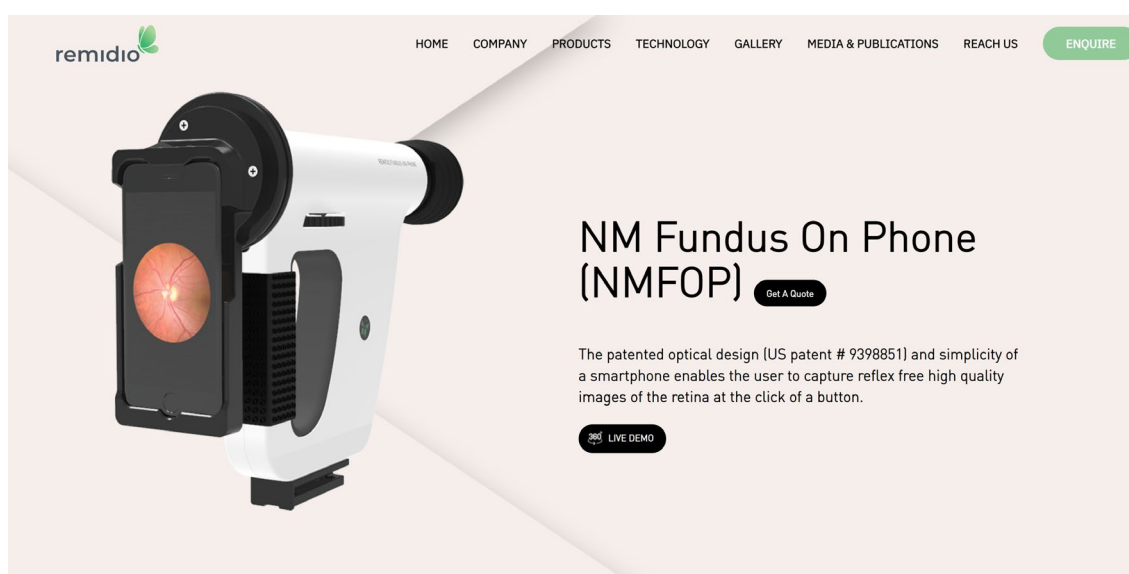


Figure 51 Module Fundus On Phone commercialisé par la société Remidio, permettant l'utilisation d'un smartphone comme caméra pour la réalisation d'une rétinophotographie. Source et crédit image : Remidio.com

A ce jour, l'étude prospective de vraie vie la plus ambitieuse utilisant l'IA dans la RD est, à ma connaissance, une étude chinoise. Ce pays était à la recherche d'une méthode nationale fiable et reproductible pour réaliser le dépistage de la RD car il a connu une multiplication par 10 du nombre de ses diabétiques en 30 ans du fait de l'occidentalisation de son mode de vie, de 0.67% en 1980 à 10.4% en 2013, pour une population de plus de 1 milliard d'habitants (138).

Entre juin 2018 et août 2019, ils ont dépisté 47 269 patients répartis dans 155 centres spécialisés du diabète dans le pays (Metabolic Management Center, créé pour standardiser la prise en charge du diabète et de ses complications en Chine) (139). Ils ont réalisé des rétinophotographies non mydriatiques à l'aide de différents appareils (Topcon-TRC-NW400, MiiS DSC-200, Canon CR-2 PLUS AF, Canon CR-2 AF and Zeiss VISUCAM20) et les ont analysé par l'IA chinoise VoxelCloud Retina.

Cette IA de Deep Learning avait été entraînée à reconnaître et à classer la sévérité d'une RD à partir de 143 626 images issues de banques de données privées de médecins entre 2005 et 2015, puis calibrer par un deuxième jeu de 1184 images d'un hôpital public chinois.

En premier lieu, l'IA a défini si la qualité de la rétinophotographie est suffisante : l'image doit couvrir 45 degrés de la rétine comprenant la macula, le nerf optique est visible, 80% de la rétine est reconnaissable et la photo n'est ni sous ni surexposée. Les images furent de qualité insuffisante pour 13.97% des patients.

Pour les 40 665 patients dont les images ont pu être analysées, 28.8% présentaient une RD et 10.8% une RD menaçante pour la vision (RD sévère ou proliférante, ou présence d'un OMD). Le gold standard pour évaluer la sensibilité et la spécificité de l'IA lors de cette étude a été réalisé par le consensus lors de la relecture par deux ophtalmologues, à partir du tirage au sort d'un tiers des images. En l'absence de consensus, un troisième lecteur, expert, statuait sur le grade de sévérité de la RD.

Cela les a amenés à démontrer une sensibilité de 83.3% et une spécificité de 92.5% de leur IA lors du dépistage de la RD devant être adressée. On remarquera que leur logique est donc différente de la nôtre. Ils souhaitent une spécificité élevée, car ils se prévalent d'avoir un algorithme sûr, dénué de fausse alerte (faux positif adressé par erreur à un ophtalmologue) là où nous souhaitons, en Occident, privilégier la sensibilité pour ne pas risquer de méconnaître une RD. Cela peut s'expliquer par une culture et une particularité des terrains d'exercice différentes (accès aux soins, coût de la santé pour la population...).

Leur étude a, en tout état de cause, conclu à la faisabilité de ce mode de dépistage. Ainsi de plus en plus de centres spécialisés s'équipent du matériel nécessaire à travers le pays, la stratégie étant désormais validée sur le plan national : l'IA peut réaliser un premier tri et adresser seulement les cas positifs à un ophtalmologue.

La Thaïlande est quant à elle en train de définir une stratégie de dépistage national semi-automatisé par l'IA développé par Google, après l'échec des campagnes de dépistage humain organisé dans le pays (50% d'observance en 2013) (140). Leur dernière étude a permis de valider une meilleure sensibilité de l'algorithme dans le pays comparativement à leurs ophtalmologues nationaux (0.97 vs. 0.74, $p < 0.001$) pour une spécificité faiblement inférieure (0.96 vs. 0.98, $p < 0.001$). Les auteurs sont conscients que le taux de sensibilité des médecins thaïlandais n'est pas au niveau espéré et que la formation de ceux-ci doit être améliorée (Le gold standard était assuré par la relecture d'experts internationaux en rétine).

L'étude recommande que l'IA module son résultat en fonction des spécificités territoriales en ce qui concerne les RD à adresser à un ophtalmologue. Elle souhaite que l'algorithme adresse les patients à un stade déjà sévère pour les endroits en manque d'ophtalmologues, ou plus précocement dans l'histoire de la pathologie pour les zones plus densément dotées en spécialistes. On notera également que les résultats de l'IA sont excellents en sachant que l'algorithme Google n'avait pas été entraîné a priori sur une population asiatique.

Une étude de Singapour a justement comparé le coût de revient entre la stratégie de dépistage purement humaine, la purement automatisée sans relecture humaine et la semi-automatisée où l'IA est une aide diagnostique et élimine les cas négatifs, l'ophtalmologue relisant seulement les clichés que l'algorithme classe comme RD à adresser. Pour leur système de santé, la première stratégie revient à 77 dollars par patients par an, la deuxième à 66 dollars par an tandis que la semi-automatisée est la plus économique avec 62 dollars. Ainsi pour une population de 1 millions de diabétiques, une économie de 4 dollars peut vite devenir une manne de millions de dollars (141). Pour en arriver à ce résultat, ils ont utilisé un modèle de Markov à partir de données de 39 006 patients diabétiques en comparant les coûts des consultations, des soins engendrés, les coûts des logiciels, et l'efficacité de chaque stratégie (sensibilité, spécificité). Ils expliquent leur résultat par le fait que l'IA évite à l'humain de perdre 2 minutes à interpréter un cliché

là où la lecture de celui-ci est instantanée avec l'algorithme. Cependant la stratégie complètement automatisée est plus chère car le taux de faux positif est plus important chez la machine ce qui entraîne plus de consultations inutiles, évitées par la relecture précoce de l'expert. Les auteurs insistent sur le fait que ce modèle est dépendant des tarifs propres à chaque pays (consultation, dépistage, coût de l'IA...) et que la validité externe de leur travail n'est pas forcément applicable pour un autre pays.

Concernant l'OCT, l'IA utilisant des algorithmes explicites sont déjà utilisées depuis longtemps, notamment responsables de la segmentation des coupes. Pour fournir un diagnostic fiable cependant, il est nécessaire de faire appel aux algorithmes d'apprentissage plus récents.

En collaboration avec l'entreprise DeepMind de Google, l'Institut d'ophtalmologie de l'University College de Londres et le Moorfields Eye Hospital (Londres) a présenté une étude en 2018 évaluant un algorithme capable d'analyser un examen d'OCT et d'en déduire le degré d'urgence (urgent, semi-urgent, dans les délais classiques, observation seule) de la prise en charge associée à une probabilité de diagnostic.

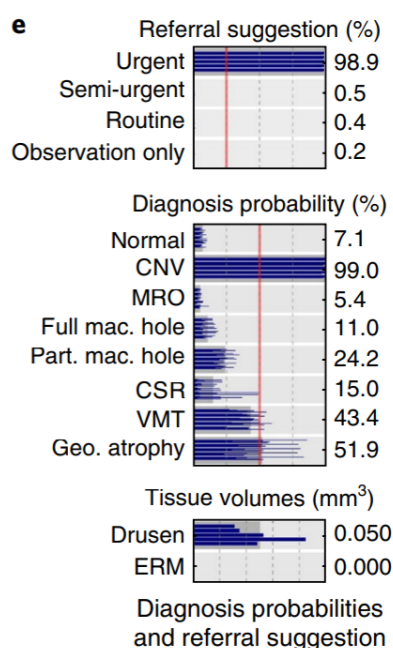


Figure 52 Visualisation du résultat donné par l'algorithme DeepMind après analyse d'une coupe OCT dans l'étude.(142)

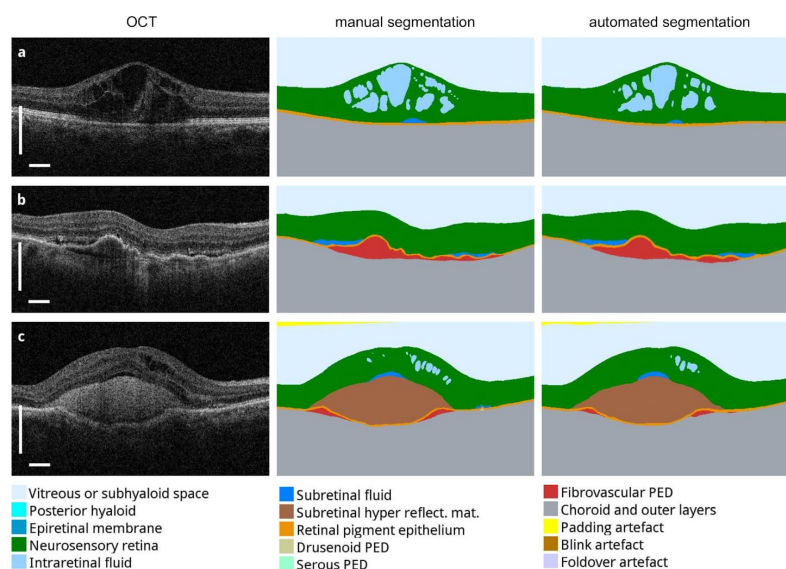


Figure 53 Exemple de segmentation d'une coupe OCT réalisée par un algorithme utilisant un réseau de neurones comparativement à une segmentation humaine (142)

Après un entraînement sur 14884 scans, DeepMind a été testé sur un ensemble de 997 coupes OCT variées (normal, DMLA, OMD, etc...). Ses résultats sont comparés à la décision de 8 professionnels (4 ophtalmologues spécialistes en rétinie et 4 optométristes)

Le gold standard pour le classement final était réalisé rétrospectivement en fonction de l'évolution de la pathologie (142). Les résultats ont montré une non infériorité des recommandations faites par l'algorithme.

