



HAL
open science

Étude de la prédictibilité de la nature des urolithes du bas appareil urinaire chez le chat en fonction des images radiographiques

Thomas Dalmon

► **To cite this version:**

Thomas Dalmon. Étude de la prédictibilité de la nature des urolithes du bas appareil urinaire chez le chat en fonction des images radiographiques. Médecine vétérinaire et santé animale. 2023. dumas-04303618

HAL Id: dumas-04303618

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04303618v1>

Submitted on 23 Nov 2023

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 2023

ÉTUDE DE LA PRÉDICTIBILITÉ DE LA NATURE DES UROLITHES DU BAS APPAREIL URINAIRE CHEZ LE CHAT EN FONCTION DES IMAGES RADIOGRAPHIQUES

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 30 octobre 2023

par

Thomas, Benjamin, Gaël DALMON

sous la direction de

Jérémy MORTIER

JURY

Présidente du jury :	Mme Christelle MAUREY-GUÉNEC	Professeure à l'EnvA
Directeur de thèse :	M. Jérémy MORTIER	Maître de Conférences associé à l'EnvA
Examineur :	M. Mathieu MANASSERO	Professeur à l'EnvA

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

Version juillet 2023



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

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigjé	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC
M	Desquilbet	Loic	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences HDR	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guénec	Christelle	Professeur	DEPEC
M	Millermann	Yves	Professeur	DPASP
Mme	Pilot-Storck	Fanny	Professeur	DSBP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	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	Armé	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Benchekroun	Ghita	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
M	Bolnot	Francois	Maître de conférences	DPASP
Mme	Canonnie-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
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP
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
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP
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	Lagrée	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	Mespouilles-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mtimit	Narjès	Maître de conférences	DPASP
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
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
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

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, Professeure MAUREY-GUÉNEC Christelle,

Qui nous fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse et d'avoir aidé à son élaboration.

Sincères remerciements.

À Monsieur MORTIER Jérémy, Maître de conférences à l'EnvA,

Qui a choisi ce sujet, dirigé ce travail, a su me conseiller pour l'élaboration du protocole de l'étude et a pris de son temps pour corriger attentivement ce manuscrit.

Sincères remerciements.

À Monsieur MANASSERO Mathieu, Professeur à l'EnvA,

Pour avoir accepté cette invitation,

Sincères remerciements.

À Monsieur DALMON Thibault, mon frère,

Qui a largement contribué à l'élaboration du programme de notre étude,

Sincères remerciements

À Monsieur DALMON Patrice et madame DALMON Isabelle, mes parents,

Pour m'avoir aidé tout au long de l'élaboration de ce manuscrit et pour l'avoir attentivement relu,

Sincères remerciements.

Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations.....	9
Introduction.....	11
Première partie : Bibliographie.....	13
1. Anatomie et physiologie du bas appareil urinaire félin.....	13
A. Anatomie.....	13
1. La vessie.....	13
2. L'urètre.....	13
B. Rappels physiologiques.....	14
C. Aspect radiographique normal.....	17
2. Présentation générale et épidémiologie : présentation des différents types minéraux et de leurs mécanismes de formation.....	23
A. Généralités concernant les urolithiases félines.....	23
B. Calculs d'oxalates de calcium.....	25
1. Epidémiologie.....	25
2. Mécanisme de formation.....	25
C. Calculs de PAM.....	27
1. Epidémiologie.....	27
2. Mécanisme de formation.....	27
D. Les calculs de purines (urates et xanthines).....	28
1. Les calculs d'urates.....	28
2. Les calculs de xanthines.....	29
E. Les calculs de cystines.....	30
1. Epidémiologie.....	30
2. Mécanisme de formation.....	30
F. Les calculs de silices.....	31
G. Les calculs mixtes.....	31
1. Epidémiologie.....	31
2. Mécanisme de formation.....	31
3. Présentation clinique et diagnostic.....	31
A. PRESENTATION CLINIQUE.....	31
B. PARACLINIQUE.....	32
a. BIOLOGIQUE.....	32
b. IMAGERIE MEDICALE.....	33
c. Analyse spectrophotométrique.....	37
4. TRAITEMENT.....	37
A. PRISE EN CHARGE CHIRURGICALE.....	38
i. Urohydropulsion.....	38
ii. Cystolithotomie percutanée (PCCL).....	38
iii. Cystoscopie transurétrale.....	39
iv. Autres techniques chirurgicales.....	39
B. PRISE EN CHARGE SPECIFIQUE.....	39
a. Calculs d'oxalate de calcium.....	39
b. Calculs de PAM.....	41
c. Calculs de purine.....	44
d. Calculs de cystine.....	45
e. Calculs de silice.....	45
f. Calculs mixtes.....	45
5. POURQUOI ET COMMENT PREDIRE LA NATURE MINERALE.....	46

Deuxième partie : Etude rétrospective des cas de lithiase du bas appareil urinaire félin présentés à l'EnvA entre avril 2013 et janvier 2023	49
1. Introduction	49
2. Matériels et méthodes	49
A. Définition de la population étudiée : critères d'inclusion et d'exclusion	49
B. Méthodologie.....	50
3. Résultats	53
A. Présentation de la population étudiée.....	53
B. Race, sexe, âge, nature minérale	54
a. Etude des races	55
b. Etudes des sexes.....	56
c. Etude des âges	56
d. Etudes des natures minérales (sur la base de l'analyse spectrophotométrique) et extension à la population cible.	57
C. Etude des radio-opacités	57
D. Taille maximale	60
E. Localisation	63
F. Nombre total de calculs.....	65
G. Etude des contours des urolithes.....	67
H. Etude de l'homogénéité du plus gros calcul	71
I. Etude de la forme des calculs	73
J. Concordance de la nature minérale suspectée avec l'analyse spectrophotométrique après exécution du programme sur plusieurs caractères.....	83
a. Analyse des critères radiographiques qualitatifs non binaires.....	83
b. Analyse de tous les critères radiographiques en même temps et construction d'un arbre de décision.....	86
4. Discussion.....	90
A. Epidémiologie.....	90
B. Corrélations des caractéristiques radiographiques étudiées avec la nature minérale des calculs des chats de l'échantillon estimées à l'aide du programme et comparaison avec la littérature	91
Conclusion.....	97
Liste des références bibliographiques	99
Annexe 1 : Feuilles de calculs Excel® utilisées pour le stockage des données des chats de l'étude	105
Annexe 2 : Code du programme réalisé au cours de l'étude rétrospective	107
Annexe 3 : Arbres de décision à 6 feuilles et au moins 3 échantillons par critères, matrice de confusion associée et importance des critères	111
Annexe 4 : Arbres de décision à 6 feuilles et au moins 1 échantillon par critères, matrice de confusion associée et importance des critères	113

Liste des figures

Figure 1 : Bas appareil urinaire d'un chat femelle et ses relations avec les structures anatomiques adjacentes (symphyse pelvienne, rectum). La vessie est composée de l'apex crânialement, du corps en son centre et du col en sa partie caudale qui est prolongé par l'urètre.(Fletcher, 1996)

Figure 2 : Anatomie du haut et du bas appareil urinaire (CREPEAUX G. 2022)

Figure 3 : Structures du bas appareil urinaire (CREPEAUX G. 2022)

Figure 4 : Innervation du bas appareil urinaire (CREPEAUX G. 2022)

Figure 5 : Cystomégramme. Une augmentation initiale du volume vésical déclenche une légère augmentation de pression suivie d'une phase de plateau, la pression reste constante malgré l'augmentation du volume. Enfin le seuil d'accomodation vésicale est dépassé et une augmentation franche de pression est notée avec l'augmentation de volume.(Fletcher, 1996)

Figure 6 : Vessie d'aspect normal chez un chat (Service d'imagerie médicale, 2013)

Figure 7 : Urétrographie chez un chat permettant la visualisation d'un urètre (flèche) et d'une vessie sans anomalies (Service d'imagerie médicale, 2013)

Figure 8 : Urétrographie rétrograde, urètre d'aspect normal chez un chat, une pince d'Allis est positionnée sur le prépuce (flèche). 1 = urètre membraneux ; 2 = urètre pénien (O'Brien et Barr, s. d.)

