



HAL
open science

Maladie Rénale Chronique féline : approches actuelles et innovations technologiques pour le diagnostic et le suivi

Laura Doucerain

► To cite this version:

Laura Doucerain. Maladie Rénale Chronique féline : approches actuelles et innovations technologiques pour le diagnostic et le suivi. Médecine vétérinaire et santé animale. 2024. dumas-04809812

HAL Id: dumas-04809812

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04809812v1>

Submitted on 28 Nov 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Année 2024

Maladie Rénale Chronique féline : approches actuelles et innovations technologiques pour la prévention, le diagnostic et le suivi

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 22 octobre 2024

par

Laura Sophie Marie Doucerain

sous la direction de

Chantal LEGRAND

JURY

Présidente du jury :	Mme Christelle MAUREY-GUÉNEC	Professeur à l'EnVA
Directrice de thèse :	Mme Chantal LEGRAND	Maître de conférences à l'EnvA
Examinatrice :	Mme Morgane CANONNE-GUIBERT	Maître de conférences à l'EnvA

Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire



version Octobre 2024

Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
Mme	Benckekroun	Ghita	Maître de conférences HDR	DEPEC
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
Mme	Chastant	Sylvie	Professeur	DPASP
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur émérite	DEPEC
M	Desquilbet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur émérite	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP
Mme	Le Podet	Sophie	Professeur	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Professeur	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guéneq	Christelle	Professeur	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Professeur	DSBP
Mme	Rivière	Julie	Professeur	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Béguin	Jérémy	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertal	Mileva	Maître de conférences associé	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
Mme	Goutchat	Rebecca	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagré	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
Mme	Mtimet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
M	Munir	Muhammad Tanveer	Maître de conférences	DPASP
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Quéré	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Radière	Guéric	Maître de conférences associé	DSBP
Mme	Ravary-Plumioën	Bérandère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Touzot-Jourde	Gwenola	Maître de Conférences	DEPEC

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, Mme Christelle Maurey-Guenec, Professeur à l'EnvA

Qui m'a accordé son temps et qui m'a fait l'honneur d'être la présidence de mon jury de thèse,

Je vous en remercie.

A Mme Legrand Chantal, Maître de conférences à l'EnvA,

Qui m'a suivi et encouragé avec enthousiasme dans la rédaction de cette thèse.

Pour votre écoute et votre réactivité dans le cadre de mon projet professionnel,

Sincères remerciements.

A Mme Canonne-Guibert Morgane, Maître de conférences à l'EnvA,

Qui a accepté d'être examinatrice de cette thèse,

Sincères remerciements.

Table des matières

Table des matières	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Liste des abréviations	7
Introduction	9
Première partie : La Maladie Rénale Chronique Féline	10
1. Anatomie et physiologie de l'appareil urinaire.....	11
A. Anatomie de l'appareil urinaire	11
B. Physiologie de l'appareil urinaire	12
2. Présentation générale, épidémiologie et physiopathologie de la Maladie Rénale Chronique féline.....	13
A. Définition	13
B. Epidémiologie.....	14
C. Physiopathologie.....	14
3. Démarche diagnostique face à une Maladie Rénale Chronique féline	15
A. Présentation clinique.....	15
B. La classification IRIS.....	15
C. La démarche étiologique.....	16
D. Les complications.....	18
E. L'approche thérapeutique	20
Deuxième partie : Approches actuelles et innovations technologiques dans la prévention, la prédiction et le suivi de la Maladie Rénale Chronique chez le chat	23
1. Introduction à la e-santé	24
A. Définition	24
B. La médecine des « 4P » ou « 6P » en santé humaine	25
C. L'application de la télémédecine en médecine vétérinaire	26
D. Définition de l'Intelligence Artificielle	27
2. L'apport de solutions connectées dans la prévention et le suivi de la Maladie Rénale Chronique féline.....	28
A. Des objets connectés dans la prévention de la Maladie Rénale Chronique	28
B. L'utilisation de l'Intelligence Artificielle dans la prédiction de la Maladie Rénale Chronique féline ..	32
3. Les futures potentielles utilisations de l'Intelligence Artificielle dans le suivi de la Maladie Rénale Chronique chez le chat	35
Conclusion	36
Liste des références bibliographiques	37
Annexe 1 : La téléconsultation vétérinaire	43

Liste des figures

<i>Figure 1 : Anatomie de l'appareil urinaire du chat</i>	11
<i>Figure 2 : Coupe transversale du rein du chat</i>	11
<i>Figure 3 : Physiologie de la SRAA (Anglicheau et al., 2016).</i>	13
<i>Figure 4 : Pathogénie de l'initiation et la progression de la maladie rénale chronique chez le chat</i>	14
<i>Figure 5 : Classification IRIS de la MRC chez le chat (IRIS, 2023)</i>	16
<i>Figure 6 : Schéma simplifié de la physiologie du FGF-23 lors de la MRC (Idexx, 2023).</i>	18
<i>Figure 7 : Régulation de l'homéostasie du calcium</i>	19
<i>Figure 8 : L'ensemble des concepts représentant la e-santé (Livre blanc du Conseil national de l'Ordre des médecins, 2015)</i>	24
<i>Figure 9 : Médecine 4P (Alain Tassy, 2017)</i>	26
<i>Figure 10 : Le distributeur d'eau Felaqua (SurePet care, 2024)</i>	28
<i>Figure 11 : L'application associée à la balance (SurePet care, 2024)</i>	29
<i>Figure 12 : La balance INPET (The little cat, 2024)</i>	30
<i>Figure 13 : L'application associée à la balance (The little cat, 2024)</i>	30
<i>Figure 14 : La litière Caremitou (Caremitou, 2024)</i>	31
<i>Figure 15 : Prototype du harnais PulsaVet (PulsaVet, 2024)</i>	35

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Nomenclature des actes de télémédecine vétérinaire (« Télémédecine vétérinaire et transformation de la pratique en santé animale - Analyse n° 194 », 2023)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 2 : Critères de performance des sous-modèles dans la première phase de modélisation lors de la stratégie 1 (Biourge et al., 2020).</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 3 : Critères de performance des sous-modèles dans la première phase de modélisation lors de la stratégie 2 (Biourge et al., 2020).</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 4 : Critères de performance des sous-modèles dans la seconde phase de modélisation lors de la stratégie 1 (Biourge et al., 2020).</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 5 : Critères de performance des sous-modèles dans la seconde phase de modélisation lors de la stratégie 2 (Biourge et al., 2020)</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 6: Critères de performance des sous-modèles dans la troisième phase de modélisation lors de la stratégie 1 (Biourge et al., 2020)</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 7 : Critères de performance des sous-modèles dans la troisième phase de modélisation lors de la stratégie 2 (Biourge et al., 2020)</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 8 : Comparaison du nombre de chats dont le statut MRC a été diagnostiqué par rapport à l'état prédit (Richard Bradley et al., 2019).....</i>	<i>34</i>

Liste des abréviations

ADH : Hormone Anti-diurétique

CES : Consumer Electronic Show

CHUM : Centre Hospitalier Universitaire de Montréal

DFG : Débit de Filtration Glomérulaire

EIAS : Ecole d'Intelligence Artificielle en Santé

EPO : Erythropoïétine

FGF-23 : Fibroblast Growth Factor 23

HTA : HyperTension Artérielle

IA : Intelligence Artificielle

IECA : Inhibiteur de l'Enzyme de Conversion de l'Angiotensine

IRA : Insuffisance Rénale Aiguë

ISB : Institut des Systèmes de Biologie

ITU : Infection du Tractus Urinaire

MRC : Maladie rénale chronique

OMS : Organisme Mondial de la Santé

PAS : Pression Artérielle Systémique

PCAST : President's Council of Advisor on Science and Technology

PNF : Pression Nette de Filtration

PTH : Parathormone

PUPD : PolyUro-PolyDipsie

RPCU : Rapport Protéines sur Créatinine Urinaires

SDMA : Diméthylarginine Symétrique

SRAA : Système Rénine Angiotensine Aldostérone

VPP : Valeur Prédictive Positive

VPN : Valeur Prédictive Négative

Introduction

Le nombre de chats domestiques en France est en constante croissance. Quinze millions de chats domestiques ont été recensés en 2022 (Delestre, 2024). La création de cliniques vétérinaires spécialisées dans la prise en charge des chats illustre l'engouement des foyers français envers le chat comme animal domestique. Ainsi, les chats ont leurs propres affections qui s'intègrent dans une médecine spécifique. Parmi elles, La Maladie Rénale Chronique (MRC) est une affection très commune et touche plus de la moitié des chats âgés de plus de 7 ans (Bartges, 2012).

Prédire, diagnostiquer et suivre l'évolution de la MRC chez le chat représentent de réels enjeux pour le vétérinaire qui vise notamment à optimiser la prise en charge et la satisfaction des propriétaires. Dans ce cadre, les nouvelles technologies ouvrent de nouvelles perspectives, tant en médecine humaine qu'en médecine vétérinaire.

Cette thèse a pour objectif d'effectuer dans un premier temps une revue bibliographique des connaissances actuelles sur la MRC chez le chat. Nous rappellerons les bases anatomiques et physiologiques nécessaires à la compréhension de cette affection puis nous nous pencherons sur les données épidémiologiques, physiopathologiques sur la démarche diagnostique et l'approche thérapeutique de la MRC. Dans un second temps, nous aborderons les solutions actuelles et futures dans la prévention, le diagnostic et le suivi de cette maladie féline.

Première partie : La Maladie Rénale Chronique Féline

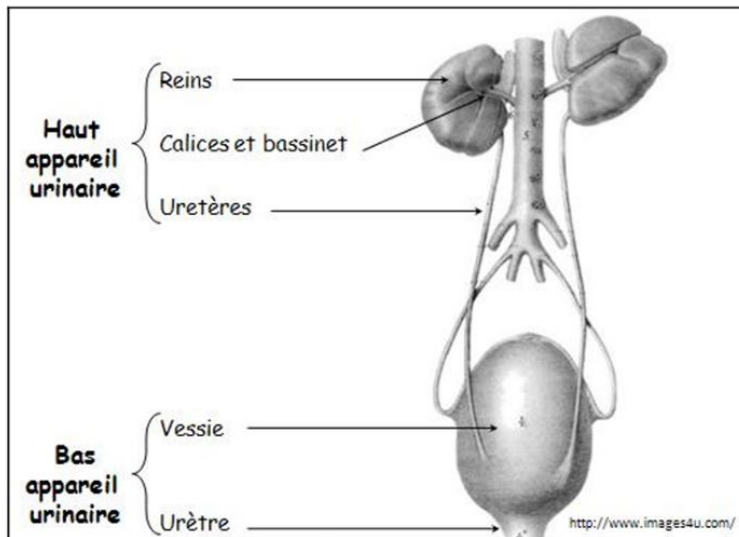
1. Anatomie et physiologie de l'appareil urinaire

A. Anatomie de l'appareil urinaire

L'appareil urinaire se divise en deux parties (Figure 1) :

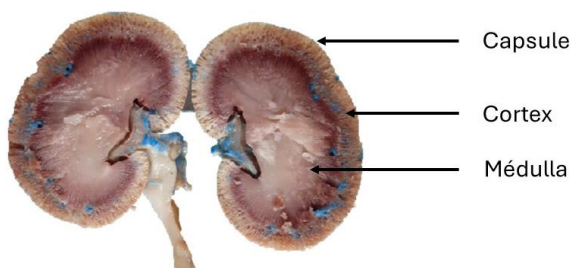
- Le haut appareil urinaire, composé des reins dont les calices et bassinets, et des uretères
- Le bas appareil urinaire, composé de la vessie et de l'urètre

Figure 1 : Anatomie de l'appareil urinaire du chat



Le rein est une glande paire située en région rétropéritonéale. Chez les carnivores domestiques, il est en forme de haricot et mesure entre 3,5 et 4,5 centimètres. Il possède deux bords, le bord latéral, qui est convexe et dirigé vers la paroi abdominale et le bord médial, qui est concave (Harriet Han, 2014).

Figure 2 : Coupe transversale du rein du chat



Chez le chat, le rein droit se projette au niveau de L1-L3/4 et le rein gauche au niveau de L2-L4/5. Ils sont facilement palpables par leurs bords latéraux à travers la paroi abdominale. Recouvert d'une capsule, le rein est constitué de deux zones, la zone corticale et la zone médullaire (Kolb, 2012) (Figure 2) .