On peut donc anticiper que, demain, l'IA pourra détecter en autonomie la survenue de l'œdème maculaire diabétique.

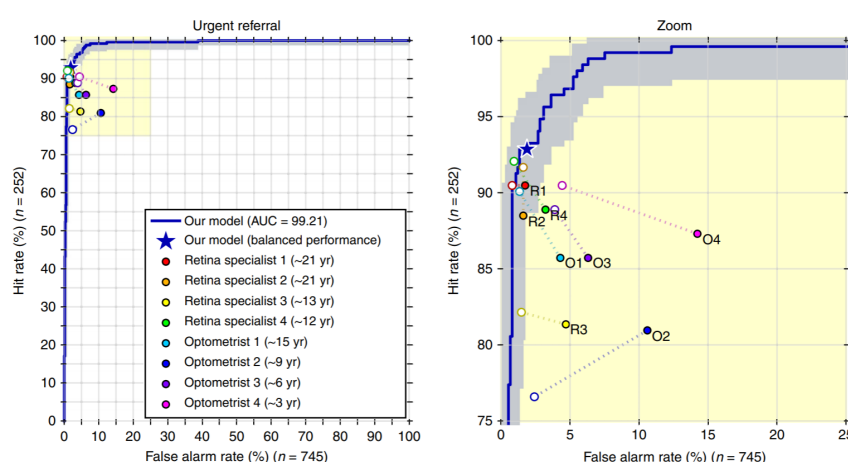


Figure 54 Aire sous la courbe des résultats de l'algorithme comparativement aux humains dans le classement des OCT nécessitant une prise en charge urgente (principalement néovaisseau choroïdien). Pour les humains, les ronds colorés pleins représentent la décision prise après analyse de l'OCT seulement, les ronds vides après lecture du dossier médical, du fond d'œil et de l'OCT. On notera qu'après analyse complète du cas, l'humain se rapproche de l'intervalle de confiance de la décision de l'IA.

Un autre usage du Deep Learning, en dehors du diagnostic, est l'aide potentielle apportée dans la réhabilitation dans la vie de tous les jours aux patients atteints de cécité, en post RD proliférante compliquée par exemple. Les IA étant maintenant capables de reconnaissance visuelle très poussée de l'environnement, on peut imaginer une solution permettant de retranscrire en audio les images captées par une caméra portée par un patient en état de cécité. Le projet Horus de la société Eyra, initié en 2016, ou plus récemment en 2021 l'assistant visuel Nelo du Français Olivier Huet (société Perception) sont prometteurs mais tardent à être commercialisés (143) (144). Cela pourrait aider en tout d'état de cause, dans le futur proche, les mal-voyants ou les aveugles à s'orienter et à reconnaître des personnes ou des objets.

Considération éthique/limite de l'IA

Le point de singularité technologique n'est pas encore d'actualité, ce jour de basculement technologique ou l'intelligence générale de la machine, consciente de sa propre existence, surpassera celle de l'homme. Certes d'un point de vue scientifique, il ne semble pas y avoir d'obstacle théorique à sa survenue, si on considère que la conscience humaine possède seulement un support physique, biologique. Mais ce jour semble lointain, et les considérations éthiques de cet événement ne seront pas débattus en profondeur ici.

D'autres considérations sont néanmoins à l'ordre du jour, à propos de l'IA faible. Aujourd'hui réalité, sa capacité analytique est en progrès constant.

En premier lieu, avec le Deep Learning, comme nous l'avons vu, l'IA va pendant son entraînement générer elle-même son algorithme de résolution en faisant varier le poids de chaque nœud dans chaque couche de neurone pour faire concorder les réponses données avec les réponses attendues. De plus à chaque couche de neurone, le niveau d'abstraction augmente. Aussi, même si décortiquer ce genre de réseau profond est théoriquement réalisable ; on nomme cette science interprétabilité et explicabilité des réseaux de neurones artificiels ; ceci demande énormément de temps et de ressources pour déconstruire pas à pas la logique de l'IA. Ainsi la compréhension du système reste pour le moment opaque, on y réfère souvent sous le terme « boîte noire ». Il est donc difficile d'expliquer tel ou tel choix de l'IA de façon logique, ce qui peut être un frein en médecine. Qui est responsable en cas d'erreur : l'IA ou le médecin ? Le médecin doit-il se fier aveuglement aux prédictions d'une machine dont la logique lui échappe ? Dans le dépistage de la RD les IA doivent donc essayer dans le futur de rendre intelligible leur logique. Dans cette optique on a vu apparaître en 2021 le concept d'une nouvelle IA, explAIIn, qui serait entraîné non pas à dépister et à classer la RD selon la méthode classique du Deep Learning, mais à retrouver les lésions primaires et pouvoir les nommer, pour en conclure la sévérité, comme le ferait un humain (145). Ainsi le médecin aurait accès aux lésions découvertes par la machine au lieu d'un diagnostic brut.

Deuxièmement, les bases de données sont les clefs de la fabrication de l'algorithme de résolution. Il faut donc qu'elles soient représentatives de la population pour augmenter la validité de l'IA et diminuer les biais. Aujourd'hui, en l'absence de ces bases de données

parfaitement représentatives, il faut toujours considérer les résultats donnés par l'IA avec circonspection, ayant connaissance de cette limite. De plus, l'IA sera incapable de diagnostiquer avec fiabilité une pathologie qui ne lui a jamais été présentée ou trop peu. Elle ne peut donc être employée dans le cas des pathologies rares, peu documentées ou peu photographiées, car les bases de données n'en comportent pas. De plus, dans certains cas, les experts eux même peuvent ne pas être d'accord, la médecine n'étant pas une science exacte, et donc la labellisation d'une donnée peut être soumise à interprétation.

Concernant ces bases de données, des questions éthiques et légales se posent. Les informations collectées sont des données de santé et elles sont communiquées à des sociétés privées afin de développer leur algorithme dans un but commercial. Les médecins peuvent donc être réticents à coopérer avec ces sociétés privées à but lucratif en leur transmettant gratuitement leur propre base de données, anonymisées bien entendues. En tout état de cause, la loi française est claire, le patient n'est pas autorisé à vendre ses propres données de santé à une société tiers (146). Le partage des informations de santé sera un enjeu majeur dans le développement et la construction des bases de données immenses nécessaires afin d'affiner les algorithmes d'aide au diagnostic basés sur les réseaux de neurones artificiels profonds.

Une question ayant une grande résonance aujourd'hui est la suivante : l'IA va-t-elle remplacer le médecin ophtalmologue à plus moins long terme ? Présentée comme la 4^{ème} révolution industrielle, après la mécanisation, la production de masse et l'automatisation, l'IA va certainement produire des remaniements dans nombre de métiers. Une étude d'Oxford en 2017 a estimé que 43% de 702 métiers recensés seraient menacés à moyen terme aux Etats-Unis (147). Comme pour le déploiement de la télémédecine cependant, il semble que l'IA développée par les sociétés informatiques n'ait pas cette ambition démesurée à court ou moyen terme concernant notre métier. Elle se destine plutôt à devenir un outil complémentaire dans l'arsenal du médecin, afin d'améliorer in fine la santé visuelle globale de la population. Elle n'a tout d'abord pas la capacité actuellement, elle est entraînée sur des scenarii reproductibles, d'où sa grande difficulté à gérer l'imprévu. De plus les sociétés commerciales qui la développent ne voudront pas, en tout état de cause, porter la responsabilité en cas de diagnostic erroné. Le jour où l'IA remplacera complètement l'ophtalmologue, la majorité de la société toute entière aura déjà

fait sa mue. Et nous le répétons, les patients restent (pour l'heure) attachés au contact réel et craignent la déshumanisation de la médecine comme le prouvent les enquêtes d'opinion réalisées chaque année. En somme, le métier va indéniablement évoluer, mais l'évolution et le progrès en IA étant inévitables, il faudra surtout s'acharner à guider cette marche en avant. Nous devons être vigilants pour que l'éthique et l'intérêt du patient restent au centre des préoccupations, au-delà des intérêts économiques propres aux sociétés commerciales, car des dérives existeront certainement. Mais si une certaine tâche est authentiquement mieux réalisée par une machine, il nous faudra nous recentrer sur les activités qui restent (pour combien de temps ?) l'apanage de l'humain (gestes techniques, chirurgie, pathologie rare, contact et relation médecin malade etc..).

D'un point de vue philosophique, l'étude critique des progrès apportés par la science se nomme l'épistémologie. Ces réflexions théoriques sont sources de débats sur le futur d'une société où la machine prendrait de plus en plus de place, jusqu'à supplanter l'homme. Qu'est l'avenir d'une espèce qui serait dépassée par sa propre création ? Assisterons-nous à un changement de rapport de force où les humains serviraient les machines ? Y-a un-t-il un risque à nous dénaturer ? Ma conviction personnelle, pour paraphraser Sartre, est que l'homme est et sera condamné à être libre. Il prendra ses décisions en fonction du contexte, sans certitude sur le bienfondé de ses entreprises, mais toujours librement, et sans excuse possible. Pour ne pas se laisser dicter son comportement par une entité autre, les bonnes questions au bon moment se devront d'être posées. Mais chaque génération décidera en son temps de ce qu'elle veut que l'humanité devienne. Et in fine la race humaine, se définissant fondamentalement par ses choix, saura s'adapter au prochain défi de l'évolution sans s'aliéner par la présence d'une intelligence artificielle toujours plus prégnante, car telle est sa nature même. Notre existence précède notre essence. Elle ne peut se corrompre elle-même dans le sens où elle se définit et se réinvente en permanence par le propre de ses actions et décisions. Si nous avons su créer une telle IA, c'est que telle était notre nature. Et peut-être demain, au-delà de l'opposition IA/Humanité, deviendrons-nous des humains augmentés, aux facultés physiques et mentales décuplées par la rencontre de la machine et de notre biologie ?

Sans anticiper aussi loin, tout l'enjeu des prochaines années en médecine et dans le diagnostic et le suivi de la RD sera d'encadrer cet outil magnifique, capable de traiter des sommes de données considérables à une vitesse surhumaine, en connaissant son principe de fonctionnement pour cerner ses limites, et savoir l'utiliser à bon escient pour en tirer le meilleur, tout en gardant l'intérêt du patient au centre des considérations.