Figure 9 : Radiographies de profil de la zone périnéale chez des chats européens castrés de 3 ans (A), 8 ans (B) et 5 ans (C). Chacun présente une fine structure d'opacité osseuse dans le pénis (indiquées par les flèches) compatibles avec des os pénien.(Thrall et Robertson, 2023)

Figure 10 : Equipement nécessaire à la cathétérisation vésicale et à la cystographie. A. Cathéter urétral pour mâle ; B. Valve trois-voies ; C. Seringue de grande taille ; D. Cathéter Tomcat ; E. Sonde de Foley ; F. Connecteur de cathéter à utiliser avec le cathéter urétral pour mâle. (Thrall, 2017)

Figure 11 : Cystographie à double contraste (a) Les flèches indiquent la paroi vésicale recouverte du produit de contraste iodé (b) projection ventrodorsale, chat couché sur sa droite pour éviter la superposition de la vessie et de la colonne (c) patient couché sur la gauche pour mettre en évidence l'autre côté de la vessie (HOLLAND et HUDSON, 2020)

Figure 12 : Urétrogramme sans anomalie chez un chat. Les radiographies doivent être acquises en fin d'injection du produit de contraste pour visualiser une distension de l'urètre. La colonne de contraste de l'urètre doit avoir des marges lisses et aucun défaut de remplissage. (HOLLAND et HUDSON, 2020)

Figure 13 : Composition minérale des urolithes félines recensés en 2013.

CaOx = Oxalate de calcium ; CaPO₄ = Phosphate de calcium ; MAP = Struvite (Ettinger *et al.*, 2017)

Figure 14 : Distribution des urolithes chez les chats entre 1981 et 2013

Figure 15 : Voie métabolique des purines. UC = uricase ; XDH = Xanthine déshydrogénase

Figure 16 : Cristallurie. (A) cristaux de PAM (flèche à double tête) et de CaOx (tête de flèche simple) dans un prélèvement urinaire de chat mâle castré européen de 6 ans. (B) Cristaux d'urates d'ammonium dans un échantillon urinaire de chien mâle castré de 1.5 ans. (C) Cristaux de xanthine dans un échantillon d'urine de

femelle beagle stérilisée de 3 ans traitée à l'allopurinol. (D) Cristaux de cystine dans un échantillon urinaire d'un bouledogue anglais mâle de 2 ans.

Figure 17 : Image radiographique d'un chien atteint de calculs de cystine et d'urate visibles à la radiographie. (A) Calcul de cystine dans la vessie (flèche) ; (B) Calcul d'urate dans l'urètre (flèche)

Figure 18 : (a) Oxalates de calcium monohydraté à 100% (flèche noire) avec une enveloppe de CaOx dihydraté chez un chat européen de 4 ans présenté pour périurie (b) Calculs plus difficiles à voir (flèches noires) sur la vue ventrodorsale à cause de la superposition avec la colonne (c) Chat européen de 11 ans ayant comme antécédent un épisode d'incontinence par défaut de vidange, plusieurs calculs vésicaux sont visibles (flèche noire) (d) Utilisation d'une rame afin de comprimer l'abdomen et de mieux voir les calculs urinaires (flèche orange). Des calculs rénaux sont également visibles (flèches noires)(HOLLAND et HUDSON, 2020)

Figure 19 : Echographie de la vessie. Un large calcul à l'origine d'un cône d'ombre (S) caractéristique est visualisé. Un épaissement irrégulier de la région crânio-ventrale de la paroi vésicale est noté. (Thrall, 2017)

Figure 20 : Urétrogramme rétrograde chez un chien mâle présentant de l'hématurie. Un défaut de la colonne de contraste focal distend la lumière de l'urètre membraneux et est compatible avec un urétrolithe

Figure 21 : Réalisation d'une PCCL. (A) Radiographie abdominale de profil d'un chat européen mâle castré de 8 ans présenté pour un unique calcul vésical (flèche). (B) La vessie est saisie et attachée à la paroi abdominale. Un cystoscope rigide est inséré dans la vessie. Le calcul est visualisé sur l'écran, est saisi puis retiré. (C) Urocystolithe retiré suite à la procédure. (Bartges et Callens, 2015)

Figure 22 : (A) Liste des alimentations conçues pour la dissolution et la prévention des calculs de PAM ; (B) Liste des aliments conçus pour la dissolution et la prévention des calculs de PAM d'une part et de CaOx d'autre part (Ettinger *et al.*, 2017)

Figure 23 : Images radiographiques d'un chat présumé atteint de calculs de PAM. (A) Avant thérapie de dissolution ; (B) même chat après 1 mois de thérapie de dissolution. (Palma *et al.*, 2009)

Figure 24 : Nombre de chats atteints de calculs du BAUF et traités par cystotomie au ChuvA *Seul le mois de Janvier est inclus dans l'année 2023

Figure 25 : Répartition des races des chats incluses dans notre étude

Figure 26 : Répartition des sexes des chats dans notre échantillon

Figure 27 : Répartition des âges des chats de notre échantillon

Figure 28 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « rapport d'opacité »

Figure 29 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « rapport d'opacité »

Figure 30 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « Taille Max »

Figure 31 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « Taille Max »

Figure 32 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « vessie »

Figure 33 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « urètre pelvien »

Figure 34 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « urètre pénien »

Figure 35 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « nombre total de calculs »

Figure 36 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « pointu »

Figure 37 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « rugueux »

Figure 38 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « homogène »

Figure 39 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « homogène »

Figure 40 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « spiculé »

Figure 41 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « rond »

Figure 42 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « pyramidal »

Figure 43 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « pyramidal »

Figure 44 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « ovoïde »

Figure 45 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « ovoïde »

Figure 46 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « irrégulier »

Figure 47 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « irrégulier »

Figure 48 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « facetté »

Figure 49 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « bosselé »

Figure 50 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « bosselé »

Figure 51 : Arbre de décision après exécution du programme sur les paramètres concernant la localisation des calculs du BAUF

Figure 52 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur les paramètres concernant la localisation des calculs du BAUF

Figure 53 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur les paramètres concernant la forme des calculs du BAUF

Figure 54 : Arbre de décision après exécution du programme sur les paramètres concernant la forme des calculs du BAUF

Figure 55 : Arbre de décision à 3 feuilles et au moins 3 échantillons pour chaque critères au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude.

Figure 56 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 3 feuilles et au moins 3 échantillons pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude.

Figure 57 : Algorithme de classement après croisement de l'arbre de décision et de la matrice de décision obtenus suite à l'exécution du programme sur tous les critères dont le paramétrage permettait la création d'un arbre à 3 branches associé à au moins 3 échantillons par critère obtenu

Figure 58 : Arbre de décision à 3 feuilles et au moins 1 échantillon pour tous les critères

Figure 59 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 3 feuilles et au moins 1 échantillon pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude.

Figure Annexe 1 : Feuilles de calculs recensant les natures minérales des calculs des chats inclus dans notre étude

Figure Annexe 2 : Feuilles de calculs recensant les natures minérales des calculs des chats inclus dans notre étude

Figure Annexe 3 : Arbre de décision à 6 feuilles et au moins 3 échantillons pour tous les critères

Figure Annexe 4 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 6 feuilles et au moins 3 échantillons pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude

Figure Annexe 5 : Arbre de décision à 6 feuilles et au moins 1 échantillon pour tous les critères

Figure Annexe 6 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 6 feuilles et au moins 1 échantillon pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude

Liste des tableaux

Tableau 1 : Innervation du bas appareil urinaire et rôles de différents nerfs. Σ = sympathique, $P\Sigma$ = parasympathique, R = récepteurs, Ach = Acétylcholine et NA = Noradrénaline (CREPEAUX G. 2022)

Tableau 2 : Radio-opacité des différents types minéraux de calculs cystiques à la radiographie abdominale (Thrall, 2017)

Tableau 3 : Pourcentage estimé des races de chats dans la population cible

Tableau 4 : Pourcentage des races de chats de la population cible

Tableau 5 : Répartition des âges des chats dans la population cible

Tableau 6 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « rapport d'opacité »

Tableau 7 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « rapport d'opacité »

Tableau 8 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « taille max »

Tableau 9 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « taille max »

Tableau 10 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « nombre de calculs »

Tableau 11 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « nombre de calculs »

Tableau 12 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « forme pointue »

Tableau 13 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « forme pointue »

Tableau 14 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « forme rugueuse »

Tableau 15 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « forme rugueuse »

Tableau 16 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « contenu homogène »

Tableau 17 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « contenu homogène »

Tableau 18 : Répartition des formes des calculs en fonction de leur nature minérale

Tableau 19 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « calculs de forme ronde »

Tableau 20 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « calculs de forme ronde »

.