L'unité fonctionnelle du rein est le néphron, lui-même composé du glomérule et du tubule rénal, qui assure la formation de l'urine définitive par divers échanges avec le réseau vasculaire. Le glomérule est composé d'un réseau capillaire, enfermé au sein d'une capsule épithéliale, qui est interposé entre les artérioles afférentes et efférentes au glomérule (ANGLICHEAU *et al.*, 2016).

B. Physiologie de l'appareil urinaire

L'appareil urinaire possède deux fonctions se réalisant au sein du néphron (Bessaguet et Desmoulière, 2020):

- Une fonction exocrine comprenant la production d'urine, l'élimination des déchets et le maintien de l'homéostasie grâce à des équilibres hydriques, hydroélectrolytiques, et acido-basiques.
- Une fonction endocrine par la production de rénine, d'érythropoïétine et de la forme active de la vitamine D.

a. La fonction exocrine

La fonction exocrine du rein est composée de trois mécanismes : la filtration, la réabsorption et la sécrétion (CUEN, 2016).

- *La filtration*

Lors de la filtration glomérulaire, les liquides et les solutés sont filtrés du plasma à travers la capsule glomérulaire. La filtration est à l'origine de la formation de l'ultrafiltrat glomérulaire ou "urine primitive".

La filtration glomérulaire est régie par la pression nette de filtration (PNF), différence entre la pression oncotique et la pression hydrostatique, de part et d'autre du corpuscule glomérulaire (CUEN, 2016).

Le Débit de Filtration Glomérulaire (DFG) est proportionnel à la PNF et est défini comme le volume de filtrat formé par les glomérules des deux reins en une minute. Le DFG est donc un bon marqueur de la fonction rénale (Finch, 2014).

- *La réabsorption*

La réabsorption tubulaire est l'étape de réabsorption du filtrat vers le plasma des capillaires péri-tubulaires. Les anions et cations, le glucose, les acides aminés, l'eau, l'urée, la créatinine et les protéines plasmatiques y sont réabsorbées.

- *La sécrétion*

La sécrétion se réalise au sein du tubule rénal et a pour rôle d'éliminer les substances indésirables telles que les médicaments. Les ions et molécules sont sécrétés à partir des capillaires péri-tubulaires ou des cellules tubulaires vers le filtrat. Les principaux ions et molécules sécrétés sont le potassium, les ions bicarbonates et l'urée.

b. La fonction endocrine

Le rein est responsable de la synthèse de molécules à effet paracrine sur les cellules rénales ou à effet endocrine. Cette fonction est assurée par la partie tubulaire du néphron.

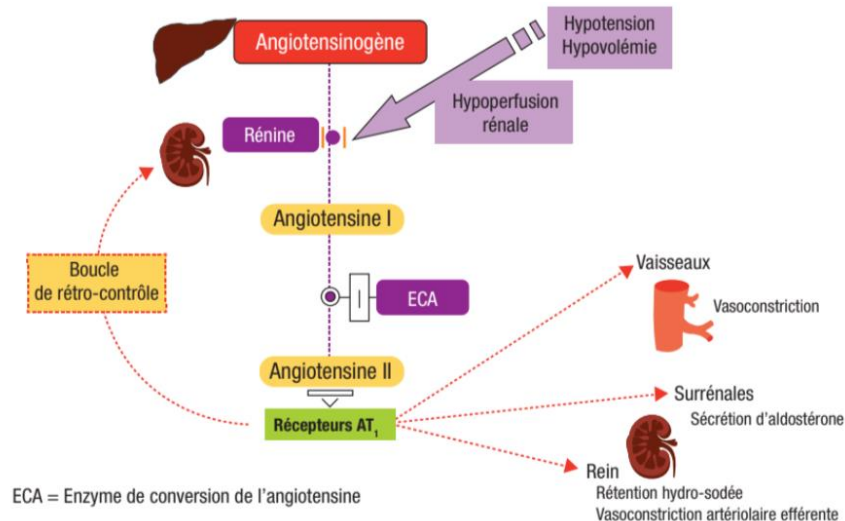
- *Le Système Rénine Angiotensine Aldostérone (SRAA)*

La rénine est sécrétée au niveau de l'appareil juxta-glomérulaire en réponse aux variations de la volémie, qui induit la formation d'angiotensine I à partir d'angiotensinogène. L'angiotensine I est alors convertie en angiotensine II à partir de l'enzyme de conversion de l'angiotensine.

L'angiotensine II est à l'origine d'une augmentation de la volémie et donc de la pression artérielle systémique (PAS) par les mécanismes suivants (Figure 3) :

- La vasoconstriction, en particulier celle des artéioles afférentes qui provoque une diminution du DFG.
- La sécrétion d'aldostérone par le cortex surrénalien.
- La rétention de Na⁺ et la sécrétion de K⁺ et H⁺.
- La libération d'hormone antidiurétique (ADH) qui augmente la réabsorption d'eau.

Figure 3 : Physiologie de la SRAA (Anglicheau et al., 2016).



- *La vitamine D*

Le rein intervient dans la synthèse de la vitamine D sous forme active. Il permet la formation de calcitriol au niveau du tubule sous contrôle de la parathormone. La vitamine D est produite à partir de son précurseur hépatique. Elle a pour rôle d'augmenter l'absorption digestive et rénale de calcium, et l'absorption intestinale de phosphate (F. Bessaguet, 2020).

- *L'érythropoïétine*

Les cellules interstitielles péri-tubulaires synthétisent l'Erythropoïétine (EPO) qui stimule la production de globule rouge par la moelle osseuse en raison d'une hypoxie cellulaire.

- *Les hormones peptidiques*

Les peptides et petites protéines sont dégradés par les cellules tubulaires. Ce catabolisme participe à la régulation de l'activité hormonale. Ainsi, la sécrétion d'insuline peut s'élever lors de MRC (CUEN, 2016a).

2. Présentation générale, épidémiologie et physiopathologie de la Maladie Rénale Chronique féline

A. Définition

La MRC se définit comme une atteinte fonctionnelle et/ou structurelle d'un ou des deux reins, présente depuis au moins trois mois. Cependant, le degré d'altération fonctionnelle ne correspond pas toujours à la perte de structure. Ceci implique que la MRC nécessite une perte irréversible de la fonction et/ou de la structure rénale, qui reste stable un certain temps mais qui est finalement progressive. La MRC se traduit par une multitude de maladies allant d'une lésion structurelle

mineure sur un rein à une large perte de néphrons affectant les deux reins (Polzin, 2011).

B. Epidémiologie

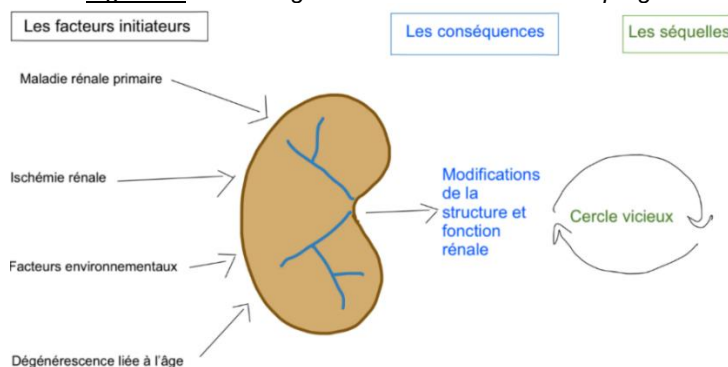
La MRC est une maladie fréquente chez le chat, 53% des chats âgés de plus de 7 ans sont atteints d'une MRC. La MRC est considérée comme la deuxième cause de mortalité chez le chat. Aucune prédisposition raciale ou sexuelle n'a été rapporté (Bartges, 2012).

C. Physiopathologie

Lors de MRC, une phase d'initiation de la maladie précède une phase de progression. Un ou plusieurs facteurs tels qu'une maladie rénale primaire, la dégénérescence liée à l'âge, l'ischémie rénale et des facteurs environnementaux, initient des lésions rénales. Ces dernières provoquent des modifications de la structure et de la fonction rénale. La progression de la maladie contribue davantage aux lésions rénales et à la perte de néphrons, considérées comme des séquelles de la maladie. Ces conséquences et séquelles fonctionnent en association comme un cercle vicieux sur les lésions rénales. Sans intervention thérapeutique, elles conduisent à une MRC (Brown *et al.*, 2016).

Une maladie rénale primaire est donc responsable de dommages sur les reins, ce qui entraîne une perte de néphron. De plus, la perte de néphron est telle que certains facteurs propres à l'animal sont à l'origine de lésions rénales irréversibles. C'est par ce processus que la phase de progression de la maladie est entretenue. Cette maladie rénale primaire est donc désignée la "cause" de la MRC (Figure 4).

Figure 4 : Pathogénie de l'initiation et la progression de la maladie rénale chronique chez le chat.



Chez le chat, il existe une grande variété de causes primaires de MRC :

- Néphrite tubulo-interstitielle idiopathique.
- Pyélonéphrite chronique.
- Urétérolithiases.
- Néphrite pyogranulomateuse secondaire à la Péritonite Infectieuse Féline.
- Lymphome rénal.
- Prédispositions raciales : maladie polykystique des reins, glomérulopathie familiale.
- Le virus de la leucose féline par développement d'un lymphome rénal

Bien qu'il soit désirable de raisonner sur la découverte d'une maladie primaire responsable de la MRC, il est aussi important de garder à l'esprit que, la combinaison de facteurs intrinsèques aux animaux et de facteurs environnementaux plus ou moins associés à des insuffisances rénales aiguës répétées, sont sûrement les principales causes de MRC chez le chat (Brown *et al.*, 2016).

Face au large panel de causes de MRC, il est important d'adopter une démarche diagnostique rigoureuse pour s'assurer d'une évaluation correcte de l'affection.

3. Démarche diagnostique face à une Maladie Rénale Chronique féline

A. Présentation clinique

Les chats atteints d'une MRC montrent les signes cliniques suivants :

- Un amaigrissement associé à une perte musculaire.
- Une PolyUro-PolyDipsie (PUPD).
- Une déshydratation.
- Une perte d'appétit.
- Des vomissements.
- Un abattement.
- Une halitose.

B. La classification IRIS

La société IRIS (International Renal Interest Society) a élaboré un système de classification universel des MRC. Cette classification permet la gradation de la MRC en 4 stades, basés sur les valeurs de créatinine plasmatique et de DiMéthylArginine Symétrique (SDMA) plasmatique mesurées à deux reprises sur un animal à jeun et normohydraté. Ces stades sont subdivisés en sous-stades selon les valeurs du Ratio Protéines sur Créatinine Urinaires (RPCU) et de la mesure de la PAS. Ces deux sous-stades sont indépendants de la classification de la MRC (IRIS, 2023).

Le meilleur outil pour évaluer la fonction rénale et le stade de la MRC est la détermination du DFG mais sa mesure est complexe et coûteuse. C'est pourquoi la mesure de la créatinine est l'indicateur standard du DFG. Cependant, on observe une modification de la créatinine lors d'une diminution de 75% du DFG, tandis que la concentration de SDMA augmente dès la perte de ¼ des fonctions rénales. La SDMA est plus sensible que la créatininémie dans la détection de la MRC (Hall *et al.*, 2014). Elle est donc un marqueur plus exact et plus précoce pour la détermination du DFG, ce qui rend son dosage intéressant lors de suspicion de MRC (Idexx, 2024). De plus, la créatininémie augmente lorsque la masse musculaire augmente, ce qui n'est pas le cas de la SDMA (Nabity *et al.*, 2015).

Le dosage de la SDMA est indiqué lors d'évaluation de la fonction rénale et particulièrement :

- Chez les patients amyotrophiés.
- Pour le suivi des chats âgés.
- Lorsque l'urée et la créatinine sont dans l'intervalle de référence dans le contexte d'une suspicion de MRC.

L'utilisation de cette classification permet d'apporter un traitement et un suivi approprié au patient.