Etude Pilote DiabEyeIA

L'étude pilote DiabEyeIA consiste à réaliser un dépistage systématique de la RD chez les patients diabétiques se présentant à leur officine habituelle pour se voir délivrer leur traitement anti diabétique. Cette étude prend place dans 12 officines réparties sur la région normande, c'est-à-dire 10 en Basse-Normandie et 2 en Haute-Normandie. Ce dépistage sera réalisé par le pharmacien, par la réalisation de rétinophotographies interprétées par IA. En cas de découverte de RD, les clichés sont relus par un ophtalmologiste du CHU de Caen et en fonction de la sévérité de l'atteinte, la prise en charge adéquate sera initiée. Le début de l'étude est prévu pour 2021, les financements étant acquis. Les dernières formalités réglementaires sont en cours de finalisation.

Rationnel de l'étude

A. Justification

En partant des chiffres de santé publique en France les plus récents disponibles, soit ceux de 2018, on rappelle que seulement 64% des patients diabétiques bénéficient d'une consultation ophtalmologique bisannuelle. Pour rappel, il existe environ 3.5 millions de diabétiques, dont on estime qu'environ 1/3 est atteint de RD en France. Le problème est que la RD reste asymptomatique très longtemps et que son taux de dépistage stagne, malgré le fait que ce dépistage possède un niveau de preuve solide en sa faveur, tant sur le plan de la santé visuelle que sur le plan économique. Au vu du potentiel cécitant de la RD si elle n'est pas découverte, et a fortiori traitée à temps, et du surcoût pour la société que ce diagnostic tardif engendre, ce chiffre de 64% n'apparaissait pas satisfaisant.

Compte tenu des freins identifiés (difficulté d'obtention d'un rendez-vous, long délai, éloignement du domicile, durée du rendez-vous) pour le dépistage de la RD (148) s'attacher à développer des méthodes innovantes, plus rapides et plus largement accessibles basées sur les plus récentes technologies disponibles apparaît être une solution rationnelle pour faciliter le dépistage de la RD. L'existence même de la télémédecine est une réponse à ces différents freins. Dans les différentes études qui ont évaluées les algorithmes d'IA dans ce dépistage, il n'y en a pas, à notre connaissance, qui se propose de dépister le patient directement en pharmacie. Ceci est une solution concrète pour capter un maximum de patients, sans démarche supplémentaire pour lui, car le dépistage est effectué à l'occasion de son renouvellement d'ordonnance.

B. Objectif

Objectif Primaire

Démontrer que le dépistage par rétinophotographie équipée d'intelligence artificielle chez le pharmacien améliore le taux de dépistage de la rétinopathie diabétique.

Objectif secondaire

- Evaluer la faisabilité humaine, technique et financière de ce mode de dépistage innovant à l'échelle du territoire normand
- Evaluer la satisfaction des pharmaciens et des patients à l'utilisation du dispositif
- Evaluer la capacité à identifier des lésions de rétinopathie diabétique à des stades plus précoces que la stratégie de dépistage conventionnelle

C. Critères de jugements

Critère de jugement principal

Mesure du taux de dépistage de la rétinopathie diabétique dans les 12 pharmacies participantes comparativement aux données de la littérature (64%). Le taux de dépistage sera calculé de la façon suivante : $\text{Nombre de patients dépistés} / (\text{nombre de patients dépistés} + \text{nombre de patients ayant refusé le dépistage})$

Critères de jugement secondaire

- Mesure du taux de clichés interprétables
- Coût du dépistage par patient
- Mesure par questionnaire de la satisfaction et de l'adhésion patient et pharmacien avec principales causes d'échec ou de refus
- Mesure du taux de dépistage de RD chez l'ophtalmologue (déclaratif sur formulaire) au sein de la population dépistée en pharmacie au cours de l'étude.

Méthodologie

A. Matériel et Méthode

DiabEyeIA est une étude prospective, multicentrique, non comparative, non randomisée, ouverte d'une durée de 6 mois, dans 12 officines du territoire normand (5 dans le Calvados, 3 dans la Manche, 2 dans l'Orne et 2 en Seine Maritime) proposant un dépistage de la rétinopathie diabétique à tout patient diabétique reconnu sur la base de leur traitement et qui fréquente régulièrement leur pharmacie.

Les pharmaciens seront donc les investigateurs de cette étude, l'investigateur principal étant le Pr Joubert du service d'endocrinologie du CHU de Caen. Le promoteur de cette étude est le CHU de Caen.

Les pharmacies participantes pourront proposer à tous leurs patients diabétiques de bénéficier de ce dépistage à l'occasion du renouvellement de leur ordonnance. Si le patient refuse, il est dans ce cas répertorié sur le listing des refus/impossibilité de participer à l'étude DIABeyeIA (Annexe 5). S'il accepte, après consentement écrit et renseignement du formulaire de données cliniques (annexe 2), il bénéficiera du dépistage de la rétinopathie diabétique par la réalisation de 2 rétinophotographies par œil à l'aide d'un rétinographe portable non mydriatique. L'examen sera immédiatement interprété par le système d'intelligence artificiel de la société ADCIS (OPHTAI) par l'intermédiaire d'une interface mis à la disposition des pharmaciens.

Dans tous les cas, un courrier sera remis au patient par son pharmacien, à destination du médecin traitant et de l'ophtalmologue habituel, afin de les informer de ce dépistage et de son résultat, mais le pharmacien ne transmet pas le résultat directement au patient.

Les 12 pharmacies ont été choisies par l'URPS pharmaciens sur la base du volontariat pour être équipées du dispositif loué par la société ADCIS, mais devront donner préalablement leur accord pour participer au projet d'étude. Les 12 pharmacies sélectionnées recevront une formation à l'utilisation du dispositif par la société ADCIS et le fabricant du rétinographe portable.

Les données numériques (2 photos par œil soit 4 par patient) seront stockées dans un système informatique de type « cloud » et un système de re-lecture par un ophtalmologue investigateur de l'étude (service d'ophtalmologie CHU Caen) sera mis en place afin d'établir ou non la présence d'une rétinopathie diabétique. Les renseignements médicaux utiles à l'analyse seront collectés via un formulaire complété par le patient avec l'aide du pharmacien après recueil du consentement écrit du patient.

La pseudonymisation des photos sera réalisée afin de garantir l'anonymat des données au moment de leurs interprétations.

Le pharmacien joindra une numérisation de l'ordonnance de chaque patient afin de compléter leurs caractéristiques individuelles sur le plan thérapeutique. Pour chaque patient inclus, le pharmacien sera rémunéré ainsi que la société ADCIS fournissant le rétinophographe et l'analyse par Intelligence artificielle.

Des questionnaires de satisfaction seront remplis par les pharmaciens participants à l'issue de l'étude et par les patients à l'issue du dépistage. (Annexe questionnaire 4 et 5).

A la fin de l'étude, nous calculerons le taux de dépistage effectif du modèle.

B. Critères d'inclusion et de non inclusion

Pour être éligibles, les sujets doivent vérifier l'ensemble des critères d'inclusion définis :

- Patients adultes
- Sous traitement antidiabétique (antidiabétiques oraux, analogues du GLP1 injectables et insuline)
- Clients réguliers de la pharmacie d'officine, au moins 3 visites
- Consentants à participer à l'étude (nécessité du recueil de la signature du consentement éclairé)

Les sujets vérifiant un seul des critères de non-inclusion ne peuvent être éligibles pour participer à la recherche :

- Patient en incapacité de lire, d'écrire ou de donner son consentement

C. Mise en place pratique et méthodologie statistique

Au cours de la visite du patient à son officine, voici le plus déroulement plus précis des opérations :

Le patient est informé des modalités, des contraintes et des risques prévisibles de l'essai.

Le pharmacien lui remet la lettre d'information et lui demande de signer un consentement éclairé. Le patient pourra obtenir toutes les réponses à ses questions de la part de l'investigateur avant toute procédure d'évaluation. Si le patient donne son accord de participation, il inscrira son nom ainsi que l'investigateur sur le formulaire de consentement, puis ils dateront et signeront ce formulaire en deux exemplaires. Un exemplaire du consentement sera conservé par l'investigateur pour une durée de quinze ans après la fin de l'essai. Un autre exemplaire sera remis au patient.

Après vérification des critères d'inclusions et de non inclusions, 2 scénarii sont possibles :

➔ Soit le patient refuse : il est dans ce cas répertorié sur le listing des refus/impossibilité de participer à l'étude DIABeyelA (Annexe 5).

➔ Soit le patient accepte : après consentement écrit et renseignement du formulaire de données cliniques (annexe 2), il bénéficiera du dépistage de la rétinopathie diabétique par la réalisation de 2 rétinophotographies par œil. L'examen sera immédiatement interprété par le système d'intelligence artificiel de la société ADCIS, par l'intermédiaire d'une interface mis à la disposition des pharmaciens. En quelques secondes, le système répondra :

- Qu'il n'y a pas de rétinopathie diabétique. Un courrier type sera remis au patient par son pharmacien, à transmettre au médecin traitant ainsi qu'à l'ophtalmologue habituel, à l'occasion.
- ou que les images sont douteuses et dans ce cas, elles seront relues par un expert ophtalmologue qui transmettra son interprétation au patient via le pharmacien. En cas d'atteintes menaçantes, une convocation sera envoyée au patient via son pharmacien, pour proposer une consultation rapide en ophtalmologie au CHU de Caen ou auprès de l'ophtalmologue traitant.

Dans tous les cas, un courrier sera remis au patient par son pharmacien, à destination du médecin traitant et de l'ophtalmologue habituel, afin de les informer de ce dépistage et de son résultat. Le résultat n'est pas transmis directement par le pharmacien au patient.

Il sera demandé aux pharmaciens participant de proposer cette étude à tous leurs patients diabétiques au fil de l'eau jusqu'à dépister 25 patients.

En effet, 226 patients sont nécessaires pour montrer que le dépistage par rétinographie équipé d'intelligence artificielle chez le pharmacien améliore de 10% le taux de dépistage des diabétiques, comparé à un taux théorique de 64%, en prenant une puissance de 90% et un risque alpha bilatéral de 5%. En raison de l'incertitude du taux d'amélioration (+10%), nous prévoyons d'inclure 300 patients.

En nous basant sur la population Bas-Normande (1500000), sa densité en pharmacie (480), ainsi que la prévalence du diabète en France (4.6%), nous prévoyons une moyenne de 146 patients diabétiques par pharmacie participant à l'expérimentation.

Etant donné que 12 pharmacies vont participer à l'expérimentation, chaque pharmacie devra inclure environ 25 patients ($25 \times 12 = 300$). Ainsi, les pharmacies possèdent largement le potentiel de recrutement.

Pour le critère de jugement principal, nous calculerons notre taux de dépistage grâce à la formule :

$$\frac{\text{nombre de patients dépistés}}{(\text{nombre de patients dépistés} + \text{nombre de patients sur le listing de refus ou impossibilité de dépistage})} \times 100$$

Pour répondre à notre objectif principal, nous le comparerons au 64% de la littérature.

Des questionnaires de satisfaction seront remplis par les pharmaciens participants à l'issue de l'étude et par les patients à l'issue du dépistage. (Annexe questionnaire 4 et 5). Ceci nous permettra de répondre à l'objectif secondaire correspondant.