Liste des abréviations

2-MPG : 2 mercaptopropionylglycine

BAU : Bas Appareil Urinaire

BAUF : Bas Appareil Urinaire Félin

CaOx : Oxalate de Calcium

ChuvA : Centre Hospitalier Universitaire Vétérinaire d'Alfort

ENVA : Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort

Kg : kilogramme

IC : Intervalle de Confiance

ICmax : Maximum de l'Intervalle de Confiance

ICmin : Minimum de l'Intervalle de Confiance

ITU : Infection du Tractus Urinaire

L5 : 5^{ème} vertèbre lombaire

m : moyenne

mL : millilitre

ML : Machine Learning

mm : millimètre

n : nombre

NaCl : Chlorure de sodium

p : pourcentage

PAM : Phosphate-Ammonium-Magnésium

PCCL : Cystolithotomie Percutanée

s^2 : Variance

SATH : Small Animal Teaching Hospital

Introduction

Les urolithiases sont classées parmi les affections dominantes chez de nombreuses espèces notamment le chat, chez lequel elles représentent entre 11 et 30% des affections du bas appareil urinaire (BAU)(Dorsch *et al.*, 2014 ; Kerr, 2013). Du grec « lithos » signifiant « pierre », c'est une maladie caractérisée par la formation d'un ou plusieurs calculs ou cailloux, au sein du tractus urinaire. Ainsi, elle peut concerner le haut appareil urinaire, à savoir les reins et les uretères, tout comme le BAU comprenant la vessie et l'urètre.

Historiquement, le traitement de choix de ces affections consistait en un traitement invasif chirurgical (Lulich *et al.*, 2016). Toutefois, le développement de la médecine vétérinaire et l'existence de compositions variées des urolithes ont permis de développer des traitements adaptés à la nature minérale des urolithes identifiés. Ainsi, des traitements non invasifs tels qu'une adaptation diététique ou la mise en place d'un traitement médical peuvent à ce jour être envisagés pour certains types de calculs.

Afin d'adapter au mieux le traitement à chaque cas présenté, il convient à ce jour de déterminer la nature minérale de l'urolithe en cause, grâce à une analyse spectrophotométrique (Ettinger *et al.*, 2017), faisant souvent suite à un retrait chirurgical.

Si le diagnostic de cette affection est réalisé sur la base du contexte épidémiologique, des signes cliniques et des images radiographiques (Langston *et al.*, 2008), il n'existe pas d'étude *in vivo* permettant de prédire la nature minérale d'un calcul grâce à l'analyse de clichés radiographiques simples réalisables par la majorité des vétérinaires praticiens.

C'est là le but de notre travail, l'étude d'une potentielle prédictibilité de la nature minérale des urolithes du BAU chez le chat, en se basant sur les caractéristiques des images radiographiques, qui pourrait permettre une optimisation du choix du traitement en s'affranchissant parfois d'une intervention chirurgicale.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous présenterons et étudierons les connaissances actuelles vis-à-vis des urolithes du BAU chez le chat, de leur formation à leur traitement en insistant sur l'intérêt de la prédiction de leur nature minérale. Dans une seconde partie, nous nous intéresserons à la méthodologie et aux résultats de notre étude rétrospective avant de les confronter aux données bibliographiques disponibles sur le sujet.

Première partie : Bibliographie

Afin de déterminer et de bien comprendre l'intérêt de la prédiction de la nature des urolithes du BAUF, il est primordial de faire un état des lieux des connaissances sur le sujet.

1. Anatomie et physiologie du bas appareil urinaire félin

A. Anatomie

La connaissance de l'anatomie est primordiale pour bien comprendre, analyser et interpréter les images radiographiques abdominales.

L'appareil urinaire se divise anatomiquement en une partie glandulaire et une partie tubulaire. La première est composée des deux reins tandis que la seconde est constituée de quatre segments : les bassinets gauche et droit, les uretères gauche et droit, la vessie et l'urètre. Le bassinnet recueille l'urine élaborée par le rein puis l'uretère la transporte jusqu'à la vessie. Enfin, la vessie reçoit les deux uretères et stocke l'urine entre les mictions pour se contracter et expulser l'urine dans l'urètre lors des mictions. Ce dernier est uniquement urinaire chez la femelle et est uro-génital chez le mâle suite à l'abouchement des conduits déférents en son début.

1. La vessie

La vessie est de forme ovoïde et localisée caudalement dans l'abdomen. Elle se compose de trois segments : une partie crâniale appelée l'apex, une partie centrale appelée le corps et enfin une partie caudale rétrécie formant le col qui se prolonge par l'urètre. La paroi de l'apex et du corps comprennent le muscle détrusor qui se contracte lors du déclenchement de la miction. (Dyce *et al.*, 2017)

Sur la face dorsale de sa paroi, en partie caudale du corps, se trouvent 2 ostiums uretériques. Un troisième orifice, celui-ci médian, est situé au col de la vessie et forme l'ostium interne de l'urètre formant, en lien avec les 2 précédents ostiums, le trigone vésical.

La vessie est en contact direct avec la paroi abdominale ventralement, les anses jéjunales crânio-dorsalement et les organes génitaux dorso-caudalement. La taille, forme et position de la vessie dépendent de son état de réplétion. Une vessie pleine peut dépasser dans sa partie crâniale l'ombilic. (Figure 1) Elle est attachée au péritoine viscéral par deux ligaments latéraux et un ligament ventral médian. (Fletcher, 1996)

2. L'urètre

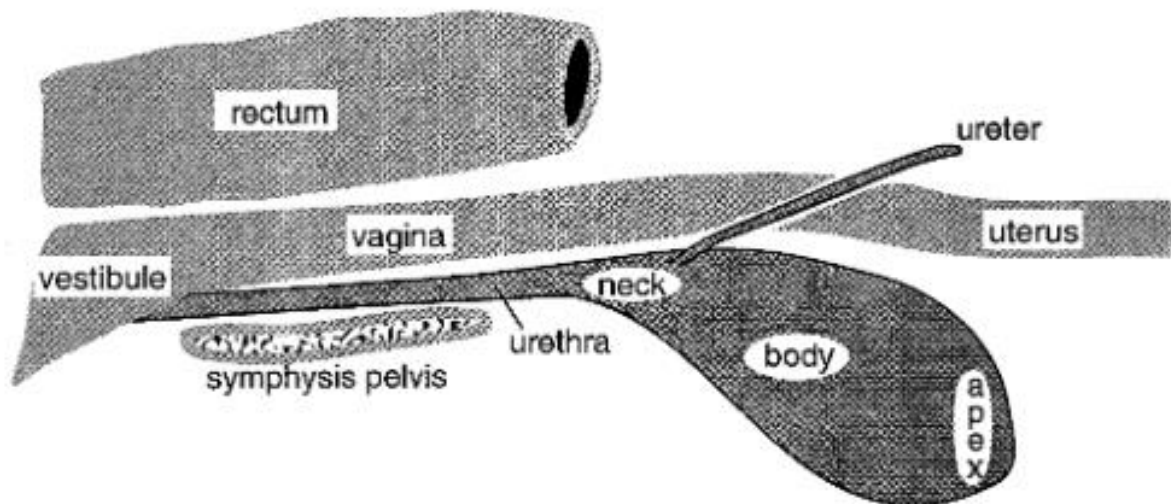
Il prend son origine sur l'ostium interne du col de la vessie et se termine à l'ostium externe de l'urètre en cheminant sur le plancher du bassin. Il s'ouvre alors sur le plancher du vestibule du vagin chez la femelle et à l'extrémité libre du pénis chez le mâle.

Chez la chatte, le sphincter interne de l'urètre occupe les deux-tiers crâniaux de l'urètre, le dernier tiers étant entouré du muscle strié de l'urètre qui constitue le sphincter externe de l'urètre.