Le stade 1 correspond aux animaux ne présentant pas de symptôme d'insuffisance rénale mais atteints d'une lésion rénale. Celle-ci est mise en évidence soit par des examens d'imagerie, par la persistance d'une protéinurie ou encore par une créatininémie dans les valeurs hautes de l'intervalle de référence.

Le stade 2 décrit une MRC débutante, c'est-à-dire qu'un quart des néphrons sont lésés. La valeur de la créatininémie est légèrement supérieure à l'intervalle de référence. Les signes cliniques sont cependant un amaigrissement voire une PUPD.

Le stade 3 montre une azotémie rénale modérée liée à la destruction de 75% des néphrons. De nombreux signes extra-rénaux peuvent être présents mais leur étendue et gravité sont variables. En cas d'absence de signes cliniques de MRC, on peut conclure à un stade 3 précoce tandis que la présence de signes cliniques marqués peut justifier un classement en stade 3 tardif.

Le stade 4 est le stade terminal à partir duquel des signes cliniques atteignant l'état général du chat sont observés. A ce stade, un traitement à base de perfusion de fluides par voie intraveineuse pour maintenir leur hydratation est souvent nécessaire (Figure 5).

Figure 5 : Classification IRIS de la MRC chez le chat (IRIS, 2023)

		 Stade 1	 Stade 2	 Stade 3	 Stade 4
		Pas d'azotémie (Créatinine normale)	Légère azotémie (Créatinine normale ou légèrement élevée)	Azotémie modérée	Azotémie sévère
Créatinine en mg/dL	Stade reposant sur une créatinine stable	Inférieure à 1.4 (125 µmol/L)	1.4-2.8 (125 - 250 µmol/L)	2.9-5.0 (251 - 440 µmol/L)	Supérieure à 5.0 (440 µmol/L)
		Inférieure à 1.6 (140 µmol/L)	1.6-2.8 (140 - 250 µmol/L)	2.9-5.0 (251 - 440 µmol/L)	Supérieure à 5.0 (440 µmol/L)
SDMA* en µg/dL	Stade reposant sur une SDMA stable	Inférieure à 18	18-35	36-54	Supérieure à 54
		Inférieure à 18	18-25	26-38	Supérieure à 38
RPCU	Sous-stade en fonction de la protéinurie	Pas de protéinurie < 0,2	Protéinurie limite 0,2 – 0,5	Protéinurie > 0,5	
		Pas de protéinurie < 0,2	Protéinurie limite 0,2 – 0,4	Protéinurie > 0,4	
Pression artérielle systolique en mmHg	Sous-stade en fonction de la pression artérielle	Pas d'hypertension < 140	Hypertension limite 140-159	Hypertension sévère ≥ 180	
		Hypertension 160-179	Hypertension sévère ≥ 180		

C. La démarche étiologique

La détermination de l'étiologie de la MRC permet d'adapter les traitements mis en place. Pour en déterminer la cause, le clinicien peut s'aider de la race du chat et des maladies systémiques présentes.

Elle est principalement importante lorsque la maladie n'est pas avancée. Si elle l'est, une fibrose rénale s'est mise en place et complique le diagnostic causal.

a. L'imagerie

Certaines lésions comme une tumeur peuvent être mises en évidence par des examens d'imagerie tels que l'échographie ou le scanner. De plus, ils donnent des indications objectives sur la cause de la MRC, telles que la taille des reins.

b. L'analyse d'urine

La protéinurie peut être un indicateur potentiel de lésions glomérulaires ou tubulaires et nécessite une attention particulière, car elle est un facteur pronostic important de MRC.

Après avoir exclue une inflammation du bas appareil urinaire, on peut évaluer cette protéinurie en mesurant le RPCU :

- Si le RPCU est inférieure à 0,4, on note une absence de protéinurie.
- Si le RPCU est compris entre 0,4 et 2, le diagnostic de protéinurie est douteux. Le clinicien doit s'assurer que cette valeur n'est pas provoquée par une Insuffisance Rénale Aiguë (IRA). Si la MRC est responsable de cette valeur, une électrophorèse est recommandée pour mettre en évidence l'origine de cette protéinurie, tubulaire ou glomérulaire.
- Si le RPCU est supérieur à 2 alors une lésion glomérulaire peut être suspectée.

Les chats sont capables de concentrer leurs urines malgré l'azotémie et particulièrement lors des premiers stades de la maladie, ce qui ne modifie pas la densité urinaire.

c. Les paramètres biochimiques

La mesure des concentrations sanguines des paramètres rénaux, l'urée et la créatinine, permet de mettre en évidence la présence d'une MRC. Comme détaillé dans la partie B, la valeur de la créatinine joue un rôle dans la classification IRIS de la MRC. La créatinine est le marqueur traditionnel du DFG, elle est largement utilisée par les vétérinaires car économique, facilement utilisable et avec une faible variation intra-individuelle. Il existe des limites à l'utilisation de la créatininémie : elle est diminuée en cas de diminution de la masse musculaire et elle ne permet pas de déceler les lésions qui n'altèrent pas le DFG. Ces différentes limites peuvent retarder la détection précoce de la MRC et conduire à l'introduction de nouveaux biomarqueurs indirects du DFG tels que la SDMA.

La SDMA a l'avantage d'être plus sensible que la créatinine car elle augmente lorsque le DFG a diminué de 40%. De plus, elle n'est pas dépendante de la masse musculaire. Cependant, les données sur sa spécificité sont rares donc toute augmentation doit être interprétée avec prudence. La classification IRIS a récemment intégré la SDMA au sein de son classement de la MRC en précisant qu'une augmentation persistante de la SDMA peut indiquer une MRC de stade 1 (Kongtasai *et al.*, 2022).

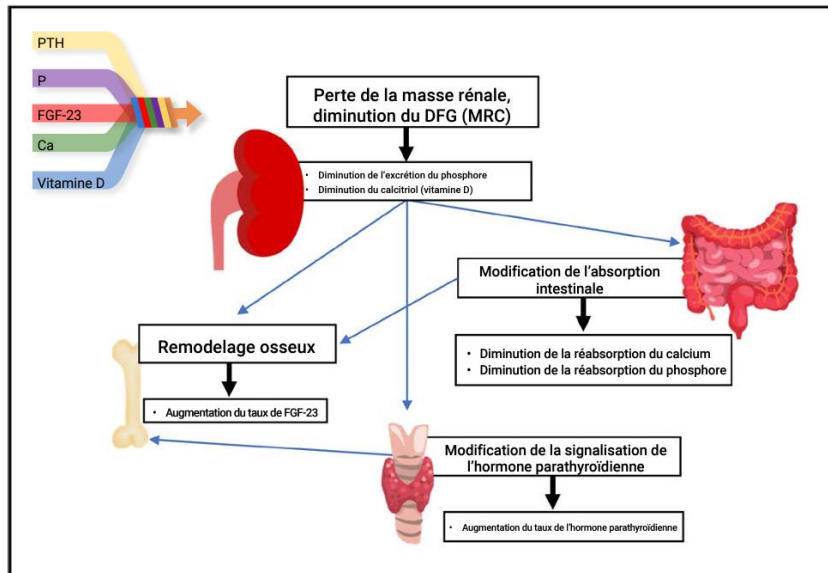
Lors de MRC, l'excrétion de phosphate par les reins est endommagée car la diminution du DFG provoque un déséquilibre de l'homéostasie phosphocalcique. Ce déséquilibre qui concerne la MRC met en jeu le Fibroblast Growth Factor 23 (FGF-23) dont la concentration augmente lorsque le taux sérique de phosphate est élevé. Le FGF-23 est une hormone responsable de la régulation du phosphore et du calcitriol produits par les ostéocytes et les ostéoblastes. La production de FGF-23 est stimulée par des taux sériques en phosphore et calcitriol élevés qui favorisent l'excrétion urinaire du phosphore et diminuent sa réabsorption intestinale (Kongtasai *et al.*, 2022). Le FGF-23 augmente avec la sévérité de la MRC mais ne devance pas nécessairement les paramètres rénaux tels que la créatinine ou la SDMA. Il n'a donc pas un rôle de diagnostic mais plutôt un rôle d'indicateur d'intervention thérapeutique (Idexx, 2023).

De plus, plusieurs études ont essayé de prouver que le FGF-23 en tant que biomarqueur rénal est plus sensible que la SDMA. Cependant, aucune des études publiées n'a montré une distinction notable de concentration de FGF-23 entre les chats sains et les chats atteints de MRC et entre les stades IRIS 1 à 4 (S, 2024).

La réduction du DFG engendre une chute de l'excrétion du phosphore et de la production de calcitriol. Il se produit, d'une part, un remodelage osseux qui est à l'origine d'une augmentation de la concentration de FGF-23 dans la circulation sanguine. D'autre part, on note une diminution de la

réabsorption intestinale du calcium et du phosphore. On peut alors observer une augmentation de la concentration en parathormone (PTH) secondaire à la diminution de la calcémie et également appelée « hyperparathyroïdie rénale secondaire » (Figure 6).

Figure 6 : Schéma simplifié de la physiologie du FGF-23 lors de la MRC (Idexx, 2023).



d. La biopsie rénale

La biopsie peut devenir un examen complémentaire intéressant lorsqu'une protéinurie persiste, pour confirmer une glomérulopathie ou faire la distinction entre une glomérulonéphrite et une amyloïdose. Elle permet aussi d'établir une néphropathie familiale ou la cause d'une néphromégalie. Elle est cependant contre-indiquée lors de MRC de stade 3 et 4 car elle ne modifiera pas le traitement.

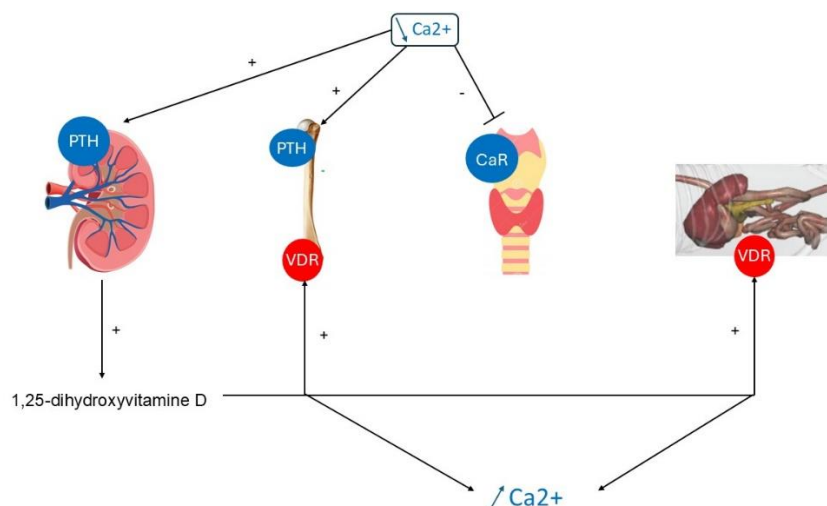
D. Les complications

La chronicité de la maladie et la baisse évolutive de fonctionnalité rénale sont à l'origine de modifications biochimiques et systémiques pouvant nécessiter la mise en place d'un traitement spécifique.

a. Hyperphosphatémie

Lors de MRC, une hyperphosphatémie sanguine par diminution d'excrétion urinaire du phosphate se développe (Vervloet et Ballegooijen, 2018). Associée à une baisse de la production de calcitriol, elle est à l'origine du développement d'une hyperparathyroïdie secondaire qui permet, dans les premiers stades de la MRC, de faire diminuer la phosphatémie en augmentant la phosphaturie. A mesure que la maladie progresse et avec la destruction du tubule proximal, la phosphaturie diminue et on note une hyperphosphatémie (Peacock, 2010).

Figure 7 : Régulation de l'homéostasie du calcium



Le calcium (Ca) et l'hormone parathyroïdienne (PTH), régulent la concentration de calcium ionisé dans le sérum. Ainsi, lorsque la calcémie diminue, la sécrétion de PTH augmente rétablissant le calcium sérique. La chute de la calcémie inactive le récepteur au calcium (CaR) de la glande parathyroïdienne et active le récepteur parathyroïdien (PTH) au niveau des os et du rein. Dans les reins, la fixation de la PTH à son récepteur rénal augmente la sécrétion de 1,25-dihydroxyvitamine D (1,25D) qui agit sur le récepteur à la vitamine D (VDR) dans l'intestin, augmente l'absorption active de calcium et la résorption osseuse du calcium (Figure 7).

b. Acidose métabolique et hypokaliémie

L'hypokaliémie est particulièrement présente chez environ 20 à 30% des chats IRIS 2 ou 3. Une diminution de la réabsorption de potassium est suspecté comme étant à l'origine de cette hypokaliémie mais le mécanisme est encore mal compris (M. Quimby, 2016).