Nous comparerons le taux de dépistage déclaratif de nos patients lors du recueil de données (annexe 2) avec le taux effectif dans notre étude afin de savoir si notre proposition de mode de dépistage peut dépister à un stade plus précoce que la méthode classique.

Enfin, nous serons à même en fin d'étude de répondre à la faisabilité technique et humaine de cette approche en atteignant notre objectif. Nous pourrions décrire les difficultés rencontrées, les principaux motifs de refus ou d'échec du dépistage, ainsi que notre taux de clichés interprétables. La rémunération des pharmaciens et celle des sociétés commercialisant les rétinophotographes portables et le logiciel d'analyse au cours de notre étude par IA nous permettra d'estimer le coût que représenterait un déploiement généralisé de notre étude pour répondre à la faisabilité économique.

Aspect technique et financier

A. Financement

Nous avons déjà évoqué les coûts que peut représenter la mise en place de la télémedecine. De plus il faut y adjoindre les coûts intrinsèques à l'étude.

Le CHU de Caen assure la promotion du projet, fournit le support méthodologique et prend en charge la publication des résultats. Le reste des coûts structurels comprend les frais de stockage dans le cloud et de génération de base de données, l'interaction avec la pharmacie, le stockage des informations sur la pharmacie dans la base de données, l'envoi de mail suite à un examen et l'interaction avec le fabricant du rétinographe.

Concernant les coûts d'utilisation, le modèle retenu a été celui du 'pay per use'. Ainsi, pour chaque patient inclus, le pharmacien sera rémunéré à hauteur de 23 euros et la société ADCIS fournissant le rétinophographe et l'analyse par Intelligence Artificielle à hauteur de 4 euros.

Le budget nécessaire à la mise en place de cette étude n'est ainsi pas négligeable. Ce projet a reçu un financement régional qui complètera la mise de fond des industriels impliqués (ADCIS, créateur du logiciel d'IA OPTOMED, fabricant des rétinographes et THEA, qui a montré son intérêt pour soutenir ce projet en tant que laboratoire français leader en ophtalmologie en Europe.

B. Protection des données

Comme indiqué plus haut dans cette thèse, la sécurité des données est primordiale en télémedecine. Des cas de piratage sont légions. Ainsi voici le circuit des données qui a été imaginé pour répondre à cette problématique et préserver l'anonymat des participants à cette étude dans le cadre des RGPD :

Le pharmacien investigateur effectue les deux photos de chaque œil à l'aide du rétinographe et les pseudonymise à l'aide du numéro du patient (premier chiffre = centre ; deuxième chiffre = numéro patient dans le centre. Exemple : patient 1-13 = 13ème patient

du centre investigateur N°1) et des 3 premières lettres du nom et 2 premières lettres du prénom.

Les images ainsi pseudonymisées sont analysées par le module d'IA puis les images, ainsi que l'analyse IA, sont entreposées dans un cloud géré par la société ADCIS.

Si les images sont interprétées comme non pathologiques, un courrier type est remis au patient à destination de son ophtalmologue traitant et de son médecin traitant.

Les images interprétées comme pathologiques seront envoyées, toujours pseudonymisées, par tunnel VPN vers le PACS du CHU de Caen, taggées de telle manière que les ophtalmologues experts puissent facilement les consulter.

L'expertise ophtalmologique concernant ces images sera consignée dans une fiche de téléexpertise de la plateforme THERAP'E (plateforme de télémedecine validée par l'ARS Normandie), toujours pseudonymisée selon les règles décrites ci-dessus.

Cette fiche permettra de générer une synthèse et une conduite à tenir, écrite par l'ophtalmologue expert, qui sera envoyée au pharmacien investigateur responsable du patient qui se chargera de transférer l'information au patient qu'il pourra identifier grâce à la liste de correspondance qu'il tiendra de manière prospective dans son centre. A cette conduite à tenir, un courrier sera joint à l'attention du médecin traitant et le cas échéant à l'ophtalmologue traitant que le patient devra leur remettre.

C. Comité de Protection des Personnes

Notre étude rentre dans le champ de la Recherche Interventionnelle à Risques et Contraintes Minimales (RICCM). Nous devons donc solliciter l'avis d'un Comité de Protection des Personnes (CPP). (La « Recherche interventionnelle à risques et contraintes minimales » au sens de l'article L. 1121-1 du code de la santé publique (loi n°2012-300 du 5 mars 2012 et de son décret d'application n° 2016-1537 du 16 novembre 2016) sera soumise à l'avis d'un CPP). A cette fin le Curriculum Vitae des investigateurs et le marquage CE du dispositif d'IA ont été adjoints au protocole de notre étude, au Formulaire de consentement et au Document d'information à l'attention du participant à la recherche. Tous ces documents sont ensuite présentés au CPP qui instruit le dossier pour validation

Conclusion

Aujourd'hui, grâce aux avancées technologiques incluant l'amélioration des moyens de communication ayant permis l'éclosion de la télémédecine et le développement des intelligences artificielles autorisées par les progrès informatiques, de nouveaux outils sont à la disposition des ophtalmologues dans le diagnostic et le suivi de pathologies comme la rétinopathie diabétique. Certains ont déjà fait leurs preuves et commencent à être utilisées en pratique courante (logiciel d'interprétation automatique des rétinophotographies) tandis que d'autres sont encore à l'étude (diagnostic OCT de l'OMD). Il faudra apprendre à s'approprier ces nouveaux outils, et connaître leur principe de fonctionnement pour guider leur utilisation future, éviter leur mésusage et garantir la sécurité des données, afin que l'intérêt du patient soit toujours au centre du soin.

Si l'on parvient à éviter ce mésusage, l'impact de l'utilisation de ces technologies ne pourra qu'être bénéfique, particulièrement dans le dépistage de la RD.

L'étude DiabEyeIA qui va débiter est un très bon exemple de modèle combinant ces nouvelles technologies. Les appliquer en pratique réelle sera un bon moyen d'éprouver toute la théorie exposée ici. Nous espérons que les résultats du dépistage de la RD analysé par IA organisée en pharmacie permettront une amélioration du suivi des patients diabétiques et une baisse du coût pour la société du suivi de cette pathologie, avec à terme, une diminution des complications oculaires de la RD par une prise en charge la plus précoce possible.

Bibliographie

1. Cheung N, Mitchell P, Wong TY. Diabetic retinopathy. 2010;376:13.
2. Sabanayagam C, Banu R, Chee ML, Lee R, Wang YX, Tan G, et al. Incidence and progression of diabetic retinopathy: a systematic review. *Lancet Diabetes Endocrinol.* févr 2019;7(2):140-9.
3. Yau JWY, Rogers SL, Kawasaki R, Lamoureux EL, Kowalski JW, Bek T, et al. Global Prevalence and Major Risk Factors of Diabetic Retinopathy. *Diabetes Care.* 1 mars 2012;35(3):556-64.
4. Jones S, Edwards RT. Diabetic retinopathy screening: a systematic review of the economic evidence. *Diabet Med.* mars 2010;27(3):249-56.
5. Santé Publique France. Diabète [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/diabete/la-maladie/#tabs>
6. Fosse-Edorh S. Le poids des complications liées au diabète en France en 2013. Synthèse et perspectives. :7.
7. Delcourt C, Massin P, Rosilio M. Epidemiology of diabetic retinopathy: expected vs reported prevalence of cases in the French population. *Diabetes Metab.* déc 2009;35(6):431-8.
8. Chamard C, Daien V, Erginay A, Gautier J-F, Villain M, Tadayoni R, et al. Ten-year incidence and assessment of safe screening intervals for diabetic retinopathy: the OPHDIAT study. *Br J Ophthalmol.* mars 2021;105(3):432-9.
9. Santé Publique France. Le poids du diabète en France Synthèse épidémiologique [Internet]. 2018 nov p. 8. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/diabete/documents/rapport-synthese/le-poids-du-diabete-en-france-en-2016.-synthese-epidemiologique>
10. Massin P, Paques M. Épidémiologie et physiopathologie de la rétinopathie diabétique *Encyclopédie Médico Chirurgicale* 2010. 2010.
11. Brownlee M. The pathobiology of diabetic complications: a unifying mechanism. *Diabetes.* juin 2005;54(6):1615-25.
12. Wang W, Lo A. Diabetic Retinopathy: Pathophysiology and Treatments. *Int J Mol Sci.* 20 juin 2018;19(6):1816.
13. HAS. Rapport : Dépistage de la rétinopathie diabétique par lecture différée de photographies du fond d'œil [Internet]. 2010. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2011-09/argumentaire_-_depistage_de_la_retinopathie_diabetique_par_lecture_differee_de_photographies_du_fond_doeil.pdf
14. HAS. Dépistage de la rétinopathie diabétique par lecture différée de photographies du fond d'œil [Internet]. 2011. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_1028305/fr/depistage-de-la-retinopathie-diabetique-par-lecture-differee-de-photographies-du-fond-d-oeilhttps://www.has-sante.fr/jcms/c_1028305/fr/depistage-de-la-retinopathie-diabetique-par-lecture-differee-de-photographies-du-fond-d-oeil
15. Société Française d'Ophtalmologie. RÉTINOPATHIE DIABÉTIQUE [Internet]. 2010. Disponible sur: https://www.sfo.asso.fr/files/files//17_RD_2010%5B1%5D.pdf
16. Wilkinson CP, Ferris FL, Klein RE, Lee PP, Agardh CD, Davis M, et al. Proposed international clinical diabetic retinopathy and diabetic macular edema disease severity scales. *Ophthalmology.* sept 2003;110(9):1677-82.
17. Décret 2010-1229 relatif à la télémedecine [Internet]. oct 19, 2010. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000022932449>
18. Barold SS. Willem Einthoven and the birth of clinical electrocardiography a hundred years ago. *Card Electrophysiol Rev.* janv 2003;7(1):99-104.
19. Cipolat C, Geiges M. The history of telemedicine. *Curr Probl Dermatol.* 2003;32:6-11.
20. SNOF. LES BESOINS EN OPHTALMOLOGISTES D'ICI 2030. Disponible sur: <https://www.snof.org/docs/anim/fichiers/assets/seo/page61.html>