Chez le chat mâle, l'urètre se divise en une partie pelvienne, elle-même divisée en portions pré-prostatique, prostatique et post-prostatique, puis en une partie pénienne. Le sphincter interne

occupe le col de la vessie et la région pré-prostatique de l'urètre. Le sphincter externe se retrouve autour de la région post-prostatique. La zone prostatique est une zone de transition entre les deux sphincters.(Fletcher, 1996)

Figure 1 : Bas appareil urinaire d'un chat femelle et ses relations avec les structures anatomiques adjacentes (symphyse pelvienne, rectum). La vessie est composée de l'apex crânialement, du corps en son centre et du col en sa partie caudale qui est prolongé par l'urètre.(Fletcher, 1996)



B. Rappels physiologiques

Physiologiquement, l'appareil urinaire félin, comme chez les autres carnivores et les ruminants, se compose de deux parties. La première partie est appelée le haut appareil urinaire, elle comprend les reins, les calices, les bassinets et les uretères. Chacun de ces éléments est présent bilatéralement. La seconde partie est celle qui va nous intéresser dans ce travail : il s'agit du BAU composé de la vessie et de l'urètre. (Gunn-Moore, 2003) (Figure 2, Figure 3)

Figure 2 : Anatomie du haut et du bas appareil urinaire (CREPEAUX G. 2022)

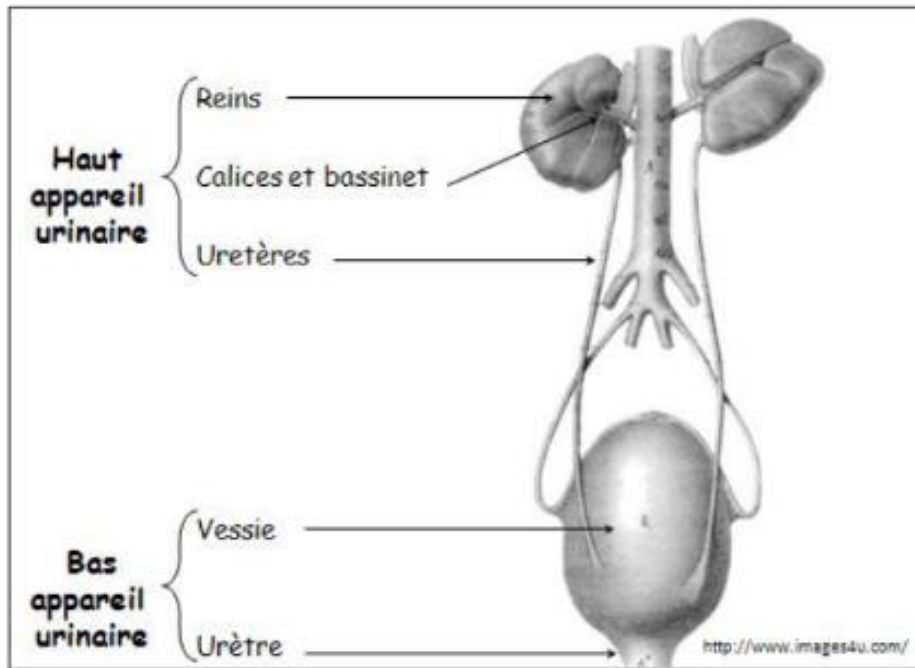
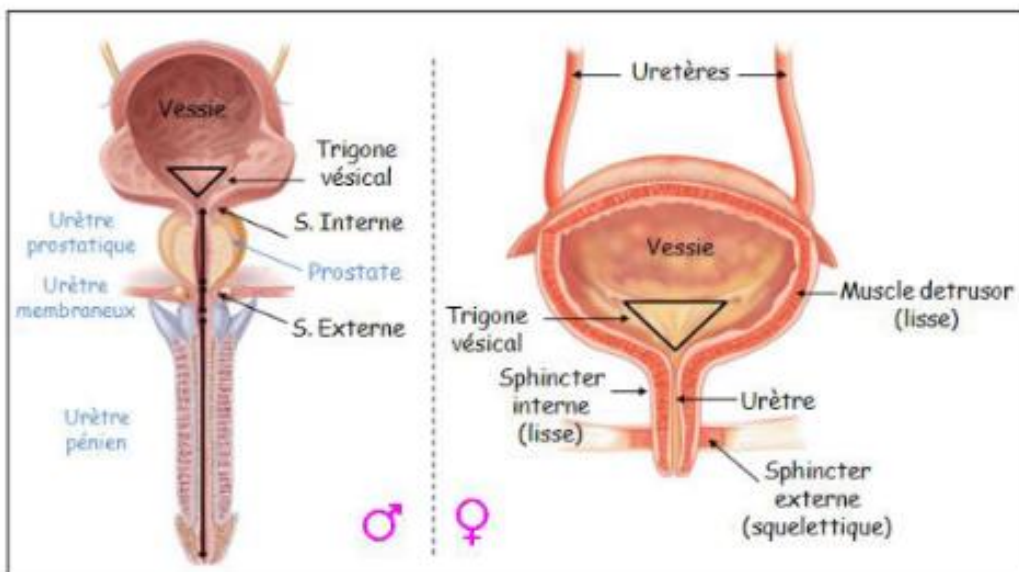


Figure 3 : Structures du bas appareil urinaire (CREPEAUX G. 2022)



L'appareil urinaire remplit de nombreux rôles au sein de l'organisme, en particulier la production de l'urine, appelée diurèse, et son évacuation, permettant alors l'excrétion des toxines provenant du foie et des déchets métaboliques ainsi que le maintien de l'homéostasie en jouant sur l'équilibre hydrique, électrolytique et acido-basique. Par ailleurs, les reins présentent également des fonctions endocrines (production de rénine, d'érythropoïétine, ...).

On appelle miction l'évacuation de l'urine dans le milieu extérieur et continence la phase de stockage d'urine dans la vessie précédant généralement une miction. Cela concerne ainsi uniquement le BAU urinaire. Un cycle mictionnel est l'enchaînement d'une phase de continence avec une phase de miction.

Ce phénomène est médié par 3 voies nerveuses efférentes comprenant les nerfs pelvien, hypogastrique et honteux ainsi qu'une voie nerveuse afférente composée du nerf pelvien afférent. (Figure 4) Chaque nerf a un rôle particulier au sein du cycle mictionnel permettant la relaxation ou la contraction de la vessie ainsi que la contraction des sphincters interne et externe. (Gernone *et al.*, 2022) (Tableau 1)

Figure 4 : Innervation du bas appareil urinaire (CREPEAUX G. 2022)

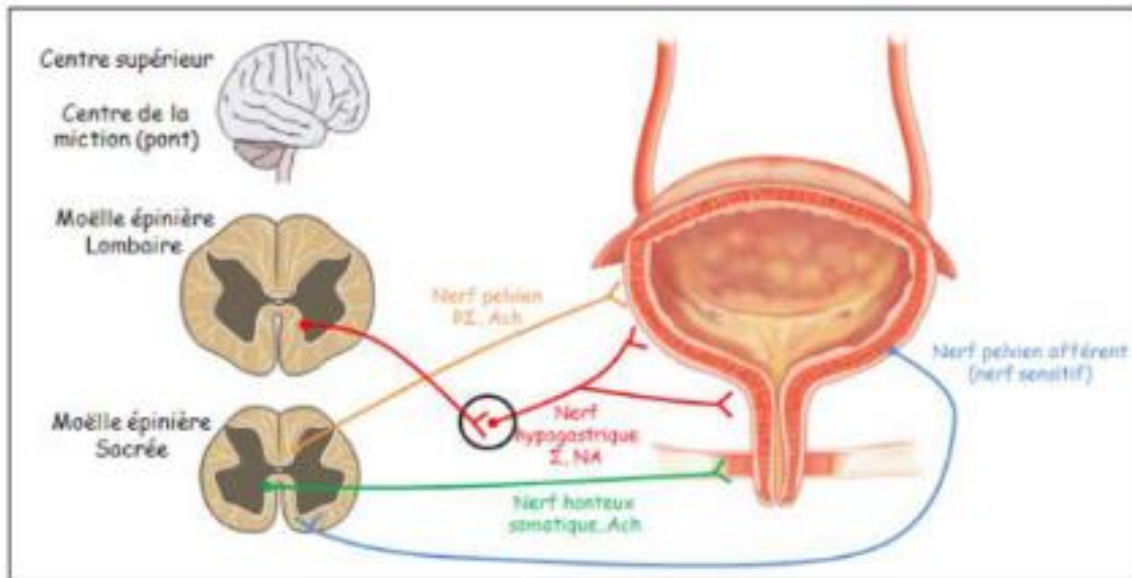


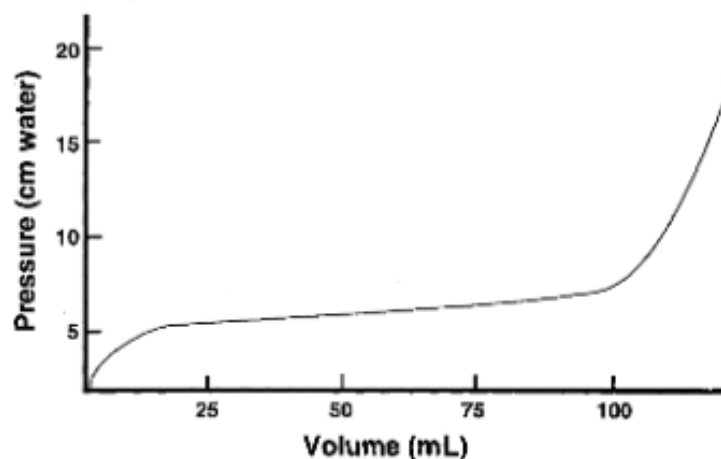
Tableau 1 : Innervation du bas appareil urinaire et rôles de différents nerfs. Σ = sympathique, $P\Sigma$ = parasympathique, R = récepteurs, Ach = Acétylcholine et NA = Noradrénaline (CREPEAUX G. 2022)