L'acidose métabolique correspond à une augmentation des ions hydrogènes dans le sang. Or un transport H^+/K^+ est présent au niveau des cellules provoquant l'entrée de ces ions hydrogènes dans la cellule et la sortie du potassium. Ce potassium est alors excrété au niveau des reins, ce qui joue un rôle dans l'hypokaliémie. Elle est présente chez moins de 10% des chats atteints d'une MRC de stade IRIS 2 ou 3 mais chez près de 50% des chats présentant une urémie (Bartges, 2012).

L'apparition de cette complication contribue à la progression de la MRC (Adamczak et Surma, 2021).

c. Hypertension artérielle systémique

L'hypertension artérielle (HTA) systémique peut être une cause ou une conséquence d'une diminution de la fonctionnalité rénale. Elle favorise la progression de la maladie et peut causer des lésions irréversibles sur plusieurs organes dont les reins (Burnier et Damianaki, 2023).

Lorsque le diagnostic est établi à la suite de l'examen clinique, des examens biochimiques, urinaires et d'imagerie, il convient d'apporter le traitement thérapeutique en adéquation avec l'étiologie trouvée. Nous allons donc faire un point sur le traitement de la MRC chez le chat.

d. Les infections du tractus urinaire (ITU)

Les chats présentant une MRC ont un risque élevé de développer une ITU et donc une pyélonéphrite ascendante. Elles sont une cause de décompensation aigue d'une néphropathie aigue.

e. L'anémie

Une anémie normochrome normocytaire hyporégénérative ou arégénérative par défaut de synthèse en érythropoïétine peut se mettre en place. Cette anémie est un facteur pronostic péjoratif.

E. L'approche thérapeutique

Le traitement de la MRC a trois objectifs : prévenir et/ou traiter les complications de la diminution de la fonction rénale, gérer les comorbidités et ralentir la progression de la maladie (Polzin, 2011). Il s'articule autour de deux axes : la gestion des crises d'IRA sur fond de MRC et la gestion de la MRC hors crise, à domicile. Les crises d'IRA sur fond de MRC se gèrent grâce à une hospitalisation de l'animal et à la perfusion de fluides par voie intra-veineuse alors que le maintien de la MRC est principalement géré par une alimentation

a. Gestion des crises d'IRA

Les chats atteints de MRC montrent une polyurie par incapacité à concentrer les urines. Une polydipsie secondaire se met alors en place. Associée à des pertes hydriques extra-rénales telles que des vomissements ou de la diarrhée, une déshydratation survient. Il est alors nécessaire d'hospitaliser le chat pour lui apporter, par voie parentérale, des solutés isotoniques riches en sodium (NaCl 0,9%) et donc corriger la déshydratation.

b. Gestion de la MRC à domicile

• L'alimentation

Le traitement diététique est fondamental dans la prise en charge de la MRC. Il a pour but de satisfaire les besoins nutritionnels et énergétiques du chat, d'atténuer les signes cliniques et les conséquences de l'intoxication urémique, de minimiser les perturbations de l'équilibre hydroélectrolytique et acido-basique et de ralentir la progression de la maladie rénale (Elliott, 2006).

Il est démontré une augmentation de la durée de survie (7 mois avec une alimentation de maintenance et 16 mois avec une alimentation spécifique de soutien rénal) et de la qualité de vie lors de l'apport d'une alimentation de soutien rénal. Les caractéristiques de ce type de régime sont une faible teneur en phosphore, en protéine et en acide eicosapentaénoïque (Bartges, 2012).

L'anorexie est un des signes cliniques lors de MRC. Lorsqu'une anorexie est présente des conséquences sur l'équilibre hydroélectrolytiques et acido-basique se mettent en place. Il peut alors être nécessaire d'utiliser des orexigènes tels que la mirtazapine qui montrent une bonne efficacité chez le chat.

L'alimentation à visée de protection rénale est souvent suffisante pour corriger l'hypokaliémie et l'acidose métabolique (Bartges, 2012). Elle permet de minimiser les épisodes de crise urémique et les décès liés à l'azotémie (Ross *et al.*, 2006). L'hyperparathyroïdie secondaire est traitée par la faible teneur en phosphore de cette alimentation.

• Traitement de l'HTA systémique

L'HTA systémique est un signe clinique de la MRC. Le traitement de l'hypertension est initié lorsque la pression systolique est supérieure à 160 mmHg, que la pression diastolique est supérieure à 110 mmHg ou que l'on observe une atteinte d'organes cibles telle qu'une rétinopathie hypertensive. L'amlodipine est la molécule utilisée en tant qu'hypotenseur ainsi que le telmisartan (Bartges, 2012).

• Traitement de la protéinurie

En cas de MRC, le DFG est diminué, la pression intraglomérulaire augmente et une protéinurie est observée. Une alimentation pauvre en protéines est alors recommandée associée à l'administration d'inhibiteurs de l'Enzyme de Conversion de l'Angiotensine (IECA). Les IECA ont pour rôle de réguler la pression intraglomérulaire. Ils n'ont pas d'effet sur la mortalité mais ils améliorent la prise de poids

et l'appétit (Bartges, 2012).

- *Traitement de l'anémie*

Une complémentation hormonale à base de Darbopoiétine si l'hématocrite chute en dessous de 20%. La Darbopoiétine est administrée tous les jours jusqu'à atteinte d'un hématocrite de 35% puis tous les quinze jours.

c. Surveillance multiple

La MRC est une affection progressive qui nécessite un suivi rapproché pour adapter au mieux le traitement. La fréquence et le type d'examens complémentaires réalisés sont choisis à la lumière de la rapidité de progression de la maladie. Un animal souffrant d'une MRC de stade IRIS 1 ou 2, devrait être suivi tous les 6 mois, et un animal au stade 3 ou 4, tous les 3 mois. Le suivi implique un suivi de la PAS, des paramètres biochimiques rénaux (urée, créatinine), de l'ionogramme (en particulier phosphate, potassium) et une analyse urinaire. De plus, lorsqu'une perte de poids de plus de 5% est constatée, il est recommandé de consulter un vétérinaire (Bartges, 2012).

La complexité de diagnostic de la MRC et les complications associées, peuvent rendre le traitement fastidieux. Ainsi, tout comme en médecine humaine, les chercheurs ont essayé de développer des outils qui aident les propriétaires et le vétérinaire dans la prévention, la prédiction et le suivi de la MRC chez le chat.

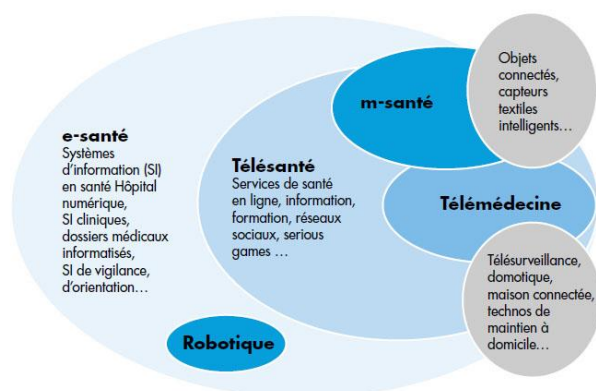
Deuxième partie : Approches actuelles et innovations technologiques dans la prévention, la prédiction et le suivi de la Maladie Rénale Chronique chez le chat

1. Introduction à la e-santé

A. Définition

La e-santé est présentée, pour la première fois, au 7ème congrès international de la télémédecine en 1999 par une équipe australienne. Elle est définie par John Mitchell comme « l'usage combiné de l'internet et des technologies de l'information à des fins cliniques, éducationnelles et administratives, à la fois localement et à distance » (Mitchell, 2000). La e-santé est alors la rencontre entre deux domaines : la santé et le numérique. Elle consiste en l'utilisation des outils de production, transmission, de gestion et de partage d'informations numérisées au bénéfice des pratiques médicales. Ce terme s'est alors propagé dans le monde entier.

Figure 8 : L'ensemble des concepts représentant la e-santé (Livre blanc du Conseil national de l'Ordre des médecins, 2015).



En médecine humaine, la e-santé recouvre un ensemble d'éléments composé de : la télésanté, la robotique, les objets connectés et la télémédecine.

La m-santé est définie par l'OMS (Organisme Mondial de la Santé) comme « les pratiques médicales et de santé publique reposant sur des dispositifs mobiles tels que les téléphones portables, systèmes de surveillance des patients, assistants numériques personnels et autres appareils sans fil ».

La télémédecine est bien décrite en médecine humaine en 5 actes par le décret du 19 octobre 2010 : La téléconsultation, la télésurveillance, la téléexpertise, la téléassistance, la régulation médicale.

La télésanté est définie comme « l'utilisation des outils de production, de transmission, de gestion et de partage d'informations numérisées au bénéfice des pratiques tant médicales que médico-sociales » d'après Pierre Lasbordes dans un rapport remis à la ministre de la santé et des sports en 2009 (Lasbordes, 2009).

La robotique est le recours à un robot médical lors d'applications thérapeutiques, par exemple en chirurgie.

La e-santé est largement utilisée en médecine humaine et commence à gagner du terrain en médecine vétérinaire. C'est alors que la e-santé animale est définie comme l'usage combiné des technologies de l'information et de la communication à des fins cliniques, informationnelles, éducationnelles ou administratives, à la fois localement ou à distance pour protéger et améliorer la santé et le bien-être des animaux.

L'utilisation des objets connectés qui transmettent des données au propriétaire et potentiellement au vétérinaire sur la santé de l'animal peut donc être considérée comme de la e-santé. Ceux-ci pourraient permettre la prévention, le diagnostic et le suivi de son bien-être en s'assurant de l'équilibre de vie de celui-ci.

La e-santé nécessite un ensemble de données pour apporter au patient le bénéfice aspiré. Internet et l'évolution de la société ont révolutionné la médecine. Les patients souhaitent participer activement à la gestion de leur santé avec un suivi hebdomadaire. C'est aussi le cas pour les propriétaires avec leurs animaux (Poitte, 2017).

B. La médecine des « 4P » ou « 6P » en santé humaine

L'essor des technologies a mis en lumière, depuis les années 2000, la médecine des "4P" : prédictive, préventive, personnalisée, participative (figure 9). Les chercheurs d'AstraZeneca ont énoncé que pour aboutir à une prescription de médicaments plus ciblée, sécuritaire et efficace, il est nécessaire d'identifier le profil génétique des patients.

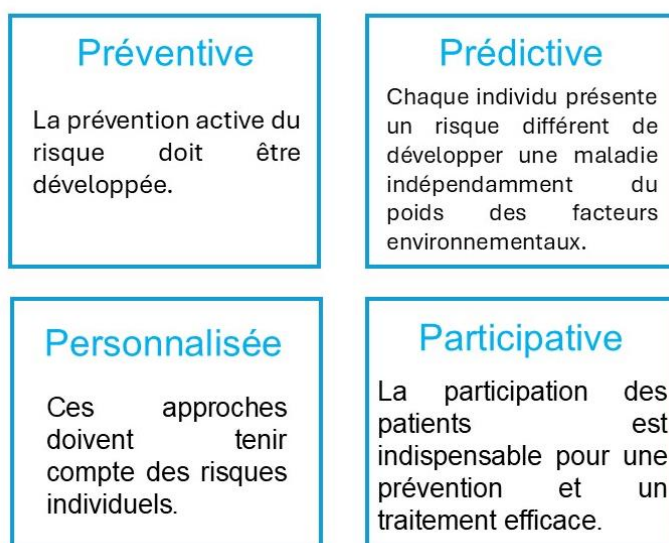
La construction du concept de médecine des "4P" a été complétée en 2008 par le President's Council of Advisor on Science and Technology (PCAST) en définissant la médecine personnalisée dans un rapport "Priorities for Personalized Medicine". D'après le PCAST, cette médecine permet d'adapter le traitement à chaque patient selon ses spécificités individuelles. Cette personnalisation n'a pas pour objectif de créer un médicament par patient mais d'affecter les patients à une sous-population, qui se distingue par rapport à leur réponse à un traitement ou par rapport à un facteur de risque d'apparition d'une maladie (PCAST, 2008) .