21. Rapport Cour des Comptes. Les soins visuels : une prise en charge à réorganiser [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://www.ccomptes.fr/system/files/2018-10/RALFSS-2018-07-soins-visuels.pdf>
22. SNOF. 2020 : ophtalmologie : les délais de rdv en baisse d'une semaine depuis un an. Disponible sur: <https://www.snof.org/2020-ophtalmologie-d-lais-rdv-en-baisse-dune-semaine-depuis-un>
23. SNOF. 2018 Etude de la Drees : une réduction des délais encourageante. Disponible sur: <https://www.snof.org/2018-etude-de-la-drees-une-r%C3%A9duction-des-d%C3%A9lais-encourageante>
24. Dr Stéphane Bach. RDV Ophtalmologues : délais d'attente par département et par ville. juin 2020; Disponible sur: <https://www.le-guide-sante.org/actualites/sante-publique/trouver-un-ophtalmologue-queelles-solutions-pour-2020-episode-2>
25. HAS. Qualité et sécurité des actes de téléconsultation et de téléexpertise [Internet]. 2019 mai. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2019-07/guide_teleconsultation_et_teleexpertise.pdf
26. Agence du Numérique en Santé. Référentiel fonctionnel socle pour les logiciels de télémedecine [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://esante.gouv.fr/actualites/publication-du-referentiel-fonctionnel-de-telemedecine>
27. CNIL. Télémédecine : comment protéger les données des patients ? [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://www.cnil.fr/en/node/24033>
28. Legifrance. Article L1111-8 du code la santé publique [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000033862549/
29. CNIL. Guide de sécurité des données personnelles [Internet]. 2018. Disponible sur: https://www.cnil.fr/sites/default/files/atoms/files/cnil_guide_securite_personnelle.pdf
30. Ministères des Solidarités et de la Santé. Solutions numériques de télémedecine recensées par le ministère [Internet]. 2020. Disponible sur: https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/xlsx/editeurs_solutions_de_telemedecine.xlsx
31. Maté Strehö, Romain Lezé. Matériel d'imagerie du segment postérieur. 2015; Disponible sur: <https://www.cahiers-ophtalmologie.fr/media/3a616e42541417b4b186a7d4e6409070.pdf>
32. Normandie e-santé. Découvrez les nouvelles modalités d'accès à Therap-e [Internet]. 2021. Disponible sur: <https://www.normand-esante.fr/point-com/point-actu/decouvrez-les-nouvelles-modalites-d-acces-a-therap-e,3065,3343.html?args=Y29tcF9pZD0xODYxJmFjdGlvbj12aWV3X25ld3NfZGV0YWlsJmlkPTI0NzNmY29tcG9uZW50PSZtb2R1bGU9Jnw=>
33. Legifrance. Décision du 10 juillet 2018 de l'Union nationale des caisses d'assurance maladie relative à la liste des actes et prestations pris en charge par l'assurance maladie [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037341236?r=u7lfSmIrT2>
34. Legifrance. Décret n° 2018-788 du 13 septembre 2018 relatif aux modalités de mise en œuvre des activités de télémedecine [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000037399738/>
35. Caisse Nationale d'Assurance Maladie. Généralisation de la téléconsultation en France [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/sites/default/files/2018-09-12-dp-generalisation-teleconsultation-france-15-septembre-2018.pdf>
36. GIE SESAM-Vitale. TOUT savoir sur ADRI [Internet]. Disponible sur: <https://www.sesam-vitale.fr/adri>
37. Assurance Maladie IP-. TOUT SAVOIR SUR LA TELE-EXPERTISE EN 14 QUESTIONS. FEVRIER 2019; Disponible sur: <https://www.ameli.fr/sites/default/files/2019-02-12-infopresse-tele-expertise.pdf>
38. CPAM Cote d'OR. Modifications CCAM –NGAP à compter du 10.3.2014 [Internet]. 2014. Disponible sur: http://www.cnam21.fr/EnDirectPS/Orthoptistes/2014/2014-02-13_ngap.pdf
39. AMELI. Les tarifs applicables en métropole, dans les départements d'outre-mer et à Mayotte [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/calvados/infirmier/exercice-liberal/facturation-remuneration/tarifs-conventionnels/tarifs>

40. Legifrance. Arrêté du 3 juin 2021 définissant les activités de télésoin [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043596938>
41. DIRECTION DELEGUEE A LA GESTION ET A L'ORGANISATION DES SOINS, (DDGOS). FORFAIT STRUCTURE 2020 [Internet]. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/489483/document/note-methodo-forfait-structure-2020.pdf>
42. KIT ESANTE. Guide des professionnels de santé connecté [Internet]. Disponible sur: <https://www.kit-esante.fr/materiel/outils-tests-visuels/>
43. Ministère de la santé et des solidarités. Renforcer l'accès territorial aux soins. Plan quinquennal de lutte contre les déserts médicaux [Internet]. 2017; Disponible sur: https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/acces_aux_soins_dp_vdef_131017.pdf
44. E-ophta. EHPAD, RÉSIDENCES SENIORS [Internet]. 2020. Disponible sur: <chrome-extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmdadm/https://www.e-ophtalmo.com/wp-content/uploads/2020/04/EHPAD.pdf>
45. ARS Normandie. COVID-19 : mise à disposition gratuite de la plateforme régionale de télémedecine [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://www.normandie.ars.sante.fr/covid-19-mise-disposition-gratuite-de-la-plateforme-regionale-de-telemedecine>
46. HAS. Qualité et sécurité des actes de téléconsultation et de téléexpertise [Internet]. 2019. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2019-07/guide_teleconsultation_et_teleexpertise.pdf
47. Avidor D, Loewenstein A, Waisbourd M, Nutman A. Cost-effectiveness of diabetic retinopathy screening programs using telemedicine: a systematic review. *Cost Eff Resour Alloc CE*. 2020;18:16.
48. Hervé MAUREY et Jean-François LONGEOT, fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable. Déserts médicaux : L'État doit enfin prendre des mesures courageuses ! [Internet]. 2020. Report No.: 282. Disponible sur: http://www.senat.fr/rap/r19-282/r19-282_mono.html#toc125
49. AMELI. Garantir l'accès universel aux droits et permettre l'accès aux soins [Internet]. 2021. Disponible sur: <https://assurance-maladie.ameli.fr/qui-sommes-nous/action/acces-soins/acces-soins>
50. DREES Direction de la Recherche, des Études, de l'Évaluation et des Statistiques. Les dépenses de santé en 2018 > édition 2019 > [Internet]. Disponible sur: <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2021-03/10-16.pdf>
51. Nguyen HV, Tan GSW, Tapp RJ, Mital S, Ting DSW, Wong HT, et al. Cost-effectiveness of a National Telemedicine Diabetic Retinopathy Screening Program in Singapore. *Ophthalmology*. déc 2016;123(12):2571-80.
52. Thomas S-M, Jeyaraman MM, Jeyaraman M, Hodge WG, Hutnik C, Costella J, et al. The effectiveness of teleglaucoma versus in-patient examination for glaucoma screening: a systematic review and meta-analysis. *PloS One*. 2014;9(12):e113779.
53. Legifrance. Décision du 10 juillet 2018 de l'Union nationale des caisses d'assurance maladie relative à la liste des actes et prestations pris en charge par l'assurance maladie [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037240668>
54. Legifrance. Arrêté du 1er mars 2021 relatif à l'autorisation du protocole de coopération « Réalisation d'un bilan visuel par un orthoptiste dans le cadre du renouvellement/adaptation des corrections optiques chez les enfants de 6 à 15 ans et analysé via télémedecine par un ophtalmologiste » [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043261479>
55. Legifrance. Arrêté du 1er mars 2021 relatif à l'autorisation du protocole de coopération « Réalisation d'un bilan visuel par un orthoptiste dans le cadre du renouvellement/adaptation des corrections optiques chez les adultes de 16 à 50 ans et analysé via télémedecine par un ophtalmologiste » [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043205208>

56. MINISTÈRE DES SOLIDARITÉS ET DE LA SANTÉ. Instruction no DSS/SD1/1B/2018/100 du 9 avril 2018 relative aux modalités de mise en œuvre des protocoles de coopération entre ophtalmologiste et orthoptiste pour la réalisation du bilan visuel à distance [Internet]. avr 13, 2018. Disponible sur: https://solidarites-sante.gouv.fr/fichiers/bo/2018/18-06/ste_20180006_0000_0081.pdf
57. CHU Caen Normandie. Télémédecine [Internet]. Disponible sur: <https://www.chu-caen.fr/proj-telemedecine.php?idproj=1>
58. Le Parisien. Seine-et-Marne : bien vu cette téléconsultation d'ophtalmologie mobile ! Disponible sur: <https://www.leparisien.fr/seine-et-marne-77/seine-et-marne-bien-vu-cette-teleconsultation-d-ophtalmologie-mobile-06-06-2019-8087856.php>
59. Point Vision. TÉLÉCONSULTATION [Internet]. Disponible sur: <https://www.pointvision.com/saint-quentin/motif/teleconsultation/>
60. Legifrance. Arrêté du 1er mars 2021 relatif à l'autorisation du protocole de coopération « Réalisation de photographies du fond d'œil dans le cadre du dépistage de la rétinopathie diabétique par un(e) orthoptiste et/ou infirmier(e) en lieu et place d'un ophtalmologiste [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043205254>
61. Histoire et présentation de OPHDIAT [Internet]. Disponible sur: <http://reseau-ophdiat.aphp.fr/histoire-et-presentacion-de-ophdiat/>
62. France 3. Saône-et-Loire : la 11e campagne de dépistage de la rétinopathie diabétique va débiter [Internet]. 2015. Disponible sur: <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bourgogne-franche-comte/saone-et-loire/saone-et-loire-la-11e-campagne-de-depistage-de-la-retinopathie-diabetique-va-debiter-713403.html>
63. Le Journal du Centre. Dépister la rétinopathie diabétique à tout prix dans la Nièvre [Internet]. 2020. Disponible sur: https://www.lejdc.fr/nevers-58000/actualites/depister-la-retinopathie-diabetique-a-tout-prix-dans-la-nievre_13871769/
64. ARS Nouvelle Aquitaine. Dépistage itinérant de la Rétinopathie diabétique en Dordogne [Internet]. 2017; Disponible sur: https://www.nouvelle-aquitaine.ars.sante.fr/system/files/2018-01/Telemedecine_07_Presentation.pdf
65. Télémédecine en Aquitaine. DÉPISTAGE ITINÉRANT DE LA RÉTINOPATHIE DIABÉTIQUE – PÉRIGORD NOIR [Internet]. Disponible sur: <https://telemedecine.sante-aquitaine.fr/article/actualites/depistage-itinerant-de-la-retinopathie-diabetique-perigord-noir>
66. Legris A, Haddad M-W. Rétinopathie diabétique : dépistage par rétinographie , premiers retours d'expérience dans le Sud Manche. Présentation du centre d'Ophtalmologie de la Baie d'Avranches. 2017.
67. Le jeu avec modules médicaux pour surveiller sa vue [Internet]. Disponible sur: <https://odysight.app/>
68. Brucker J, Bhatia V, Sahel J-A, Girmens J-F, Mohand-Saïd S. Odysight: A Mobile Medical Application Designed for Remote Monitoring-A Prospective Study Comparison with Standard Clinical Eye Tests. *Ophthalmol Ther.* sept 2019;8(3):461-76.
69. Guigou S, Michel T, Mérité P-Y, Coupier L, Meyer F. Home vision monitoring in patients with maculopathy: Real-life study of the OdySight application. *J Fr Ophtalmol.* juin 2021;44(6):873-81.
70. SNOF. 76% des patients préfèrent consulter un ophtalmologiste, malgré la possibilité de passer directement par l'opticien [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://www.snof.org/2019-76-des-patients-pr-f-rent-consulter-un-ophtalmologiste-malgr-possibilit-passer-directement-par>
71. ODOXA. Le Baromètre Télémédecine de l'Agence du Numérique en Santé (ANS) [Internet]. 2020. Disponible sur: <http://www.odoxa.fr/sondage/panorama-telemedecine-aujourd'hui-perspectives-lavenir/>
72. Conseil National de l'Ordre des Médecins. Mésusage de la télémédecine [Internet]. 2020 déc. Disponible sur: https://www.conseil-national.medecin.fr/sites/default/files/external-package/rapport/10ax7i9/cnom_mesusage_de_la_telemedecine.pdf
73. Tribunal Judiciaire Paris, 6 nov. 2020, n° 20:54799 [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://www.doctrine.fr/d/TJ/Paris/2020/UB8E8F05888718DA8B81B>