Nerf	Origine	Structure anatomique cible	Système	Récepteurs	Neurotransmetteurs	Effet sur la cible
Nerf pelvien	Moëlle sacrée	Vessie	Autonome $P\Sigma$	R muscariniques	Ach	Contraction vessie
Nerf pudendale (honteux)	Moëlle sacrée	Sphincter externe	Somatique	R nicotiniques	Ach	Contraction sphincter E
Nerf hypogastrique	Moëlle lombaire	Vessie	Autonome Σ	R β adrénergiques	NA	Relaxation vessie
Nerf hypogastrique	Moëlle lombaire	Sphincter interne	Autonome Σ	R α adrénergiques	NA	Contraction sphincter I
Nerf pelvien afférent	Vessie	Moëlle sacrée	Nerf sensitif	Mécano-R		

Dans un premier temps l'urine transite en permanence par les uretères jusqu'à la vessie qui est relâchée et dont les sphincters sont contractés. Grâce à sa compliance, la vessie se distend au fur et à mesure que l'urine s'y accumule sans augmentation de pression, permettant ainsi une filtration glomérulaire stable dans le temps. Ce phénomène est rendu possible par la haute compliance de la paroi vésicale et par l'accomodation des plis de la paroi vésicale qui se détendent et permettent de la rendre plus fine au fur et à mesure du remplissage vésical.

Lorsque le degré de remplissage de la vessie est élevé, la fréquence des signaux afférents du nerf pelvien augmente jusqu'à atteindre une activité maximale ayant pour conséquence l'inhibition des sphincters et la contraction du détrusor ce qui déclenche la miction. (Figure 5) Enfin, le détrusor maintient sa contraction et une pression intra-vésicale élevée jusqu'à une vidange complète.(Fletcher, 1996)

Figure 5 : Cystomégramme. Une augmentation initiale du volume vésical déclenche une légère augmentation de pression suivie d'une phase de plateau : la pression reste constante malgré l'augmentation du volume. Enfin le seuil d'accomodation vésicale est dépassé et une augmentation franche de pression est notée avec l'augmentation de volume.(Fletcher, 1996)



C. Aspect radiographique normal

Dans le but de repérer au mieux les anomalies du BAU sur des images radiographiques il est indispensable de connaître les images radiographiques normales de ce même appareil.

Ainsi, chez les carnivores domestiques, la vessie se situe dans la partie caudo-ventrale de l'abdomen dans sa localisation normale. Elle est visible sur les vues de face et de profil des radiographies abdominales, notamment grâce à son opacité tissulaire homogène et sa délimitation nette. Elle peut contenir du gaz suite à une cathétérisation ou à une cystocentèse. La paroi vésicale n'est pas visible sur des images radiographiques standards mais peut être visualisée par pneumocystographie.

La vessie présente une forme de poire. Sa taille peut-être variable et dépend grandement de son état de réplétion, elle peut ainsi ne pas être visualisée à la suite d'une miction. (Thrall et Robertson, 2023). Cependant sa visualisation ne pose que rarement problème en particulier chez le chat où elle est localisée plus crânialement que chez le chien et est souvent entourée du gras. (HOLLAND et HUDSON, 2020) (Figure 6)

Figure 6 : Vessie d'aspect normal chez un chat (Service d'imagerie médicale, 2013)



Caudalement à la vessie se trouve l'urètre. Ce dernier n'est pas totalement visible radiographiquement lorsqu'il est d'aspect normal, que ce soit chez le chien ou le chat. Afin de visualiser sa lumière, une urétrographie rétrograde ou antérograde peut être réalisée. Il apparaît alors bien délimité et peut être de diamètre variable selon les animaux. La colonne de contraste permet la visualisation d'anomalies pariétales, lumenales ou même extra-pariétales lorsque la colonne de produit de contraste est déviée. (Figure 7)

L'urètre est composé de trois éléments différenciés lors de l'analyse radiographique. Le premier est l'urètre prostatique dont le diamètre est inférieur chez le chat par rapport au chien. Il est suivi par l'urètre membraneux puis par l'urètre pénien dont la largeur est inférieure à celle de l'urètre membraneux. (Thrall, 2017) (Figure 8)

Figure 7 : Urétrographie chez un chat permettant la visualisation d'un urètre (flèche) et d'une vessie sans anomalie (Service d'imagerie médicale, 2013)

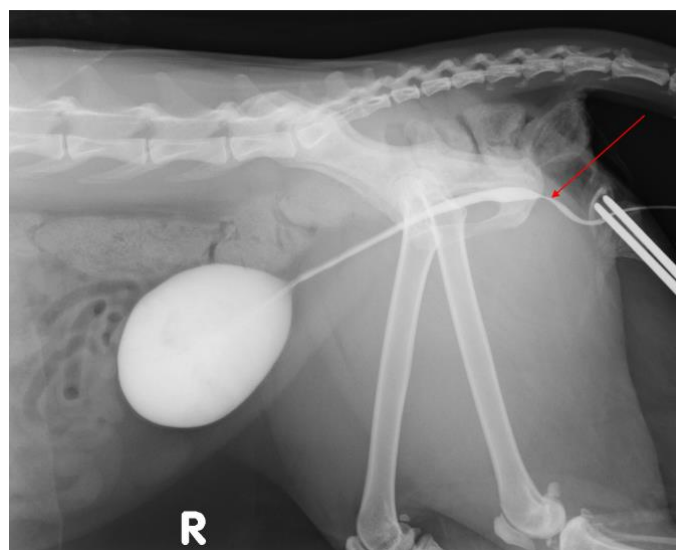
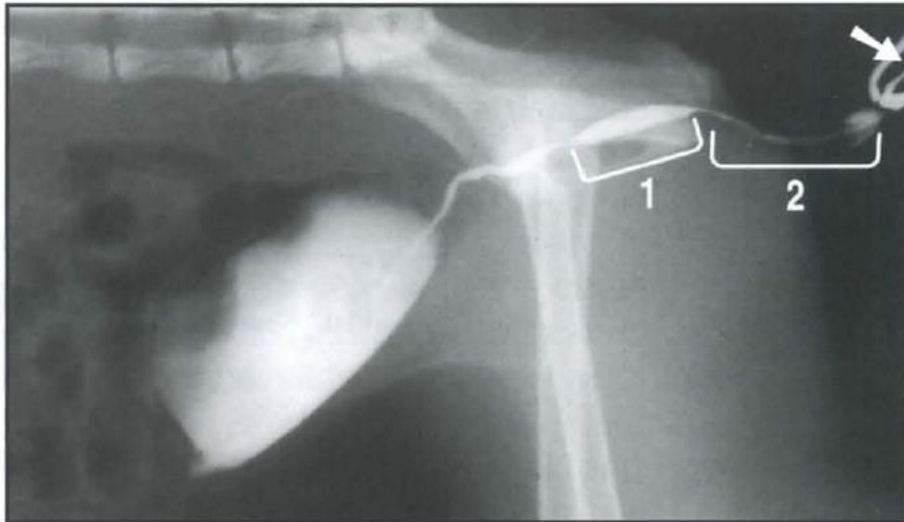


Figure 8 : Urétrographie rétrograde, urètre d'aspect normal chez un chat, une pince d'Allis est positionnée sur le prépuce (flèche). 1 = urètre membraneux ; 2 = urètre pénien (O'Brien et Barr, 2009)