C'est en 2013 que la médecine des "4P" est définie en médecine humaine, par Leroy Hood, chercheur à l'Institut des Systèmes de Biologie (ISB) à Seattle (Hood, 2019). La médecine des « 4P » est une médecine (Synmad, 2020) :

- Prédictive ou de précision : on se réfère à la connaissance des facteurs de risque et du génome de l'individu associée aux effets secondaires des médicaments pour prédire l'apparition d'une affection et de déterminer le pronostic de survie du patient.
- Préventive : on favorise la détection précoce des maladies et on améliore la qualité de vie des patients. Le médecin peut faire un état des lieux des conditions de vie de l'individu et détecter l'apparition de certaines maladies grâce à des objets connectés.
- Personnalisée : on tient compte des données génétiques et environnementales récoltées pour mettre en place des soins adaptés à l'individu tout au long de la prise en charge (détection, traitement, suivi). La collecte des informations est obtenue par des capteurs comme les objets connectés. Les renseignements seront centralisés sur un tableau de bord d'accès facile pour le médecin.
- Participative : Les patients se responsabilisent face à la maladie. Ils peuvent facilement visualiser les résultats de leurs efforts grâce aux objets connectés et être acteur de la gestion de leur santé (Galland, 2020).

Figure 9 : Médecine 4P (Alain Tassy, 2017)

MÉDECINE 4P



L'évolution technologique amène désormais à parler de médecine des "6P" en ajoutant, en tant que « 5^{ème} P », la médecine fondée sur des preuves, c'est-à-dire que la prise en charge s'appuie sur des données probantes calculées pour chaque individu.

Un 6ème "P" commence à voir le jour malgré les questions éthiques qu'il soulève, appelé « parcours patient ». Ce dernier a pour but de créer une coopération entre les différents professionnels de la santé et du paramédical, et une fluidification de ce parcours (Slim *et al.*, 2021).

C. L'application de la télémédecine en médecine vétérinaire

D'après l'Ordre National des Vétérinaires, la télémédecine se définit comme « une forme de pratique à distance de la médecine vétérinaire utilisant les nouvelles technologies d'information et de communication. » (Ordre national des vétérinaires, 2020)

Elle a été autorisée à titre expérimental pendant dix-huit mois entre mai 2020 et novembre 2021 par le décret n° 2020-526 du 5 mai 2020. Il est attendu un « wagon législatif » afin de régulariser l'autorisation de recours à la télémédecine vétérinaire dans un cadre proche de celui de l'expérimentation.

La télémédecine vétérinaire est composée des cinq même branches que la télémédecine humaine : la téléconsultation, la télésurveillance, la téléexpertise, la téléassistance, la régulation médicale. Ces différents axes ont été étayés par le Conseil de l'Ordre des vétérinaires (tableau 1).

Tableau 1 : Nomenclature des actes de télémédecine vétérinaire (Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt, 2023)

Acte	Définition
Téléconsultation	Donner une consultation à distance en temps réel.
Télesurveillance	Interpréter à distance des données nécessaires au suivi médical d'un animal ou au suivi sanitaire d'une population animale.
Téléexpertise	Solliciter à distance l'avis d'un ou de plusieurs vétérinaires en raison de leur formation ou de leurs compétences particulières.
Téléassistance	Assister à distance, au cours de la réalisation d'un acte, un autre vétérinaire.
Télérégulation nommée aussi régulation médicale vétérinaire	Fournir au demandeur, en situation présumée d'urgence, la conduite à tenir au vu des commémoratifs recueillis.

Dans sa description de la télémédecine vétérinaire, l'Ordre des vétérinaires a plus précisément développé des informations sur la téléconsultation. Une infographie expliquant la téléconsultation vétérinaire a été partagée pour en informer les propriétaires d'animaux (Annexe 1).

D. Définition de l'Intelligence Artificielle

Lorsque l'on aborde le sujet des nouvelles technologies, le terme « Intelligence Artificielle » (IA) est souvent mentionné. Le Larousse donne une définition de l'IA mais avec plus de recherche on se rend compte qu'il n'est pas si simple de trouver une définition précise. Le Larousse donne la définition suivante : « Ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine. »

En effet, l'IA a sa place dans la e-santé et elle est impliquée dans la médecine de précision. Comme mentionné précédemment, la médecine de précision se base sur les facteurs de risque inhérents à l'individu pour prédire la survenue d'une affection. D'après un des podcasts publiés par l'École de l'Intelligence Artificielle en Santé (EIAS) du Centre Hospitalier Universitaire de Montréal (CHUM), la médecine de précision a pour objectif d'augmenter la capacité d'analyse dans la décision thérapeutique, d'améliorer la médecine en générant de nouvelles connaissances, de mieux valider les traitements et de générer des hypothèses. Elle permet de prévenir l'apparition de maladies et d'accompagner l'individu dans la gestion de son affection (EIAS du CHUM, 2021).

Un type d'IA utilisée en santé est l'IA prédictive qui a pour objectif de modéliser des prédictions en s'appuyant sur des analyses statistiques. Son fonctionnement repose sur la récolte d'informations historiques pour prédire des événements futurs (Abdullahi, 2023). Elle a recours à des algorithmes d'apprentissage automatique, appelés « machine learning » (Coheris, 2022). Le machine learning est une branche de l'Intelligence Artificielle qui permet à des modèles, entraînés sur un grand volume de données de données des prédictions (Grignola, 2024).

Dans le cas de la MRC chez le chat, nous parlerons principalement du modèle de réseau de neurones artificiel. Ce dernier a pour objectif de mimer le cerveau humain. Plusieurs couches de neurones sont assemblés pour créer un réseau qui sera plus efficace et plus précis dans la prédiction des événements (DataBird, 2024).

2. L'apport de solutions connectées dans la prévention et le suivi de la Maladie Rénale Chronique féline

Cette partie n'a pas pour objet d'établir une liste exhaustive de toutes les solutions connectées ou algorithmes développés par les chercheurs dans le domaine de la MRC chez le chat. Il s'agit seulement de montrer que des projets existent et que la recherche sur cette affection s'intensifie.

Compte tenu de la démarche diagnostique de la MRC chez le chat et des complications associées, il est important de retenir les informations qui sont nécessaires à la prévention, à la détection et au suivi de la MRC chez le chat. Tout d'abord, l'amaigrissement, survenant six mois avant les premières modifications biochimiques et la PUPD sont deux signes cliniques à prendre en compte. Ensuite, d'un point de vue modifications biochimiques, la créatininémie, l'urémie associées à un marqueur plus sensible, la SDMA sont intéressants pour la détection précoce de la MRC (Hall *et al.*, 2014). D'un point de vue du suivi de la MRC, il est important de prendre en compte les complications. La mesure de l'hypertension, facilement réalisable en théorie, permet un suivi de l'évolution de la MRC chez le chat.

A. Des objets connectés dans la prévention de la Maladie Rénale Chronique

a. *SurePet, le distributeur d'eau intelligent*

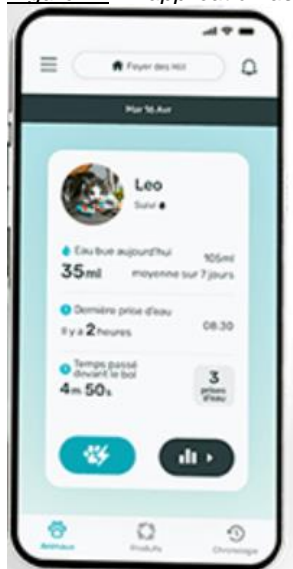
Un des premiers signes d'apparition de la MRC est une PUPD. Une surveillance régulière de la consommation d'eau aide à détecter les changements de la fonction rénale. La prise en charge pourra être précoce et donc de meilleure qualité. Cependant, suivre la quantité d'eau bue par son chat peut se révéler compliqué. C'est pourquoi plusieurs applications ont été mises sur le marché.

L'une d'entre elles, créée par SurePet care et lancée par MSD Animal Health, a imaginé un distributeur d'eau « intelligent », nommé Felaqua Connect (figure 10). Il se synchronise à l'application pour donner en temps réel la consommation quotidienne d'eau du chat. La moyenne hebdomadaire est aussi calculée. Les données sont ainsi enregistrées sur l'application et peuvent être exportées sous forme de PDF pour les partager au vétérinaire (figure 11). Grâce à un détecteur de puce, l'objet détecte quel chat est en train de boire et associe les données, à la fiche du chat concerné. Le propriétaire reçoit donc toutes les informations directement sur l'application, avec une notification lors d'un comportement inhabituel dans la prise de boisson de son chat.

Figure 10 : Le distributeur d'eau Felaqua (SurePet care, 2024)



Figure 11 : L'application associée à la balance (SurePet care, 2024)



Ce système permet de suivre la consommation d'eau du chat et d'impliquer le propriétaire dans la gestion de la santé de son chat. En cas de MRC, ce dispositif permet un suivi particulièrement intéressant. De plus, le vétérinaire a aussi accès aux données pouvant caractériser la progression de la maladie. Une adaptation du traitement ou la réalisation d'examens complémentaires peuvent alors permettre une prise en charge encore plus précoce lors de l'évolution ou de l'apparition de la maladie.

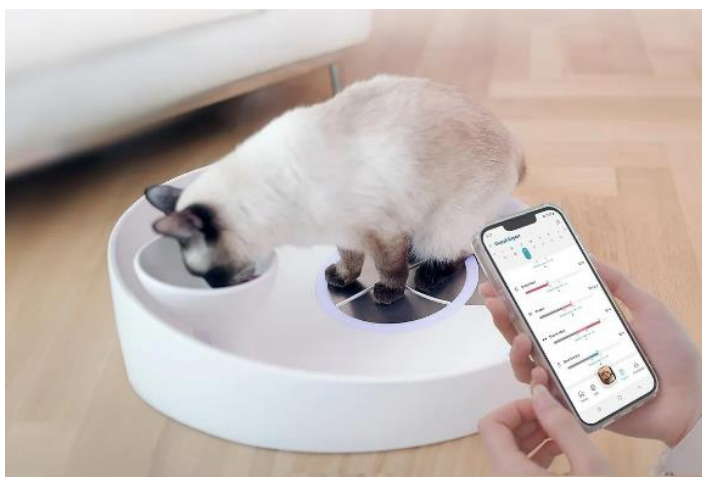
Cependant, il semble pertinent d'évaluer la prise de boisson sur plusieurs semaines car des modifications environnementales peuvent avoir un impact. En effet, la saison des chaleurs ou un changement alimentaire peuvent modifier la quantité d'eau bue par le chat. Il paraît important de mettre en place ce système lorsque l'environnement du chat est stable pour, ensuite, évaluer de manière objective toute modification de sa prise de boisson.

Le prix de ce bol coûte une centaine d'euros. Pour que le système fonctionne, il est nécessaire de l'employer avec une base appelée « Hub », l'ensemble coute plus de deux cents euros. Il peut alors être difficile à un vétérinaire de convaincre un propriétaire d'acheter ce dispositif.

b. La balance INPET

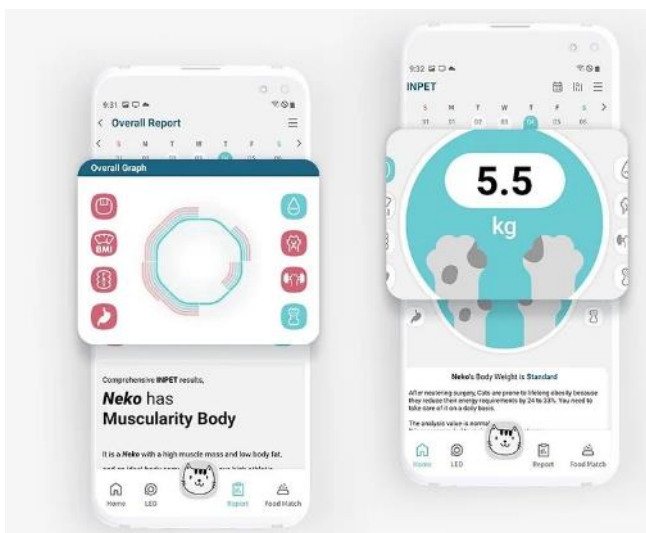
Lors de MRC, le chat affecté présente une perte de poids et plus particulièrement une perte de masse musculaire. Le suivi de ce paramètre permet de détecter le plus tôt possible un début de MRC. Il est néanmoins compliqué de peser son chat à la maison pour différentes raisons telles que le manque de sensibilité des balances humaines et le caractère du chat. C'est pourquoi The Little cat, une entreprise coréenne, a commercialisé INPET une balance qui mesure la composition corporelle de l'animal (figure 12). Pour rendre cette balance attrayante, un bol alimentaire y est intégré et de la lumière de type LED en est émise. L'animal, fasciné, monte donc sur la balance et pendant qu'il mange, huit éléments de la composition corporelle du chat sont analysés dont la masse musculaire et la graisse corporelle.