74. Conseil départemental de l'ordre des médecins d'Isère. Télémédecine : l'Ordre des médecins met en demeure la société Qare de faire cesser ses campagnes publicitaires. 2017; Disponible sur: <https://www.cdom38.org/telemedecine-l-ordre-des-medecins-met-en-demeure-la-societe-qare-de-faire-cesser-ses-campagnes-publicitaires>
75. Le Quotidien du Médecin. Une correction visuelle adaptée « en 15 jours » : Krys s'empare de la télémédecine, les ophtalmos tiquent. 2018; Disponible sur: <https://www.lequotidiendumedecin.fr/actus-medicales/esante/une-correction-visuelle-adaptee-en-15-jours-krys-sempare-de-la-telemedecine-les-ophtalmos-tiquent>
76. Legifrance. Article R4127-19 du code de la santé publique [Internet]. juill 29, 2004. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000006190547/
77. Legifrance. Article R4127-53 du code de la santé publique [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042795663#:~:text=I.,ils%20rel%C3%A8vent%20de%20la%20t%C3%A9l%C3%A9m%C3%A9decine.
78. DGCCRF. BILAN D'ACTIVITÉ Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes [Internet]. 2020. Disponible sur: https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/dgccrf/rapports_activite/2020/resultats-dgccrf-2020.pdf
79. Libération. Le boom des ransomwares, favorisés par l'essor des cryptomonnaies. juill 2021; Disponible sur: Le boom des ransomwares, favorisés par l'essor des cryptomonnaies
80. Fabrice Auclert. Des centaines d'hôpitaux victimes d'une cyberattaque sans précédent aux États-Unis [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/cybersecurite-centaines-hopitaux-victimes-cyberattaque-precedent-etats-unis-83879/>
81. Ouest France. Les données médicales de 500 000 Français dérobées et diffusées sur internet. 2021; Disponible sur: <https://www.ouest-france.fr/europe/france/attaque-informatique-une-liste-de-500-000-noms-et-leurs-donnees-medicales-derobee-7165235>
82. Le Figaro. Cybersécurité des hôpitaux : «27 attaques majeures en 2020 et une par semaine en 2021». févr 2021; Disponible sur: <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/cybersecurite-des-hopitaux-27-attaques-majeures-en-2020-et-une-par-semaine-en-2021-20210217>
83. Sophos. The State of Ransomware in Healthcare 2021 [Internet]. Disponible sur: https://www.sophos.com/en-us/medialibrary/pdfs/whitepaper/sophos-state-of-ransomware-in-healthcare-2021-wp.pdf?cmp=701j0000001YAKMAA4&utm_source=SophosFrance&utm_medium=BlogLink&utm_campaign=BlogFrance
84. Mike Berners-Lee. How Bad Are Bananas? The Carbon Footprint of Everything. 2010.
85. La Poste. Eco-écalulateur [Internet]. Disponible sur: <http://objectifzeroco2.laposte.fr/>
86. Statista. Nombre d'e-mails envoyés et reçus chaque jour dans le monde de 2017 à 2025*(en milliards) [Internet]. Disponible sur: <https://fr.statista.com/statistiques/583905/nombre-d-e-mails-par-jour-dans-le-monde--2019/>
87. Air Transport Action Group. Fact and Figures [Internet]. Disponible sur: <https://www.atag.org/facts-figures.html>
88. L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique [Internet]. 2011. Disponible sur: https://ademe.typepad.fr/files/acv_ntic_synthese_courrier_electronique.pdf
89. Vinci. Data center : bienvenue dans les usines à données [Internet]. Disponible sur: <https://www.vinci-energies.com/cest-deja-demain/pour-un-monde-connecte/data-center-bienvenue-dans-les-usines-a-donnees/>
90. L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. La face cachée du numérique [Internet]. 2021. Disponible sur: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-face-cachee-numerique.pdf>

91. Masanet E, Shehabi A, Lei N, Smith S, Koomey J. Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*. 28 févr 2020;367(6481):984-6.
92. AMELI. Téléconsultation et Covid-19 : croissance spectaculaire et évolution des usages [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/calvados/medecin/actualites/teleconsultation-et-covid-19-croissance-spectaculaire-et-evolution-des-usages>
93. Kashim R, Newton P, Ojo O. Diabetic Retinopathy Screening: A Systematic Review on Patients' Non-Attendance. *Int J Environ Res Public Health*. 19 janv 2018;15(1):157.
94. Le Robert, Dictionnaire en ligne. Définition : intelligence, nom féminin [Internet]. Disponible sur: <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/intelligence#:~:text=intelligence%20%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B,%E2%80%94Intelligence%20d%C3%A9velopp%C3%A9e>.
95. Jacques Gregoire. LES ÉVOLUTIONS DE L'EXAMEN DES FONCTIONS INTELLECTUELLES, ENTRE TRADITION ET INNOVATION [Internet]. 2017. Disponible sur: <https://www.cairn.info/revue-enfance2-2017-4-page-443.htm>
96. Gottfredson LS. Dissecting practical intelligence theory. *Intelligence*. juill 2003;31(4):343-97.
97. Pierrette Boudreau. Description des intelligences multiples [Internet]. 2003. Disponible sur: https://www.ac-strasbourg.fr/fileadmin/pedagogie/biotechnologies/PAF/PAF_2016-17/3_b_Descriptions_des_Intelligences_Multiples.pdf
98. Wikipédia. Échelle métrique de l'intelligence [Internet]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_m%C3%A9trique_de_l%27intelligence
99. Pierre-Nicolas Schwab. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle et comment peut-elle nous aider ? [Internet]. 2009. Disponible sur: <https://www.intotheminds.com/blog/definition-intelligence-artificielle/#:~:text=Ceci%20me%20conduit%20%C3%A0%20formuler,de%20juger%20et%20de%20d%C3%A9cider%20%C2%BB>.
100. Cardon D, Cointet J-P, Mazières A. La revanche des neurones: L'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle. *Réseaux*. 2018;n° 211(5):173.
101. Github. Introduction à l'apprentissage automatique [Internet]. Disponible sur: https://projeeduc.github.io/intro_apprentissage_automatique/introduction.html
102. Ricco RAKOTOMALALA. Méthode des centres mobiles. Classification par partition. Méthodes de réallocation [Internet]. Disponible sur: http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/slides/classif_centres_mobiles.pdf
103. Invivoo. Introduction à la réduction de dimensionnalité en Machine Learning [Internet]. 2021. Disponible sur: <https://www.invivoo.com/reduction-dimensionnalite-machine-learning/>
104. Bastien Maurice. Fonctionnement du neurone artificiel [Internet]. Disponible sur: <https://deeplylearning.fr/tag/neurone/>
105. pascal-ravoninjavovo. Qu'est ce qu'un réseau neuronal [Internet]. Disponible sur: <https://pascal-ravoninjavovo.fr/ia-comment-trouver-le-bon-reseau-neuronal/>
106. DATA ANALYTICS POST. AUTO-ENCODEUR [Internet]. Disponible sur: <https://dataanalyticspost.com/Lexique/auto-encodeur/>
107. Aurélien VANNIEUWENHUYZE. Les étapes à réaliser pour mener à bien un projet de Machine Learning [Internet]. 2017. Disponible sur: <https://www.editions-eni.fr/open/mediabook.aspx?idR=4a1d225f6d8933d9887444217128e604>
108. WARREN S. MCCULLOCH AND WALTER PITTS. A LOGICAL CALCULUS OF THE IDEAS IMMANENT IN NERVOUS ACTIVITY*. 1943; *Bulletin of Mothemnticnl Biology* Vol. 52, No. 1/2. pp. 99-115. 1990 reprinted.
109. Turing AM. I.—COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. *Mind*. 1 oct 1950;LIX(236):433-60.
110. A Neural-Analogue Calculator Based upon a Probability Model of Reinforcement," Harvard University Psychological Laboratories, Cambridge, Massachusetts, January 8, 1952.

Describes the hardware of the SNARC, the first connectionist neural network learning machine that, when « rewarded, » facilitates recently-used pathways.

111. Rosenblatt Franck. The perceptron : a perceiving and recognizing automaton [Internet]. 1957. Report No.: 85-460-1. Disponible sur: <https://blogs.umass.edu/brainwars/files/2016/03/rosenblatt-1957.pdf>

112. Alekseï Grigor'evich Ivakhnenko; V G Lapa; Robert N McDonough. Cybernetics and forecasting techniques. 1967.

113. Marvin Minsky et Seymour Papert. Perceptrons. 1969.

114. Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. oct 1986;323(6088):533-6.

115. Lecun, Y. (1988). A theoretical framework for back-propagation. In D. Touretzky, G. Hinton, & T. Sejnowski (Eds.), *Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School*, CMU, Pittsburg, PA (pp. 21-28). Morgan Kaufmann.

116. Université Picardie. MYCIN [Internet]. Disponible sur: <https://home.mis.u-picardie.fr/~furst/docs/MYCIN.pdf>

117. Jacques Chaumier. Les Banques de données. 1994.

118. Marius Fieschi. Sphinx : un système expert d'aide à la décision en médecine / Marius Fieschi ; [sous la direction du professeur M. Roux] [Internet]. [Université Aix-Marseille]; 1983. Disponible sur:

<http://www.sudoc.abes.fr/cbs/xslt/DB=2.1//SRCH?IKT=12&TRM=041881230&COOKIE=U10178,Klecteurweb,D2.1,Ecf8225a2-29,I250,B341720009+,SY,QDEF,A%5C9008+1,,J,H2-26,,29,,34,,39,,44,,49-50,,53-78,,80-87,NLECTEUR+PSI,R92.184.105.152,FN>

119. Joël Ignasse. Une AI a-t-elle diagnostiqué un cancer rare ? 2016; Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/sante/e-sante/une-ai-a-t-elle-diagnostiquee-un-cancer-rare_101610

120. Shaabanpour Aghamaleki F, Mollashahi B, Nosrati M, Moradi A, Sheikhpour M, Movafagh A. Application of an Artificial Neural Network in the Diagnosis of Chronic Lymphocytic Leukemia. *Cureus*. 4 févr 2019;11(2):e4004.

121. Casey Ross and Ike Swetlitz. IBM pitched its Watson supercomputer as a revolution in cancer care. It's nowhere close. 2017; Disponible sur: <https://www.statnews.com/2017/09/05/watson-ibm-cancer/>

122. Esteve A, Kuprel B, Novoa RA, Ko J, Swetter SM, Blau HM, et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*. 2 févr 2017;542(7639):115-8.

123. Lakhani P, Sundaram B. Deep Learning at Chest Radiography: Automated Classification of Pulmonary Tuberculosis by Using Convolutional Neural Networks. *Radiology*. août 2017;284(2):574-82.