Il est possible de visualiser un os pénien chez le chat mâle au sein du prépuce. Dans ce cas l'os pénien est bien plus petit et moins visible que chez le chien.(Thrall et Robertson, 2023) (Figure 9)

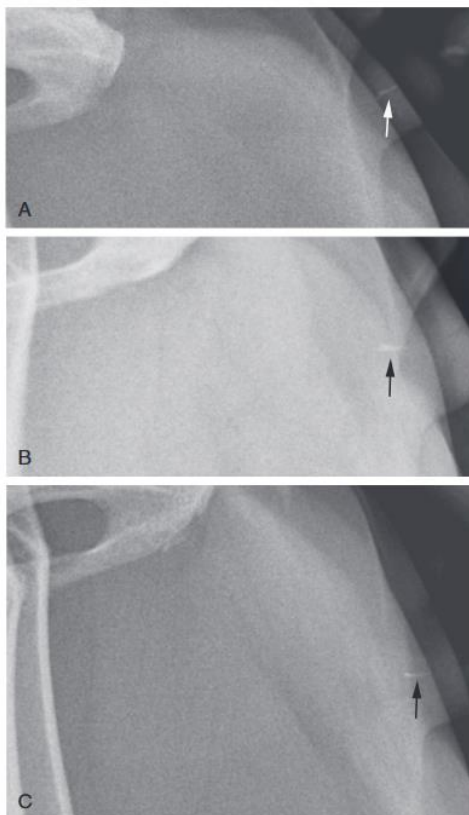


Figure 9 : Radiographies de profil de la zone périnéale chez des chats européens castrés de 3 ans (A), 8 ans (B) et 5 ans (C). Chacun présente une fine structure d'opacité osseuse dans le pénis (indiquées par les flèches) compatibles avec des os pénien.(Thrall et Robertson, 2023)

Il est souvent intéressant de réaliser des radiographies avec injection de produit de contraste iodé lors de l'évaluation radiographique du BAU, notamment en l'absence d'échographie. En effet la cystographie de contraste positif, la cystographie de contraste négatif ou encore la cystographie à double contraste, qui permettent une évaluation partielle de la paroi vésicale et de son contenu, sont des techniques dont la mise en œuvre est facilement réalisable chez un vétérinaire généraliste. (HOLLAND et HUDSON, 2020)

La cystographie à double contraste consiste en l'injection intravésicale successive d'air puis de produit de contraste iodé. Le chat est placé en décubitus latéral gauche pour éviter les embolies gazeuses (en théorie, l'air sera contenu dans la partie droite du cœur et sera ainsi pompé par les poumons plutôt que par la circulation systémique). Un cathéter urinaire est inséré dans la vessie afin d'injecter 2-3mL/kg d'air suivi d'environ 3mL de produit de contraste iodé. (Figure 10) Le chat est ensuite roulé afin de favoriser le contact entre le produit de contraste iodé et la paroi vésicale. Lorsque la vessie est modérément distendue sa paroi mesure 2 à 3 mm. Des radiographies doivent être réalisées après chaque injection afin de déterminer le moment d'obtention de la distension vésicale optimale. (HOLLAND et HUDSON, 2020) Le résultat de cette procédure est visualisable sur la figure 11.

Figure 10 : Equipement nécessaire à la cathétérisation vésicale et à la cystographie. A. Cathéter urétral pour mâle ; B. Valve trois-voies ; C. Seringue de grande taille ; D. Cathéter Tomcat ; E. Sonde de Foley ; F. Connecteur de cathéter à utiliser avec le cathéter urétral pour mâle. (Thrall, 2017)

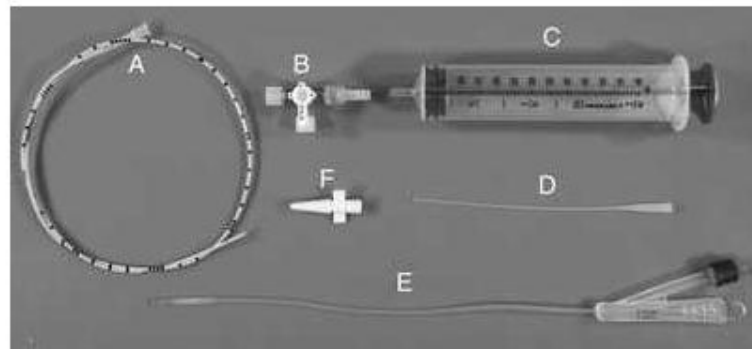
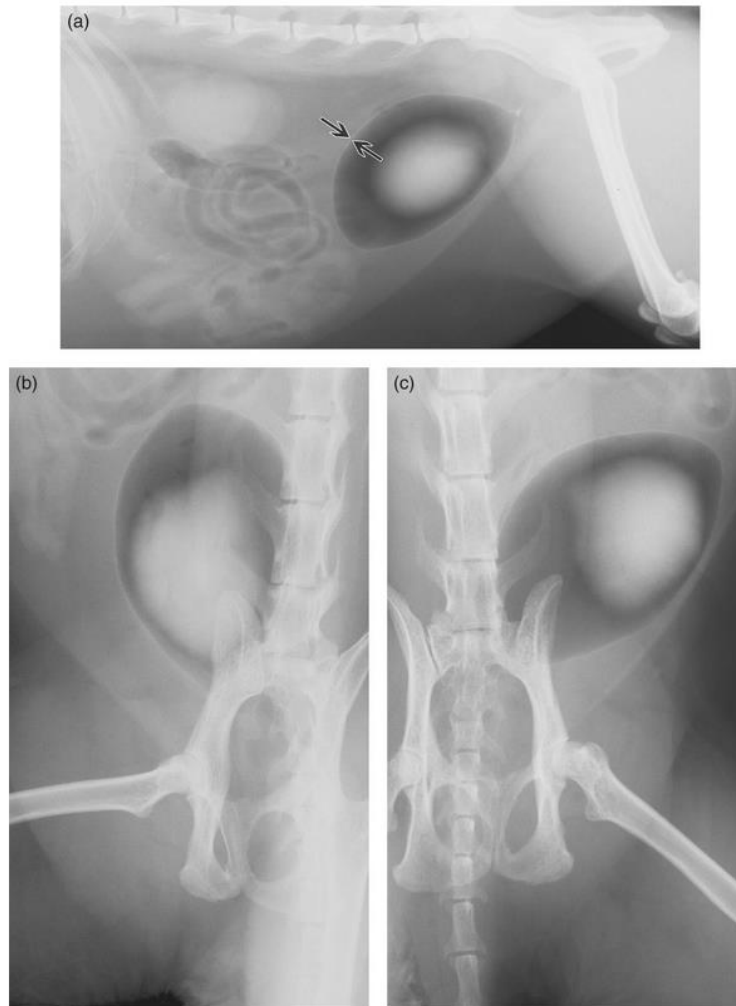


Figure 11 : Cystographie à double contraste (a) Les flèches indiquent la paroi vésicale recouverte du produit de contraste iodé (b) projection ventrodorsale, chat couché sur sa droite pour éviter la superposition de la vessie et de la colonne (c) patient couché sur la gauche pour mettre en évidence l'autre côté de la vessie (HOLLAND et HUDSON, 2020)



Les complications de la cystographie comprennent entre autres la possibilité d'un reflux vésico-urétéral pouvant avoir lieu surtout chez les jeunes animaux immatures au cours de la compression vésicale ou de la cystographie rétrograde. Cette complication ne constitue à priori pas un problème sauf si une infection vésicale est présente. D'autres complications possibles sont des infections iatrogènes (il est conseillé de réaliser la technique de manière stérile), des traumatismes de l'urètre ou de la vessie (il convient d'introduire le cathéter avec précautions), une rupture de la vessie (attention à ne pas trop remplir la vessie, en cas de résistance il convient de stopper la procédure et de réaliser une radiographie) et plus rarement des embolies gazeuses. (HOLLAND et HUDSON, 2020)

Une autre technique pouvant se révéler intéressante en routine est l'urétrographie rétrograde sous sédation profonde ou anesthésie générale.