Figure 12 : La balance INPET (The little cat, 2024)



A chaque mesure réalisée par la balance, les informations récupérées sont transmises sur l'application associée (figure 13). Les données rassemblées sur le smartphone du propriétaire affichent des graphiques montrant les variations de poids sur le mois. Le propriétaire peut alors suivre l'évolution de la composition corporelle de son chat et comparer les données du mois actuel, au mois précédent. Des comptes-rendus compréhensibles par le propriétaire sont aussi rédigés. Cet outil a pour rôle de contrôler la prise de poids du chat et de s'assurer de la bonne santé de l'animal. Le propriétaire devient donc acteur de la santé de son chat. Il peut alors prendre rapidement rendez-vous chez son vétérinaire lorsqu'une modification des informations est remarquée. INPET a été présenté au CES (Consumer Electronic Show) de Las Vegas en janvier 2024 et a reçu le prix de l'innovation dans la catégorie Santé & Bien-être.

Figure 13 : L'application associée à la balance (The little cat, 2024)



Cet outil est utilisé dans le cadre de la prévention de la maladie chez le chat. Une prise en charge rapide de la maladie augmente les chances d'efficacité du traitement. Cependant, il est crucial de s'assurer que le chat monte entièrement sur la balance pour avoir une valeur exacte de son poids.

c. La litière Caremitou analyse l'urine

Nous restons dans le thème de la médecine préventive avec la litière connectée, Caremitou (figure

14). Conçue par une entreprise française en 2017, cette litière mesure quotidiennement le poids et la température de l'animal. De plus, elle peut permettre d'analyser le comportement d'élimination de l'urine du chat, à domicile et sur demande du propriétaire. Ces données sont recueillies sur l'application associée à la litière connectée. Une notification est envoyée au propriétaire lors d'un changement de comportement du chat, par exemple lors d'augmentation de la fréquentation de la litière par l'animal.

Figure 14 : La litière Caremitou (Caremitou, 2024)



Une dernière caractéristique de cette litière est qu'elle peut réaliser une analyse d'urine sur une bandelette urinaire à partir d'urines récoltées dans la litière. Ainsi, la litière utilisée est une litière hydrophobe qui permet de séparer les déchets de l'urine et l'écoulement gravitaire de l'urine dans le pad (Voisart, 2021). Le pad recueille les urines et les analyse en mesurant la valeur du pH urinaire, la protéinurie et la glucosurie. Le propriétaire reçoit alors les résultats sur l'application en temps réel (figure 15).

Figure 15 : Application Carmitou (Caremitou, 2024)



En fonction des résultats, un rendez-vous chez le vétérinaire pourra s'avérer nécessaire (Caremitou, 2024). Il pourrait ainsi permettre la prise en charge précoce de la MRC et optimiser son suivi. Cette prise en charge permet une intervention plus rapide et plus efficace. Ce dispositif a remporté le prix de l'innovation dans la section Santé & Bien-être au CES en 2020.

Le prix de cet outil peut être un frein à son utilisation. En effet, le prix du bac à litière est d'environ 250 euros, incluant :

- Le bac.
- Le kit d'installation incluant le pad, le kit urinaire et la litière hydrophobe.

De plus, le propriétaire devra acheter la litière hydrophobe associée et un nouveau pack urinaire lorsque le premier sera utilisé. La litière coûte 75 euros pour un kilogramme de litière et un pack urinaire, qui se compose de quatre bilans urinaires, coûte 40 euros. Nous pouvons nous poser la question de l'avantage financier de cet outil face à une simple visite chez son vétérinaire traitant.

B. L'utilisation de l'Intelligence Artificielle dans la prédiction de la Maladie Rénale Chronique féline

Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des algorithmes basés sur l'IA prédictive pour le diagnostic précoce de la MRC.

Pour caractériser la fiabilité de leurs modèles, ces chercheurs ont utilisé différents termes qu'il est important de définir (Biourge *et al.*, 2020) :

- La sensibilité : l'aptitude du modèle à détecter une MRC chez le chat atteint de MRC
- La spécificité : l'aptitude du modèle à qualifier un chat indemne de MRC
- La Valeur Prédictive Positive (VPP) : La probabilité que le modèle affecte un chat dans la case « atteint de MRC » sachant qu'il en est atteint
- La Valeur Prédictive Négative (VPN) : la probabilité que le modèle affecte un chat dans la case « indemne de MRC » sachant qu'il en est indemne

Vincent Biourge et son équipe ont modélisé plusieurs réseaux de neurones artificiels qui ont pour objectif de donner une probabilité d'apparition de la MRC chez le chat dans les douze mois. Leurs modèles s'appuient sur une unique visite des chats, âgés de 7 ans ou plus, durant laquelle une analyse de la créatininémie, de l'urémie et de la densité urinaire ont été réalisés, pour prédire la probabilité d'apparition de MRC chez le chat dans les 12 mois.

Tout d'abord, ils ont utilisé des analyses sanguines et urinaires chez des chats dont les valeurs étaient dans les normes. L'algorithme a montré une spécificité de 87%, une sensibilité de 70%, une VPP de 53% et une VPN de 92% dans la prédiction de la MRC dans les 12 mois.

Ensuite, l'objectif de cette équipe a été d'améliorer d'une part la sensibilité et la spécificité, et d'autre part la spécificité et la VPP. Ils ont alors construit plusieurs sous-modèles appelés M0, M3, M6, M9, M12 qui correspondent à la prédiction du statut MRC des chats à la 1^{ère} visite (M0) puis à 3 mois (M3), 6 mois (M6), 9 mois (M9) et 12 mois (M12) après cette 1^{ère} visite. De plus, les premiers modèles utilisent un échantillon de petite taille (phase 1) et tout au long de l'expérience les chercheurs ont augmenté l'échantillon (phase 2 et 3). Durant l'expérience deux stratégies ont testé pour chaque phase. La première était de garantir une sensibilité et une spécificité élevée. La seconde était de garantir une spécificité élevée correspondant à la VPP la plus élevée, en contrepartie d'une sensibilité potentiellement faible. L'objectif était de réduire les faux-positifs au risque d'augmenter les faux négatifs.

En phase 1, la stratégie 2 montre une diminution de la sensibilité et de la VPN par rapport à la stratégie 1 associée à une stabilisation de la spécificité entre les deux stratégies (Tableaux 2 et 3).

Tableau 2 : Critères de performance des sous-modèles dans la première phase de modélisation lors de la stratégie 1 (Biourge et al., 2020).

Modeling phase	Performance measure	M0	M3	M6	M9	M12	M12+
Phase 1	Accuracy	0.97	0.97	0.88	0.86	0.87	0.87
	Sensitivity	0.92	0.83	0.93	0.91	0.91	0.93
	Specificity	0.90	0.93	0.80	0.81	0.78	0.72
	PPV	0.72	0.77	0.66	0.70	0.70	0.66
	NPV	0.95	0.89	0.98	0.97	0.96	0.97

Tableau 3 : Critères de performance des sous-modèles dans la première phase de modélisation lors de la stratégie 2 (Biourge et al., 2020).

Modeling phase	Performance measure	M0	M3	M6	M9	M12	M12+
Phase 1	Accuracy	0.97	0.97	0.88	0.86	0.87	0.87
	Sensitivity	0.81	0.72	0.64	0.59	0.64	0.64
	Specificity	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96
	PPV	0.89	0.91	0.89	0.91	0.91	0.95
	NPV	0.89	0.86	0.83	0.81	0.81	0.81

En phase 2, la stratégie 2 montre une augmentation de la sensibilité et de la VPP par rapport à la stratégie 1. La spécificité et la VPN ont cependant diminué. Comparé à la phase 1, la spécificité, la VPP et la VPN ont chuté (Tableaux 4 et 5).

Tableau 4 : Critères de performance des sous-modèles dans la seconde phase de modélisation lors de la stratégie 1 (Biourge et al., 2020).

Modeling phase	Performance measure	M0	M3	M6	M9	M12	M12+
Phase 2	Accuracy	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.82
	Sensitivity	0.93	0.94	0.96	0.96	0.97	0.94
	Specificity	0.65	0.59	0.39	0.42	0.23	0.23
	PPV	0.29	0.30	0.27	0.33	0.31	0.62
	NPV	0.98	0.97	0.98	0.97	0.96	0.76

Tableau 5 : Critères de performance des sous-modèles dans la seconde phase de modélisation lors de la stratégie 2 (Biourge et al., 2020)

Modeling phase	Performance measure	M0	M3	M6	M9	M12	M12+
Phase 2	Accuracy	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.82
	Sensitivity	0.90	0.90	0.85	0.81	0.87	0.70
	Specificity	0.75	0.73	0.76	0.80	0.66	0.80
	PPV	0.34	0.37	0.44	0.52	0.46	0.82
	NPV	0.97	0.97	0.95	0.93	0.93	0.66

En phase 3, la stratégie 1 décrit une meilleure sensibilité et une meilleure VPN. Cependant, la spécificité et la VPP ont une tendance à diminuer lors de la stratégie 2 (Tableaux 6 et 7).

Tableau 6 : Critères de performance des sous-modèles dans la troisième phase de modélisation lors de la stratégie 1 (Biourge *et al.*, 2020)

Modeling phase	Performance measure	M0	M3	M6	M9	M12	M12+
Phase 3	Accuracy	0.91	0.89	0.88	0.88	0.88	0.82
	Sensitivity	0.90	0.87	0.86	0.86	0.87	0.71
	Specificity	0.81	0.77	0.74	0.73	0.70	0.81
	PPV	0.44	0.45	0.47	0.52	0.53	0.85
	NPV	0.98	0.95	0.94	0.93	0.92	0.64

Tableau 7 : Critères de performance des sous-modèles dans la troisième phase de modélisation lors de la stratégie 2 (Biourge *et al.*, 2020)

Modeling phase	Performance measure	M0	M3	M6	M9	M12	M12+
Phase 3	Accuracy	0.91	0.89	0.88	0.88	0.88	0.82
	Sensitivity	0.51	0.35	0.41	0.45	0.42	0.46
	Specificity	0.95	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97
	PPV	0.65	0.78	0.81	0.84	0.87	0.96
	NPV	0.91	0.86	0.84	0.82	0.79	0.53

Si l'on compare la phase 3 avec les deux autres, on remarque que la sensibilité diminue lorsqu'on augmente la taille de l'échantillon. La capacité de l'algorithme à déterminer qu'un chat est atteint de la MRC et qu'il le soit réellement diminue donc lorsqu'on augmente l'échantillon.

Cet algorithme est loin d'être parfait du fait de la faible sensibilité et spécificité mais il peut soumettre au vétérinaire l'idée que le chat peut probablement développer une MRC.

L'équipe de Richard Bradley a aussi développé un logiciel équivalent dans le but de prédire l'apparition d'un MRC chez le chat, en ajoutant l'âge aux paramètres étudiés dans l'article de Vincent Biourge (Biourge *et al.*, 2020). Ce modèle donne une prévision d'apparition de la MRC jusqu'à deux ans avant qu'elle ne survienne. La sensibilité diminue lorsque le délai de prévision augmente, avec 63% de sensibilité pour une prédiction à 12 mois et 44,2% pour une prédiction à 24 mois. La spécificité est de 99% pour une prédiction à 12 mois et 24 mois (Richard Bradley *et al.*, 2019) (Tableau 8).