124. Ting DSW, Pasquale LR, Peng L, Campbell JP, Lee AY, Raman R, et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *Br J Ophthalmol*. févr 2019;103(2):167-75.

125. Hogarty DT, Mackey DA, Hewitt AW. Current state and future prospects of artificial intelligence in ophthalmology: a review. *Clin Experiment Ophthalmol*. janv 2019;47(1):128-39.

126. Abràmoff MD, Folk JC, Han DP, Walker JD, Williams DF, Russell SR, et al. Automated Analysis of Retinal Images for Detection of Referable Diabetic Retinopathy. *JAMA Ophthalmol*. 1 mars 2013;131(3):351.

127. Abràmoff MD, Lou Y, Erginay A, Clarida W, Amelon R, Folk JC, et al. Improved Automated Detection of Diabetic Retinopathy on a Publicly Available Dataset Through Integration of Deep Learning. *Investig Ophthalmology Vis Sci*. 4 oct 2016;57(13):5200.

128. Decencièrre E, Zhang X, Cazuguel G, Lay B, Cochener B, Trone C, et al. FEEDBACK ON A PUBLICLY DISTRIBUTED IMAGE DATABASE: THE MESSIDOR DATABASE. *Image Anal Stereol*. 26 août 2014;33(3):231.

129. Abràmoff MD, Lavin PT, Birch M, Shah N, Folk JC. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *Npj Digit Med*. déc 2018;1(1):39.

130. Quellec G, Lamard M, Cochener B, Decenciere E, Lay B, Chabouis A, et al. Multimedia data mining for automatic diabetic retinopathy screening. In: 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) [Internet]. Osaka: IEEE; 2013 [cité 24 août 2021]. p. 7144-7. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6611205/>
131. Decenci re E, Cazuguel G, Zhang X, Thibault G, Klein J-C, Meyer F, et al. TeleOphta: Machine learning and image processing methods for teleophthalmology. IRBM. avr 2013;34(2):196-203.
132. PascaleMassin, Bruno Lay. Dépistage automatique et instantané de la rétinopathie diabétique [Internet]. 2019 mars; Congrès de la Société Francophone du Diabète   Marseille. Disponible sur: <https://www.adcis.net/wp-content/uploads/2019/04/SFD-Marseille.pdf>
133. Ophtai. Notre offre [Internet]. Disponible sur: <https://www.ophtai.com/fr/solution-depistage-maladie-oeil-2/>
134. Brown JM, Campbell JP, Beers A, Chang K, Ostmo S, Chan RVP, et al. Automated Diagnosis of Plus Disease in Retinopathy of Prematurity Using Deep Convolutional Neural Networks. JAMA Ophthalmol. 1 juill 2018;136(7):803-10.
135. Bhaskaranand M, Ramachandra C, Bhat S, Cuadros J, Nittala MG, Sadda SR, et al. The Value of Automated Diabetic Retinopathy Screening with the EyeArt System: A Study of More Than 100,000 Consecutive Encounters from People with Diabetes. Diabetes Technol Ther. nov 2019;21(11):635-43.
136. Rajalakshmi R, Subashini R, Anjana RM, Mohan V. Automated diabetic retinopathy detection in smartphone-based fundus photography using artificial intelligence. Eye. juin 2018;32(6):1138-44.
137. Verily. Launching a powerful new screening tool for diabetic eye disease in India [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://verily.com/stories/launching-a-powerful-new-screening-tool-for-diabetic-eye-disease-in-india/>
138. Jia W, Weng J, Zhu D, Ji L, Lu J, Zhou Z, et al. Standards of medical care for type 2 diabetes in China 2019. Diabetes Metab Res Rev [Internet]. sept 2019 [côté 4 sept 2021];35(6). Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dmrr.3158>
139. Zhang Y, Shi J, Peng Y, Zhao Z, Zheng Q, Wang Z, et al. Artificial intelligence-enabled screening for diabetic retinopathy: a real-world, multicenter and prospective study. BMJ Open Diabetes Res Care. oct 2020;8(1):e001596.
140. Ruamviboonsuk P, Krause J, Chotcomwongse P, Sayres R, Raman R, Widner K, et al. Deep learning versus human graders for classifying diabetic retinopathy severity in a nationwide screening program. Npj Digit Med. d c 2019;2(1):25.
141. Xie Y, Nguyen QD, Hamzah H, Lim G, Bellemo V, Gunasekeran DV, et al. Artificial intelligence for teleophthalmology-based diabetic retinopathy screening in a national programme: an economic analysis modelling study. Lancet Digit Health. mai 2020;2(5):e240-9.
142. De Fauw J, Ledsam JR, Romera-Paredes B, Nikolov S, Tomasev N, Blackwell S, et al. Clinically applicable deep learning for diagnosis and referral in retinal disease. Nat Med. sept 2018;24(9):1342-50.
143. Anne Bouaziz. Marseille. Gr ce à l'IA, un ingénieur aide les aveugles à mieux détecter ce qui les entoure. avr 2021; Disponible sur: https://actu.fr/provence-alpes-cote-d-azur/marseille_13055/marseille-grace-a-l-ia-un-ingenieur-aide-les-aveugles-a-mieux-detecter-ce-qui-les-entoure_40841344.html
144. Reynald Fl chaux. Quand le Deep Learning permet aux aveugles d'écouter leur environnement [Internet]. 2016. Disponible sur: <https://www.silicon.fr/deep-learning-permet-aveugles-ecouter-environnement-164936.html>
145. Quellec G, Al Hajj H, Lamard M, Conze P-H, Massin P, Cochener B. ExplAIin: Explanatory artificial intelligence for diabetic retinopathy diagnosis. Med Image Anal. août 2021;72:102118.

146. Loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés
Version à la date 10/08/2021 [Internet]. Disponible sur:
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000886460/>
147. Frey CB, Osborne MA. The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technol Forecast Soc Change*. janv 2017;114:254-80.
148. Cavan D, Makaroff L, da Rocha Fernandes J, Sylvanowicz M, Ackland P, Conlon J, et al. The Diabetic Retinopathy Barometer Study: Global perspectives on access to and experiences of diabetic retinopathy screening and treatment. *Diabetes Res Clin Pract*. juill 2017;129:16-24.

Annexe 1 Protocole organisationnel pour le dépistage de la RD en télémedecine en France



SYNDICAT NATIONAL
DES OPHTALMOLOGISTES
DE FRANCE



*Cabinet d'ophtalmologie
des docteurs*

Protocole organisationnel entre ophtalmologiste et orthoptiste (version janvier 2018):
Dépistage de la rétinopathie diabétique par photographies du fond d'oeil réalisées par un orthoptiste, en présence ou en l'absence de l'ophtalmologiste, dans le cadre du suivi oculaire du patient diabétique, avec lecture médicale du dossier.

Protocole conforme aux dispositions du Décret n° 2016-1670 relatif à la définition des actes d'orthoptie et aux modalités d'exercice de la profession d'orthoptiste, ainsi qu'aux articles R. 4342-1 à R. 4342-7 du Code de la Santé Publique.

Date d'application :

Lieux d'application du protocole :

Cabinet d'ophtalmologie

Noms, prénoms et adresses professionnelles des orthoptistes participant au protocole organisationnel :

Situations médicales concernées par le protocole :

Patients diabétiques âgés de plus de 10 ans, sans rétinopathie diabétique diagnostiquée ou avec rétinopathie diabétique minime et sans autre pathologie oculaire évolutive. Le patient doit être adressé par un médecin pour suivi oculaire avec dépistage de la rétinopathie diabétique et être volontaire pour faire réaliser cette prestation par un orthoptiste, avec lecture du dossier par l'ophtalmologiste, éventuellement en télémedecine.

Le protocole peut se réaliser dans 3 circonstances :

- dépistage simple de la rétinopathie diabétique par rétinographies
- dépistage de la rétinopathie diabétique par rétinographies associé à la recherche d'autres complications du diabète (hypertonie oculaire, déséquilibres oculomoteurs, baisse de vision) à la demande du patient ou du médecin adresseur.
- dépistage de la rétinopathie diabétique par rétinographies au cours d'une consultation où le médecin ophtalmologiste examinera aussi le patient, notamment s'il a 70 ans ou plus, ou s'il vient pour la première fois.

Un compte-rendu sera adressé au patient et au médecin traitant. Ce protocole peut s'appliquer sans unité de temps et de lieu entre l'orthoptiste et l'ophtalmologiste.

Actes orthoptiques pouvant être pratiqués dans le protocole et inscrits au décret 2016-1670 :

- Interrogatoire (Art.R.4342-1-1)
- Détermination de l'acuité visuelle et de la réfraction avec ou sans dilatation (Art. R. 4342-4)
- Tonométrie sans contact (Art. R. 4342-5)
- Bilan des déséquilibres oculomoteurs (Art. R. 4342-2)
- Instillation de collyres (Art. R. 4342-4).
- Exploration du sens chromatique (Art. R. 4342-5)
- Rétinographie mydriatique et non mydriatique (Art. R. 4342-5)
- Photographie du segment antérieur de l'œil et de la surface oculaire (Art. R. 4342-6)

Situations où le protocole ne s'applique pas :

- Refus du patient d'intégrer le protocole
- Patient présentant une des situations suivantes :
 - . œil rouge et/ou douloureux
 - . baisse d'acuité visuelle profonde, brutale et récente
 - . rétinopathie diabétique à un stade modéré ou avancé
 - . pathologie oculaire suivie ou connue
 - . traitement ou pathologie générale nécessitant un suivi ophtalmologique

L'ophtalmologiste reste maître de sa décision de proposer ou non l'inclusion dans le protocole en fonction de la connaissance qu'il a du patient .

Information des patients de leur intégration dans le protocole :

Le patient est prévenu de l'existence du protocole et de la procédure éventuelle de lecture du dossier par l'ophtalmologiste en télémedecine. Son accord est requis et inscrit dans le dossier lors de l'examen. Ce protocole est disponible sur demande du patient.

Compte-rendu

Le compte-rendu, accompagné de l'ordonnance éventuelle, signé par le médecin ophtalmologiste et adressé au patient, comprendra a minima :

- Les noms de l'ophtalmologiste et de l'orthoptiste
- Les dates de l'examen orthoptique et de l'interprétation par l'ophtalmologiste
- Le résumé de l'examen avec l'interprétation des rétinographies selon la classification de la société francophone du diabète et éventuellement d'autres indications en fonction des différents examens effectués et de leur qualité.
- Les événements indésirables éventuels survenus et les solutions apportées
 - La prise en charge recommandée en cas d'anomalie
- L'intervalle conseillé entre les examens de suivi et leur modalité (poursuite ou non dans le protocole)

Descriptif du processus de prise en charge du patient

L'inclusion du patient dans le protocole est proposée lors d'une consultation ophtalmologique ou lors de la prise de rendez-vous sur adressage par un médecin. L'orthoptiste aura accès aux examens antérieurs s'ils existent. L'accord du patient est inscrit dans le dossier médical.