Cette technique est plus délicate chez le chat notamment à cause de la petite taille de l'urètre pénien. Elle doit également être réalisée de manière stérile à l'aide d'un cathéter urinaire inséré au sein de l'urètre pénien. Lorsque la sonde urinaire est en place, un clampage du pénis est effectué. Le temps suivant consiste en l'injection progressive dans la sonde de 5 à 20 mL de produit de contraste iodé

dilué 2 fois. L'acquisition des images peut être réalisée en fluoroscopie ou par acquisition successive de radiographies en fin de phase d'injection.(Thrall, 2017) Une colonne de contraste lisse et sans défaut de rehaussement doit être visible à la radiographie chez un chat sain. (HOLLAND et HUDSON, 2020) (Figure 12)

Chez la femelle la réalisation de l'urétrographie rétrograde est plus complexe notamment à cause de la faible longueur de l'urètre et de son accès limité. En pratique une uréthro-cysto-vaginographie est couramment réalisée, à l'aide d'une sonde de Foley insérée au sein du vestibule. Le ballonnet est ensuite gonflé, la vulve est clampée puis le produit de contraste est injecté. (Thrall, 2017)

Figure 12 : Uréthrogramme sans anomalie chez un chat. Les radiographies doivent être acquises en fin d'injection du produit de contraste pour visualiser une distension de l'urètre. La colonne de contraste de l'urètre doit avoir des marges lisses et aucun défaut de remplissage. (HOLLAND et HUDSON, 2020)



2. Présentation générale et épidémiologie : présentation des différents types minéraux et de leurs mécanismes de formation

A. Généralités concernant les urolithiases félines

Les lithiases urinaires sont des affections très fréquentes chez le chat et constituent, après les cystites, la seconde cause d'affection du BAU. Elles résultent de la formation de calculs au sein du tractus urinaire.

Des études récentes rapportent qu'entre 11 et 30% des chats présentés avec des signes d'obstruction du BAU présentent une urolithiase (Dorsch *et al.*, 2014 ; Kerr, 2013 ; Sævik *et al.*, 2011). Dans 11% des cas, ces signes sont causés par des défauts anatomiques et entre 1 et 8% par des infections du tractus urinaire (ITU).

Chez les chats de plus de 10 ans, 46% des affections du BAU sont liées à des infections et 17% d'entre elles sont associées à des calculs. (Palma *et al.*, 2009)

Un urolithe peut être composé d'un unique type minéral, il est alors dit « pur », ou d'une combinaison de types minéraux avec une faible quantité de matrice organique, il est ainsi dit « mixte ». Un calcul est composé de plusieurs couches appelées de l'extérieur vers l'intérieur « cristaux de surface », « coquille », « calcul », « nid ». Cette dernière est la zone de croissance initiale de l'urolithe. Le calcul correspond à la portion majeure de l'urolithe et est entouré de la coquille. Les cristaux de surface correspondent à une enveloppe incomplète de l'urolithe. (Bartges et Callens, 2015)

Les calculs peuvent se former à partir de composés calciques (oxalate de calcium (CaOx), phosphate de calcium), de phosphate ammoniaco-magnésium (struvite ou PAM), mais aussi de purines (urate et xanthine), de cystine, de silice ou de plusieurs de ces composants formant alors un calcul mixte. (Nykamp, 2017)

Chaque type minéral de calcul du BAU se forme selon un mécanisme qui lui est propre. Cela implique qu'ils sont tous différents d'un point de vue épidémiologique d'une part, et implique des modalités de traitement différentes d'autre part. La compréhension de ces mécanismes est donc nécessaire à l'identification des différents types minéraux des calculs et à la mise en place d'un traitement adapté.

La formation d'urolithes est souvent la conséquence de plusieurs désordres. Certains peuvent être aisément identifiés et corrigés (comme par exemple la formation de calculs de PAM secondaire à une ITU), d'autres sont identifiables mais ne peuvent pas être corrigés (tels que l'hyperuricosurie des Dalmatiens prédisposant à la formation de calculs d'urates). Enfin, d'autres mécanismes sont simplement inconnus à ce jour (comme la formation de calculs de CaOx chez les schnauzers miniatures). (Bartges et Callens, 2015)

Chez le chat, deux types de calculs prédominent : les calculs de PAM (phosphate-ammonium-magnésium ou PAM) et les calculs de CaOx. Chacun représente plus de 40% des urolithes félines (Palm et Westropp, 2011 ; Kerr, 2013). Des calculs de purine sont retrouvés dans 5% des cas. Les calculs restants sont plus rares et composés d'autres substances telles que de la matrice, des phosphates de calcium ou encore de composition mixte (Ettinger *et al.*, 2017) (Figure 13, Figure 14)

Figure 13 : Composition minérale des urolithes félines recensés en 2013. CaOx = Oxalate de calcium ; CaPO4 = Phosphate de calcium ; MAP = Struvite (Ettinger *et al.*, 2017)

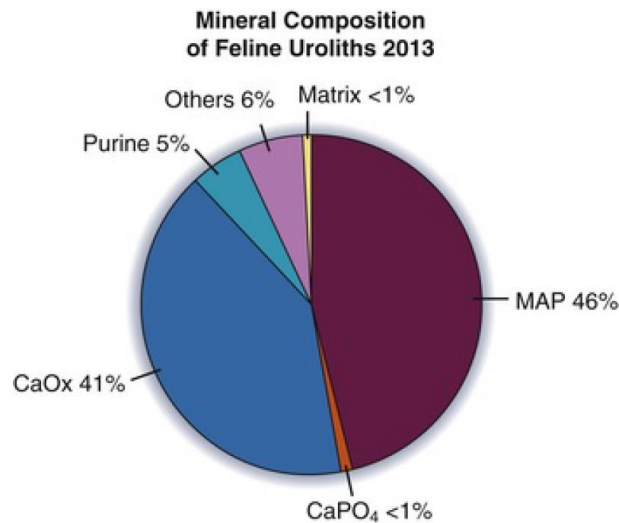
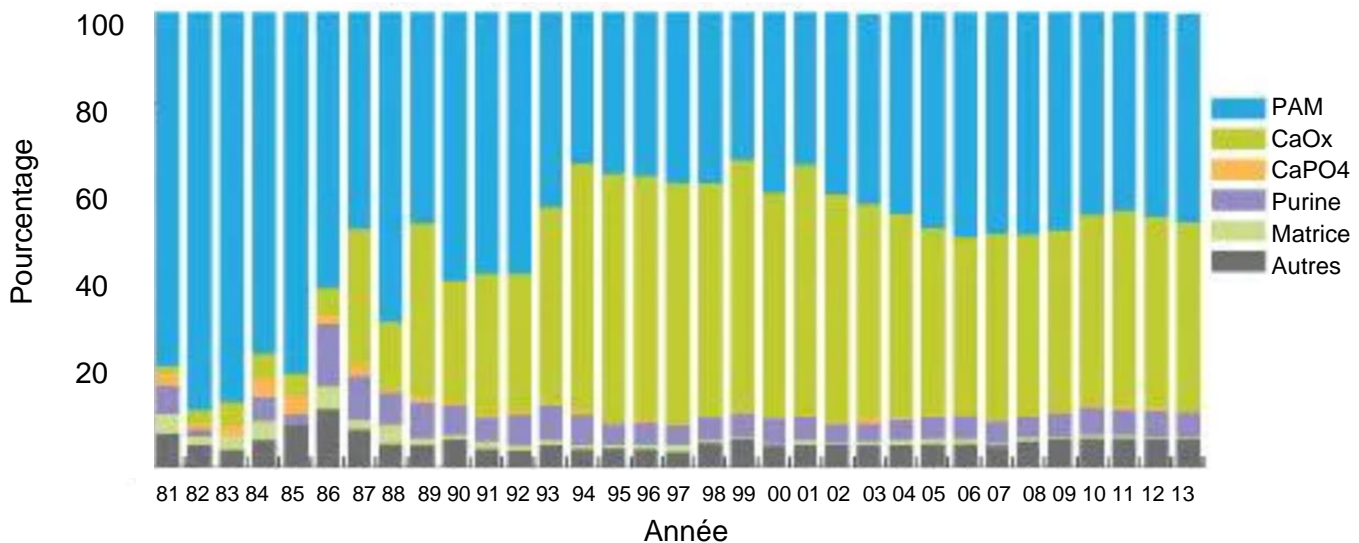


Figure 14 : Distribution des urolithes chez les chats entre 1981 et 2013 Minnesota Urolith Center, 2014)



Chez le chat comme chez le chien, les calculs vésicaux peuvent être d'origine multifactorielle. Ils peuvent être la conséquence d'une alimentation inadaptée, d'un pH urinaire anormal, d'une ITU, notamment en présence de bactéries uréases positives, d'un traitement médicamenteux, ou d'origine génétique, métabolique ou endocrinienne (Appel *et al.*, 2008. ; Lekcharoensuk *et al.*, 2001). Ils peuvent également faire suite à la présence d'un corps étranger, ce qui est rare, ou faire l'objet de récurrences suite à une cystotomie (entre 40 et 60% des calculs de CaOx chez le chien) (Hickey *et al.*). Il existe également des calculs hémorragiques et iatrogènes (Minnesota Urolith Center, 2014 ; Osborne *et al.*, 2009b)

Afin de développer une approche thérapeutique efficace, il est important d'identifier les anomalies favorisant la formation des urolithes qui, comme leur dissolution et leur prévention, impliquent des processus physiques complexes.