Tableau 8 : Comparaison du nombre de chats dont le statut MRC a été diagnostiqué par rapport à l'état prédit (Richard Bradley *et al.*, 2019).

	Predicted "no CKD"	Predicted "CKD"	Total
Status "no CKD"	22 534	247	22 781
Status "probable CKD"	4223	5608	9831
Status "CKD"	708	6885	7593
Total	27 465	12 740	40 205

Cette dernière étude a permis de développer un outil, le RenalTech® créé par WALTHAM Petcare Science Industry, appartenant à Mars Animal Health. Les données utilisées par ce modèle sont la créatininémie, la numération des globules blancs, l'urémie, la densité urinaire, la protéinurie, le pH de l'urine et l'âge de l'animal pour donner un statut RenalTech®. RenalTech utilise les résultats

de deux tests diagnostiques : le test actuel combiné au résultat d'un test réalisé au cours des deux dernières années. Cette association produit une valeur qui fournit la probabilité de développement de la MRC avec plus de 95%. Lindsay VanHusan a dirigé un webinaire de présentation de l'outil (Antech Diagnostics, 2024) .

3. Les futures potentielles utilisations de l'Intelligence Artificielle dans le suivi de la Maladie Rénale Chronique chez le chat

En 2024, lors d'un hackaton étudiant vétérinaire, une équipe travaillant sur la thématique « outil » a présenté un harnais qui a pour but de mesurer la pression artérielle chez le chat, à domicile. En effet, les mesures de pression artérielle en clinique vétérinaire peuvent facilement être faussées par le caractère stressé du chat. Cependant, l'hypertension est une complication de la MRC chez le chat, il est donc important d'avoir des valeurs correctes. C'est pour cela que cette équipe d'étudiants vétérinaires a pensé à une solution pour permettre une mesure fiable de la pression artérielle : le harnais PulsaVet (Figure 15).

Figure 16 : Prototype du harnais PulsaVet (PulsaVet, 2024)



Ces nouvelles technologies créées autour de la MRC chez le chat mettent en évidence l'importance de cette maladie et les défis qu'elle impose au vétérinaire praticien. Elles nécessitent, pour le moment, plus de recul et des données concrètes par rapport à leur capacité à prévenir, détecter ou suivre la MRC chez le chat. Cependant, elles nous montrent que la médecine vétérinaire autour des maladies chroniques est en train d'évoluer et a une tendance à s'accroître.

Conclusion

La Maladie Rénale Chronique féline représente un véritable enjeu de santé pour les chats âgés. En raison de son caractère évolutif et irréversible, cette maladie nécessite une prise en charge rigoureuse alliant diagnostic précoce, traitement adapté et suivi continu.

Dans un premier temps, l'étude de la MRC, a mis en évidence la nécessité d'une approche multifactorielle dans son diagnostic. La classification IRIS, a montré l'importance des marqueurs biologiques comme le taux de créatininémie et la SDMA, qui permettent de grader la maladie selon sa sévérité et d'apporter aux chats le traitement adapté au stade de la maladie.

Dans un second temps, l'évolution technologique dans le domaine vétérinaire a été au cœur des innovations pour la gestion de la MRC. Les objets connectés, comme les distributeurs d'eau qui quantifient la prise de boisson ou les balances connectées qui mesurent la masse musculaire ou grasseuse du chat permettent un suivi personnalisé et en temps réel de la santé des chats, impliquant directement les propriétaires dans la gestion de la maladie. L'intelligence artificielle, quant à elle, se présente comme un outil prometteur pour prédire l'apparition de la MRC, facilitant ainsi une prise en charge précoce, essentielle pour améliorer le pronostic.

L'évolution de la médecine vétérinaire vers une approche intégrant les technologies de l'information et de la communication ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion des maladies chroniques comme la MRC. Ces innovations offrent des solutions encourageantes pour une prise en charge plus précoce, plus personnalisée et plus efficace des chats atteints de MRC, avec un impact direct sur leur qualité de vie. Néanmoins, des recherches complémentaires restent nécessaires pour valider ces nouvelles approches à grande échelle et affiner les algorithmes d'Intelligence Artificielle, afin d'optimiser leur utilisation en clinique vétérinaire.

Liste des références bibliographiques

- ABDULLAHI, A. (2023) IA prédictive et IA générative : les deux piliers de l'intelligence artificielle | Geekflare. In *Geekflare France*. [<https://geekflare.com/fr/predictive-ai-vs-generative-ai/>] (consulté le 02/10/2024).
- ADAMCZAK, M., SURMA, S. (2021) Metabolic Acidosis in Patients with CKD: Epidemiology, Pathogenesis, and Treatment. *Kidney Diseases* vol. 7, n° 6, p. 452-467. [<https://doi.org/10.1159/000516371>]
- AGENCE DU NUMÉRIQUE EN SANTÉ (2024) La petite histoire de la e-santé. [<https://esante.gouv.fr/la-petite-histoire-de-la-e-sante>] (consulté le 14/08/2024).
- AGENCE RÉGIONALE DE SANTÉ (2024) La e-santé, qu'est-ce que c'est ? [<https://www.bourgogne-franche-comte.ars.sante.fr/la-e-sante-quest-ce-que-cest>] (consulté le 14/08/2024).
- ANGLICHEAU, D., JEAN-JACQUES BOFFA, PATRICE CALLARD, *et al.* (2016) Éléments de physiologie rénale - Article complet. PDF - [Manuel de Néphrologie 9^e édition]. In *CUEN*. [<https://cuen.fr/manuel2/spip.php?article3>] (consulté le 12/08/2024).
- ANTECH DIAGNOSTICS (2024) RenalTech® for Kidney Disease. In *Antech Diagnostics*. [<https://www.antechdiagnostics.com/renaltech/>] (consulté le 02/09/2024).
- BARTGES, J.W. (2012) Chronic Kidney Disease in Dogs and Cats. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice, Geriatrics* vol. 42, n° 4, p. 669-692. [<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2012.04.008>]
- BESSAGUET, F., DESMOULIÈRE, A. (2020) Les reins. *Actualités Pharmaceutiques* vol. 59, n° 595, p. 57-60. [<https://doi.org/10.1016/j.actpha.2020.03.017>]
- BIOURGE, V., DELMOTTE, S., FEUGIER, A., *et al.* (2020) An artificial neural network-based model to predict chronic kidney disease in aged cats. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 34, n° 5, p. 1920-1931. [<https://doi.org/10.1111/jvim.15892>]
- BRADLEY, R., TAGKOPOULOS, I., KIM, M., *et al.* (2019) Predicting early risk of chronic kidney disease in cats using routine clinical laboratory tests and machine learning. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 33, n° 6, p. 2644-2656. [<https://doi.org/10.1111/jvim.15623>]
- BROWN, C.A., ELLIOTT, J., SCHMIEDT, C.W., *et al.* (2016) Chronic Kidney Disease in Aged Cats: Clinical Features, Morphology, and Proposed Pathogeneses. *Veterinary Pathology* vol. 53, n° 2, p. 309-326. [<https://doi.org/10.1177/0300985815622975>]
- BURNIER, M., DAMIANAKI, A. (2023) Hypertension as Cardiovascular Risk Factor in Chronic Kidney Disease. *Circulation Research* vol. 132, n° 8, p. 1050-1063. [<https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.122.321762>]
- CAREMITOU (2024) Litière Connectée Caremitou. [<https://caremitou.com/fr/litiere-connectee-caremitou>] (consulté le 28/08/2024).

- CAREMITOU (2021) Caremitou, le nouveau compagnon bien-être et santé de votre chat - YouTube. *In Youtube*. [https://www.youtube.com/watch?v=Fy-tfZBe_Ts] (consulté le 28/08/2024).
- CES (2024) Innovation Award Honorees. [<https://www.ces.tech/innovation-awards/honorees/2024/honorees/i/inpet.aspx>] (consulté le 27/08/2024).
- COHERIS (2022) Qu'est-ce que le Machine Learning ou apprentissage automatique ? *In Intelligence artificielle & Data Analytics*. [<https://ia-data-analytics.fr/machine-learning/>] (consulté le 03/10/2024).
- CUEN (2016) LA FILTRATION GLOMÉRULAIRE - [Physiologie et physiopathologie rénales]. [<https://cuen.fr/lmd/spip.php?rubrique68>] (consulté le 30/09/2024).
- DATABIRD (2024) Réseaux de neurones : Définition et les différents types de réseaux. [<https://www.data-bird.co/blog/reseaux-de-neurones>, <https://www.data-bird.co/blog/reseaux-de-neurones>] (consulté le 03/10/2024).
- DELESTRE, S. (2024) Nombre de chats en France 2016-2022. *In Statista*. [<https://fr.statista.com/statistiques/1014873/population-chats-france/>] (consulté le 30/09/2024).
- DELMOTTE, H. (2015) « De la e-santé à la santé connectée » : accompagner la transformation de notre modèle de santé. *Hegel* vol. 2, n° 2, p. 123-126. [<https://doi.org/10.4267/2042/56637>]
- ÉCOLE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN SANTÉ DU CHUM (2021) La médecine de précision par ÉIAS -. [<https://podcasters.spotify.com/pod/show/eias-ia-sante/episodes/La-mdecine-de-prcision-e1ra6er>] (consulté le 30/08/2024).
- EIGENMANN, P. (2023) Stratégies thérapeutiques à l'heure de la médecine 6P. *Revue Française d'Allergologie*, 18e Congrès Francophone d'Allergologie vol. 63, n° 3, p. 103283. [<https://doi.org/10.1016/j.reval.2023.103283>]
- ELLIOTT, D.A. (2006) Nutritional Management of Chronic Renal Disease in Dogs and Cats. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, Dietary Management and Nutrition vol. 36, n° 6, p. 1377-1384. [<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2006.08.011>]
- FELAQUA (2024) Felaqua. *In SurePetCare*. [<https://www.surepetcare.com/fr-fr/felaqua-connect>] (consulté le 16/08/2024).
- FINCH, N. (2014) Measurement of glomerular filtration rate in cats. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 16, n° 9, p. 736-748. [<https://doi.org/10.1177/1098612X14545274>]
- GALLAND, J. (2020) La médecine des 4P... et plus. *In esanum*. [<https://www.esanum.fr/today/posts/la-medecine-des-4p-et-plus>] (consulté le 01/10/2024).
- GRIGNOLA, A. (2024) Machine Learning : Qu'est-ce que le machine learning ? *In Data bird*. [<https://www.data-bird.co/blog/machine-learning>, <https://www.data-bird.co/blog/machine-learning>] (consulté le 03/10/2024).
- HALL, J.A., YERRAMILI, M., OBARE, E., *et al.* (2014) Comparison of Serum Concentrations of Symmetric Dimethylarginine and Creatinine as Kidney Function Biomarkers in Cats with Chronic Kidney Disease. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 28, n° 6, p. 1676-1683. [<https://doi.org/10.1111/jvim.12445>]
- HARRIET HAN, *et al.* (2014) Échographie des reins du chat et interprétation des résultats - La Semaine Vétérinaire n° 1583 du 02/05/2014. *In Le Point Vétérinaire.fr*.