I / Orthoptiste :

La prise en charge du patient comprendra habituellement :

- Interrogatoire (pour éliminer les contre-indications à l'application du protocole)
- Prise de rétinographies en couleur avec un rétinographe, avec ou sans instillation de collyre mydriatique : réalisation de 2 clichés numériques de chaque œil : l'un centré sur la macula, l'autre sur la papille optique (éventuellement fusionnés par voie numérique)

La prise en charge du patient par l'orthoptiste peut aussi comprendre, en fonction des signes et demandes du patient, de son âge, de la périodicité du suivi :

- Réfraction avec mesure de l'acuité visuelle. Mesure des verres correcteurs
- Recherche des déséquilibres oculomoteurs
- Mesure du tonus oculaire avec un tonomètre à air (pour les plus de 16 ans)

Transmission des données : Les informations relatives à l'interrogatoire et aux examens réalisés par l'orthoptiste seront adressées au médecin ophtalmologiste par télétransmission, par l'intermédiaire d'un dossier informatique partagé, ou par tout autre moyen assurant la confidentialité des échanges

II/ Ophtalmologiste :

Il analyse le dossier transmis par l'orthoptiste, en présence ou en l'absence du patient,

Il adressera au patient et au médecin traitant le compte-rendu dans les 10

Situations de sorties du protocole organisationnel avec programmation d'une consultation ophtalmologique

I / Situations d'urgence nécessitant l'avis rapide de l'ophtalmologiste :

- Baisse d'acuité visuelle profonde
- Tonus très élevé (supérieur à 25 mmHg),
- Trouble oculomoteur aigu (paralysie oculomotrice) ou autre signe oculaire inquiétant (allergie mydriatique...), éventuellement documenté par une rétinographie ou des photographies du segment antérieur .

Un ophtalmologiste signataire du protocole doit pouvoir être joint en cas de besoin.

II / Situations nécessitant la programmation d'une consultation ophtalmologique sans urgence en dehors des cas déjà prévus :

- Demande du patient sans rapport avec l'objet du protocole
- Forte évolution de l'état réfractif (> 1 D en un an)
- Baisse de la meilleure acuité visuelle corrigée d'au moins 2/10
- Symptôme évoquant un problème non réfractif
- Mise en évidence à l'interrogatoire d'une autre pathologie générale ou d'un traitement pouvant avoir des répercussions oculaires.
- Incohérence avec les examens antérieurs.

Périodicité du dépistage de la rétinopathie diabétique :

En l'absence de signe évolutif, il est nécessaire, conformément aux recommandations de la Haute Autorité de Santé, de réaliser ce dépistage régulièrement :

. en l'absence de rétinopathie diabétique, chez les diabétiques non insulinotraités, équilibrés pour l'hémoglobine glyquée (HbA1c) et la pression artérielle, un intervalle de dépistage de 2 ans est suffisant après un examen du fond d'œil de référence normal.

. en cas de diabète et/ou de pression artérielle mal contrôlés, un examen au moins annuel est nécessaire ;

. pour la femme enceinte diabétique (hors diabète gestationnel et en l'absence de rétinopathie diabétique préexistante), il est recommandé un dépistage avant la grossesse, puis trimestriel et en post-partum

. dans les autres cas, un examen annuel est nécessaire.

Signatures :

Date de rédaction :

Dr

Annexe 2 : cahier de recueil des données de l'étude DiabEyeIA

Nom : _____

Prénom : _____

Date de naissance : ____ / ____ / ____

Diabète depuis _____ années

Quelle est le résultat de votre dernière HbA1c ?

☐ _____ %

☐ Ne sait pas

Traitement anti diabétique (scan de l'ordonnance habituelle)

Avez-vous un ophtalmologue traitant ?

☐ Oui ➔ nom ? _____

☐ Non

Avez-vous déjà eu un fond d'œil ou une rétinophotographie ?

☐ Oui ➔ Mois/année ? ____ / ____

☐ Non

Avez-vous ou avez-vous eu une rétinopathie diabétique ?

☐ Oui ➔ Traitement pas laser ? ☐ Oui

☐ Non

☐ Non

☐ Ne sais pas

Avez-vous actuellement une sensation de baisse d'acuité visuelle :

☐ Oui ➔ depuis quand (mois/année) ? ____ / ____

☐ Non

Avez-vous d'autres complications du diabète ?

Néphropathie diabétique : ☐ Oui

☐ Non

☐ Ne sait pas

Neuropathie diabétique : ☐ Oui

☐ Non

☐ Ne sait pas

Cardiopathie ischémique

Ou Insuffisance cérébro-vasculaire

Ou Arteriopathie oblitérante des membres inférieurs

☐ Oui

☐ Non

☐ Ne sait pas

Annexe 3 : Questionnaire satisfaction patient de l'étude DiabEyeIA

	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Sans Avis	Plutôt d'accord	Complètement d'accord
Ce dépistage m'a paru rapide					
Je n'ai pas ressenti de douleur ou d'inconfort lors de ce dépistage					
J'ai apprécié l'opportunité d'être dépisté en renouvelant mes médicaments					
J'ai confiance dans ce dispositif innovant					
Je comprends que le résultat ne soit pas donné immédiatement					
Je serais prêt à réaliser mon dépistage de rétinopathie diabétique uniquement par ce biais					
Je garde une confiance plus importante dans le fond d'œil classique réalisé chez mon ophtalmologue					
Ce dépistage m'a rappelé que mon diabète peut avoir des conséquences sur ma santé oculaire					
Cela renforce ma détermination à garder un bon équilibre de mon diabète					

Annexe 4 : **Questionnaire Satisfaction Pharmacien (à l'issue de l'étude DIABEYIA)**

Cocher la case correspondant le mieux à votre ressenti :

	Très insuffisante	Plutôt insuffisante	Sans d'avis	Plutôt adaptée	Très adaptée
La formation initiale à ce nouvel outil m'a paru					
La facilité d'utilisation du rétinio-photographe était					
Le temps que j'ai dû consacrer à la réalisation des clichés m'a paru					
Le temps de réponse pour leur interprétation par l'intelligence artificielle m'a semblé					
J'ai ressenti en proposant ce dépistage une adhésion de la part des patients					
Ma rémunération pour la réalisation de ce dépistage me semble					
La plus value apportée au patient me paraît					

Décrire en quelques mots :

La principale cause de non réalisation du dépistage auprès du patient :

La principale cause de refus des patients :

Cocher l'affirmation qui correspond à votre ressenti :

☐ Si le parcours patient était modifié avec dépistage systématique de tous les patients diabétiques en pharmacie, je serais prêt à endosser ce rôle et donc à poursuivre la réalisation à long terme de ce dépistage.

Ou

☐ Je vois le rôle du pharmacien comme un rôle complémentaire à la stratégie actuelle en dépistant seulement les patients n'ayant pas de dépistage réalisé par un ophtalmologue.

Annexe 5 : Listing des refus/impossibilité de participer à l'étude DiabEyeIA.

L'identité du patient est seulement renseignée pour le retrouver et l'exclure de cette liste en cas de participation à l'étude dans l'année d'inclusion du fait d'un changement d'avis. La ligne pointillée est à découper pour ne pas transmettre l'identité des patients ayant refusé de participer à cette étude.

Nom-Prénom	Motif du refus
Nombre total de refus :	
(à renseigner en fin d'études)	

« Par délibération de son Conseil en date du 10 Novembre 1972, l'Université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ou mémoires. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs ».

VU, le Président de Thèse

VU, le Doyen de la Faculté

VU et permis d'imprimer
en référence à la délibération
du Conseil d'Université
en date du 14 Décembre 1973

Pour le Président
de l'Université de CAEN et P.O

Le Doyen

ANNEE DE SOUTENANCE : 2020/2021

NOM ET PRENOM DE L'AUTEUR : GANDON Benoît

APPLICATION DE LA TELEMEDECINE EN OPHTALMOLOGIE DANS LE DIAGNOSTIC ET LE SUIVI DE LA RETINOPATHIE DIABÉTIQUE

RESUME DE LA THESE EN FRANÇAIS :

1/3 des 3.5 millions de patients diabétiques en France sont potentiellement atteints de Rétinopathie Diabétique (RD). Cette pathologie est la principale cause de mal-voyance évitable dans la population active dans le monde. Aussi un dépistage organisé est recommandé au minimum tous les 2 ans dans la population diabétique. Pourtant, seulement 64% de celle-ci a bénéficié d'un dépistage bisannuel en 2018.

Cette thèse souhaite dresser un état des lieux des possibilités offertes en 2021 en France par la télémedecine pour améliorer ce taux. Elle présente ses protocoles existants, leur mise en œuvre, et leur cotation dans le droit Français. Une liste des avantages et des limites, non exhaustive, de l'utilisation de la télémedecine est proposée.

Les algorithmes d'Intelligence Artificielle (IA), désormais capables d'apprentissage automatique profond, créent par eux-mêmes leur propre logique afin de répondre à une question donnée, après présentation d'une base de données de milliers d'occurrences. Ce travail présentera donc les résultats prometteurs de cette technologie, spécifiquement dans le dépistage de la RD, sans oublier d'évoquer les questions légitimes que ces progrès soulèvent.

Enfin, la méthodologie d'une étude pilote qui va débiter en Normandie est exposée, l'étude DiabEyeIA. Elle proposera un dépistage de la RD dans 12 officines de la région normande à l'aide de rétinophotographies non mydriatiques analysées par IA, et ce à l'occasion du renouvellement d'un traitement anti-diabétique. Le but de cette étude innovante sera de montrer une augmentation du taux de dépistage par cette nouvelle modalité combinant télémedecine et IA comparativement au taux de la littérature.

MOTS CLES : Rétinopathie Diabétique, Télémedecine, Intelligence Artificielle, Rétinophotographie, Pharmacie

USE OF TELEMEDICINE IN OPHTHALMOLOGY IN ORDER TO DIAGNOSE AND MONITORE DIABETIC RETINOPATHY

RESUME DE LA THESE EN ANGLAIS :

1/3 of the 3.5 million diabetic patients in France potentially have Diabetic Retinopathy (DR). This pathology is the main cause of preventable visual impairment in the working population around the world. Also, organized screening is recommended at least every 2 years in the diabetic population. Yet only 64% of them received biennial screening in 2018.

This thesis aims to draw up an inventory of the possibilities offered in 2021 in France by telemedicine to improve this rate. It presents its existing protocols, their implementation, and their quotation in French law. A non-exhaustive list of advantages and limitations of the use of telemedicine is provided.

Artificial Intelligence (AI) algorithms are now capable of deep machine learning. They create in autonomy their own logic to answer a given question, after presenting a database of thousands of occurrences. This work will therefore present the promising results of this technology, specifically in the detection of DR, without forgetting to evoke the legitimate questions that these advances raise.

Finally, the methodology of a pilot study which will begin in Normandy is presented, the DiabEyeIA study. It will offer screening for DR in 12 pharmacies in the Normandy region using non-mydratic retinophotographs analyzed by IA, and this on the occasion of the renewal of anti-diabetic treatment. The aim of this innovative study will be to show an increase in the screening rate, combining telemedicine and IA, compared to the classic rate in the literature.

KEY WORDS : Diabetic Retinopathy, Telemedicine, Artificial Intelligence, Retinophotograph, Pharmacy