- [<https://www.lepointveterinaire.fr/publications/la-semaine-veterinaire/article/n-1583/echographie-des-reins-du-chat-et-interpretation-des-resultats.html>] (consulté le 30/09/2024).
- HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ (2024) E-santé. [https://www.has-sante.fr/jcms/p_3460778/fr/e-sante] (consulté le 14/08/2024).
- HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ (2022) Santé mobile : des applications de qualité. [https://www.has-sante.fr/jcms/p_3106528/fr/sante-mobile-des-applications-de-qualite] (consulté le 14/08/2024).
- HOOD, L. (2019) A revolution in health care. *In Youtube*. [<https://www.youtube.com/watch?v=2GaEQB9X0fc&t=63s>]
- IDEXX (2024) Interpréter les résultats de la SDMA - IDEXX France. [<https://www.idexx.fr/fr/veterinary/reference-laboratories/sdma/interpreting-your-sdma-results/>] (consulté le 30/09/2024).
- IDEXX (2023) Test IDEXX FGF-23 - IDEXX France. [<https://www.idexx.fr/fr/veterinary/reference-laboratories/fgf-23/>] (consulté le 12/08/2024).
- IRIS (2023) IRIS Kidney - Guidelines. [<http://www.iris-kidney.com/guidelines/index.html>] (consulté le 30/09/2024).
- ISB (2019) Scientific Wellness. [<https://isbscience.org/research/scientificwellness/>] (consulté le 15/08/2024).
- KOLB, H. (2012) Échographie des reins normaux chez le chien et le chat - Le Point Vétérinaire n° 322 du 01/01/2012. *In Le Point Vétérinaire.fr*. [<https://www.lepointveterinaire.fr/publications/le-point-veterinaire/article-rural/n-322/etape-3-echographie-des-reins-normaux-chez-le-chien-et-le-chat.html>] (consulté le 30/09/2024).
- KONGTASAI, T., PAEPE, D., MEYER, E., *et al.* (2022) Renal biomarkers in cats: A review of the current status in chronic kidney disease. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 36, n° 2, p. 379-396. [<https://doi.org/10.1111/jvim.16377>]
- LES ENTREPRISES DU MÉDICAMENT (2019) La médecine : vision d'aujourd'hui et de demain. [<https://www.leem.org/la-medecine-vision-daujourd'hui-et-de-demain>] (consulté le 15/08/2024).
- MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DE L'ACCÈS AUX SOINS (2009) La télésanté : un nouvel atout au service de notre bien-être. [<https://sante.gouv.fr/ministere/documentation-et-publications-officielles/rapports/sante/article/la-telesante-un-nouvel-atout-au-service-de-notre-bien-etre>] (consulté le 07/10/2024).
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT (2023) Télémédecine vétérinaire et transformation de la pratique en santé animale - Analyse n° 194. [<https://agriculture.gouv.fr/telemedecine-veterinaire-et-transformation-de-la-pratique-en-sante-animale-analyse-ndeq-194>] (consulté le 01/10/2024).
- MITCHELL, J. (2000) Increasing the cost-effectiveness of telemedicine by embracing e-health. *Journal of Telemedicine and Telecare* vol. 6 Suppl 1, p. S16-19. [<https://doi.org/10.1258/1357633001934500>]
- NABITY, M.B., LEES, G.E., BOGGESS, M.M., *et al.* (2015) Symmetric Dimethylarginine Assay Validation, Stability, and Evaluation as a Marker for the Early Detection of Chronic Kidney Disease

in Dogs. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 29, n° 4, p. 1036-1044. [<https://doi.org/10.1111/jvim.12835>]

ORDRE NATIONAL DES VÉTÉRINAIRES (2020a) Télémedecine vétérinaire. [<https://www.veterinaire.fr/je-suis-veterinaire/mon-exercice-professionnel/telemedecine-veterinaire>] (consulté le 01/10/2024).

ORDRE NATIONAL DES VÉTÉRINAIRES (2020b) Télémedecine vétérinaire: définitions. [<https://www.veterinaire.fr/je-suis-veterinaire/mon-exercice-professionnel/les-fiches-professionnelles/telemedecine-veterinaire-definitions>] (consulté le 01/10/2024).

PCAST (2008) priorities for personalized medicine. In *obamawhitehouse.archives.gov*. [chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/https://obamawhitehouse.archives.gov/files/documents/ostp/PCAST/pcast_report_v2.pdf]

PEACOCK, M. (2010) Calcium metabolism in health and disease. *Clinical journal of the American Society of Nephrology: CJASN* vol. 5 Suppl 1, p. S23-30. [<https://doi.org/10.2215/CJN.05910809>]

PLANTINGA, E.A., EVERTS, H., KASTELEIN, A.M.C., *et al.* (2005) Retrospective study of the survival of cats with acquired chronic renal insufficiency offered different commercial diets. *The Veterinary Record* vol. 157, n° 7, p. 185-187. [<https://doi.org/10.1136/vr.157.7.185>]

POITTE, T. (2017) E-santé animale en savoir plus sur les objets connectés.

POLZIN, D.J. (2011) Chronic Kidney Disease in Small Animals. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice, Kidney Diseases and Renal Replacement Therapies* vol. 41, n° 1, p. 15-30. [<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2010.09.004>]

QUIMBY, J.M. (2016) Update on Medical Management of Clinical Manifestations of Chronic Kidney Disease. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice, Chronic Kidney Disease* vol. 46, n° 6, p. 1163-1181. [<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2016.06.004>]

ROSS, S.J., OSBORNE, C.A., KIRK, C.A., *et al.* (2006) Clinical evaluation of dietary modification for treatment of spontaneous chronic kidney disease in cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 229, n° 6, p. 949-957. [<https://doi.org/10.2460/javma.229.6.949>]

S, S., HT, M., D, S., *et al.* (2024) Blood fibroblast growth factor 23 concentration in cats with and without chronic kidney disease: a scoping review. *Journal of feline medicine and surgery* vol. 26, n° 4. [<https://doi.org/10.1177/1098612X241234984>]

SEATTLE BASE (2022) INPET - Cat Body Composition Monitor. In *Youtube*. [<https://www.youtube.com/watch?v=F1WQ8p0KYaE>] (consulté le 27/08/2024).

SLIM, K., SELVY, M., VEZIAN, J. (2021) Innovation conceptuelle : la médecine 4P et la chirurgie 4P. *Journal de Chirurgie Viscérale, Innovations en chirurgie* vol. 158, n° 3, Supplement, p. S13-S18. [<https://doi.org/10.1016/j.ichirv.2021.01.001>]

STATISTIQUES BIOLOGIE MEDICALE (2017) Validité: Sensibilité, Spécificité, VPP, VPN. *Statistiques et Biologie Médicale*. [<https://statistiquesbiologiemedicale.wordpress.com/2017/08/03/validite/>] (consulté le 02/10/2024).

SYNMAD (2020) LA MEDECINE 4P / 5P / 6P / COPIE DU 4P POLITIQUE OU STANDARDISATION DES COMPORTEMENTS: SEUL UN SYNDICAT FORT NOUS GARDERA LIBRE. In *Synmad*.

[<https://www.synmad.com/actualites/ejournal/la-medecine-4p-5p-6p-copie-du-4p-politique-ou-standardisation-des-comportements-seul-un-syndicat-fort-nous-gardera-libre.html>] (consulté le 14/08/2024).

TASSY, A. (2017) Introduction de la conférence du 22 juin 2017. In SlideShare. [<https://fr.slideshare.net/slideshow/introduction-de-la-conference-du-22-juin-2017/77459240>] (consulté le 31/08/2024).

VERVLOET, M.G., BALLEGOIJEN, A.J. van (2018) Prevention and treatment of hyperphosphatemia in chronic kidney disease. *Kidney International* vol. 93, n° 5, p. 1060-1072. [<https://doi.org/10.1016/j.kint.2017.11.036>]

VOISART, J. (2021) Caremitou, la nouvelle litière connectée qui veille quotidiennement au bien-être et à la santé de votre chat. In Woopets. [<https://www.woopets.fr/chat/actualite/caremitou-la-nouvelle-litiere-connectee-qui-veille-quotidiennement-au-bien-etre-et-a-la-sante-de-votre-chat/>] (consulté le 27/08/2024).

Annexe 1 : La téléconsultation vétérinaire

QU'EST-CE QUE LA TÉLÉCONSULTATION ?

IL S'AGIT D'UNE CONSULTATION À DISTANCE

QUELS OUTILS UTILISER ?

Une plateforme dédiée à la télé-médecine

OU

Toute application de visioconférence

Dans tous les cas la confidentialité des échanges doit être assurée

Important : C'est la qualité du réseau et du matériel utilisé (caméra du smartphone) qui sont les facteurs limitants, pas l'application.



DANS QUELLES CONDITIONS PUIS-JE RÉALISER UNE TÉLÉCONSULTATION SUR UN ANIMAL ?

OUI

Pour un animal d'un client, c'est-à-dire un animal examiné physiquement dans mon établissement de soins depuis moins d'un an.

Si je juge la téléconsultation pertinente et si les conditions techniques (image, son) sont bonnes

NON

Pour un nouvel animal ou un animal d'une personne qui n'est plus cliente, c'est-à-dire un animal examiné depuis plus d'un an.

Si le pronostic médical de l'animal risque d'être altéré

PUIS-JE UTILISER UN OUTIL DE PAIEMENT EN LIGNE ?

OUI

Dès lors qu'il assure la sécurité des données personnelles et bancaires du client

LA PRESCRIPTION EST-ELLE AUTORISÉE ?



La délivrance doit être effectuée dans les **10 JOURS** suivant l'acte de télé-médecine.

OUI

La téléconsultation est un acte vétérinaire. Le diagnostic conditionne la prescription.

SOLUTIONS POUR LA DÉLIVRANCE :

A

Le propriétaire passe prendre l'ordonnance et médicaments à l'établissement de soins dans les 10 jours.

B

Les médicaments accompagnés de l'ordonnance sont expédiés au client en colis scellé opaque.

C

L'ordonnance seule est expédiée au client par voie postale ou par voie électronique.



Maladie Rénale Chronique féline : approches actuelles et innovations technologiques pour la prévention, le diagnostic et le suivi

AUTEUR : Laura DOUCERAIN

RÉSUMÉ :

La Maladie Rénale Chronique féline (MRC) est une affection fréquente et progressive touchant plus de la moitié des chats âgés de plus de 7 ans. Cette maladie se caractérise par une détérioration irréversible des fonctions rénales. Son diagnostic repose sur des marqueurs biochimiques comme la créatininémie et la SDMA, ainsi que sur la classification IRIS qui permet de grader la maladie en fonction de sa gravité.

La prise en charge de la MRC inclut des stratégies thérapeutiques visant à ralentir la progression de la maladie, prévenir les complications et améliorer la qualité de vie des chats. Une alimentation protectrice de la fonction rénale fait partie des principaux axes de traitement.

En parallèle, l'évolution des technologies, notamment avec la e-santé et l'intelligence artificielle, offre de nouvelles perspectives dans la gestion de cette maladie. Des dispositifs connectés comme les distributeurs d'eau intelligents et les balances corporelles permettent un suivi de l'état général du chat et donc la prévention de l'apparition de la maladie. De plus, les modèles prédictifs basés sur l'IA améliorent le dépistage précoce de la MRC, permettant ainsi une meilleure prise en charge.

Ces avancées technologiques ouvrent la voie à une gestion plus personnalisée et proactive de la MRC chez les chats, renforçant l'implication des propriétaires dans la surveillance de la santé de leurs animaux.

MOTS CLÉS :

SANTÉ ANIMALE, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, MALADIE RÉNALE CHRONIQUE FÉLINE, SANTÉ CONNECTÉE, NOUVELLES TECHNOLOGIES

JURY :

Présidente : Pr Christelle Maurey-Guéneq

Directrice de thèse : Dr Chantal Legrand

Examinatrice : Dr Morgane Canonne-Guibert

Feline Chronic Kidney Disease : current perspectives and technological innovations for diagnosis and monitoring

AUTHOR: Laura DOUCERAIN

SUMMARY:

Feline Chronic Kidney Disease (CKD) is a common and progressive disease affecting more than half of all cats over the age of 7. The disease is characterised by an irreversible deterioration in kidney function. Diagnosis is based on biochemical markers such as creatininaemia and SDMA, as well as on the IRIS classification, which enables the disease to be graded according to its severity.

Management of CKD includes therapeutic strategies aimed at slowing disease progression, preventing complications and improving cats' quality of life. A diet that protects renal function is one of the main areas of treatment.

At the same time, technological developments, particularly e-health and artificial intelligence, are opening up new perspectives in the management of CKD. Connected devices such as intelligent water dispensers and body scales can be used to monitor the cat's general condition and thus prevent the onset of the disease. In addition, AI-based predictive models are improving early detection of CKD, enabling better management.

These technological advances open the way for more personalised, proactive management of CKD in cats, increasing owners' involvement in monitoring their pets' health.

KEYWORDS: ANIMAL HEALTH, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, FELINE CHRONIC KIDNEY DISEASE, CONNECTED HEALTH, NEW TECHNOLOGIES

JURY:

Chairperson: Pr Christelle Maurey-Guénec

Thesis Director: Dr Chantal Legrand

Reviewer : Dr Morgane Canonne-Guibert