Cinq facteurs majeurs influent la formation d'urolithes :

- une sursaturation urinaire résultant en la formation de cristaux précurseurs d'urolithes
- l'effet d'inhibiteurs de la cristallisation et d'inhibiteurs de l'agrégation et de la croissance des cristaux
- les complexeurs cristalloïdes
- l'effet de promoteurs de l'agrégation et de la croissance des cristaux
- l'effet de matrice non cristalline

Il est important de garder en mémoire que l'épidémiologie générale des différents types de calculs est dynamique. Cela signifie que la nature des urolithes prédominants ce jour n'est peut-être pas la même que celle du futur. En effet on note récemment une baisse de la fréquence des calculs de PAM au profit des calculs de CaOx, à associer à une meilleure qualité de la gestion diététique des calculs de PAM, alimentation qui augmente le risque de développement des calculs de CaOx.(Nykamp, 2017)

B. Calculs d'oxalates de calcium

1. Epidémiologie

Les calculs de CaOx correspondent à environ 40 à 50% de l'ensemble des urolithes du chat. Les chats les plus touchés par la formation de calculs de CaOx sont les chats généralement âgés entre 4 et 16 ans, d'âge moyen de 7.3 ans au moment du diagnostic (Gisselman *et al.*, 2009). Ces lithiases concernent généralement plutôt les chats mâles castrés, de race Persan, Himalayen et Burmèse, ou plus généralement les races à poils longs. Ces calculs touchent le bas et le haut appareil urinaire avec une prévalence de 50% pour le BAU et de 70% pour le haut appareil urinaire. (Lekcharoensuk *et al.*, 2005).

Il existe deux formes de calculs de CaOx, monohydraté (whewellite) et dihydraté (weddellite), ce qui ne change en rien la prise en charge ; elles ne seront donc pas différenciées dans ce manuscrit.

2. Mécanisme de formation

Le mécanisme de formation des calculs de CaOx prend en compte principalement deux facteurs. Le premier est la saturation des urines en calcium et en oxalate et le second correspond à l'équilibre entre ces éléments et les substances inhibant la formation de CaOx. Afin de quantifier cette probabilité de formation de CaOx suite à la saturation des urines, il est possible d'évaluer la sursaturation relative des urines (RSS) (Ettinger *et al.*, 2017)

La RSS est sous l'influence de la quantité relative en eau dans les urines, de la calciurie et de l'oxalurie, la première étant jugée comme la plus importante pour la formation des calculs de CaOx contrairement à l'homme.(Ettinger *et al.*, 2017)

L'acide oxalique est un produit du métabolisme de l'acide ascorbique et de plusieurs acides aminés comme la glycine et la sérine. Il forme des sels solubles avec le sodium et le potassium mais insolubles avec le calcium. Une concentration urinaire élevée en acide oxalique augmente donc le

risque de formation de calcul de CaOx. L'oxalurie dépend des apports alimentaires, de l'absorption intestinale, de la sécrétion tubulaire et du taux de sécrétion endogène de l'oxalate. Le calcium et le magnésium sont deux ions capables de se lier à l'oxalate et qui diminuent la quantité d'oxalate libre. Ces complexes sont alors excrétés et non absorbés. Des bactéries telles que *Oxalobacter formigenes* et les bactéries à acide lactique peuvent dégrader l'oxalate et potentiellement participer à la réduction de l'oxalurie. Une hyperoxalurie secondaire à une surproduction endogène est possible et trouve son origine dans un déficit métabolique génétique pouvant être de deux formes (type I et type II). Peu de cas d'hyperoxalurie primaire sont décrits chez le chat mais ceux qui le sont semblent apparentés au type II de l'homme. (Palm et Westropp, 2011 ; De Lorenzi *et al.*, 2005)

L'absorption intestinale du calcium a lieu de la même manière que l'oxalate, plus facilement sous forme libre. L'homéostasie du calcium est médiée notamment par la parathormone (PTH) et l'1,25-dihydrocholécalférol (1,25-Vitamine D) sur les os, les intestins et le rein. En effet, lors de chute de la calcémie, la quantité de PTH et de 1,25-Vitamine D augmente et entraîne une augmentation de la résorption osseuse et de l'absorption du calcium dans les intestins et dans les tubules rénaux. Une augmentation de la calcémie a l'effet inverse. Ainsi, une hypercalciurie peut résulter d'une hypercalcémie, d'une absorption excessive de calcium au niveau des intestins, d'une chute de la réabsorption rénale ou d'une résorption osseuse trop importante. Une hypercalcémie est ainsi associée à une augmentation du risque de la formation de calculs de CaOx. Chez les chats présentant des calculs de CaOx, 35% présentent également une hypercalcémie, contrairement aux chiens chez lesquels ce pourcentage s'élève à seulement 4%. (Lulich *et al.*, s. d.) A l'inverse, 35% des chats diagnostiqués d'hypercalcémie idiopathique présentent des calculs de CaOx. (Midkiff *et al.*, 2000) Une hypercalciurie peut être également observée en cas de traitements à base de diurétiques de l'anse, de glucocorticoïdes, d'acidifiant urinaire et de complémentation en vitamine D ou C. (Bartges et Callens, 2015)

L'influence du pH sur la formation des calculs de CaOx est controversée. En effet, si la solubilité urinaire absolue des complexes CaOx semble peu influencée par les valeurs du pH urinaire, un des facteurs de risque majoritaire identifié par les différentes études est l'acidurie persistante, qui peut être associée à une acidose métabolique entraînant alors une augmentation de la résorption osseuse du calcium et favoriser son excrétion urinaire. Cet effet n'a pas été décrit chez les chats d'âge inférieur à 1 an. De plus, l'acidurie favorise l'hypocitraturie, ce qui diminue l'activité des inhibiteurs urolithiques endogènes. Une acidurie pourrait également diminuer les capacités du pyrophosphate à agir comme inhibiteur de la formation des complexes CaOx. L'alcalurie est à l'origine d'une saturation en oxalate plus faible par rapport à l'acidurie. De plus, des urines alcalines favorisent la réabsorption tubulaire du calcium. Enfin, des aliments acidifiant les urines sont identifiés comme facteurs de risque de formation de calculs de CaOx chez le chat puisque les chats nourris à un aliment acidifiant les urines entre 5.99 et 6.15 de pH présentent trois fois plus de risques de former des calculs de CaOx que les chats nourris à base d'aliments entraînant des urines dont le pH est compris entre 6.5 et 6.9 (Grant, Werre et Gevedon, 2008). Des études se sont intéressées à l'effet du pH sur la RSS en CaOx mais les résultats divergent.

La densité urinaire est un autre facteur important dans la formation des urolithes de CaOx. Ainsi, des densités urinaires diminuées augmentent la saturation urinaire en calcium et acide oxalique ce qui augmente le risque de formation des urolithes. Les chats pouvant atteindre une densité urinaire très élevée, beaucoup de ceux présentant des calculs de CaOx atteignent une densité urinaire supérieure à 1.040, sauf en cas de trouble rénal. (Bartges et Callens, 2015)

Des protéines à haut poids moléculaire telles que la néphrocalcine, l'uropontine ou les mucoprotéines de Tamm-Horsfall pourraient également jouer un rôle dans la formation des calculs. Toutefois, celui-ci n'est pas connu à ce jour. On suppose qu'elles interfèrent avec la capacité du

calcium et de l'acide oxalique à se combiner, minimisant alors la formation des cristaux, leur agrégation et leur croissance. (Bartges et Callens, 2015)

C. Calculs de PAM

1. Epidémiologie

Les calculs de struvites ou PAM sont parmi les calculs les plus présents chez le chat et correspondent à 46% des urolithes analysés au Minnesota Urolith Center (MUC) (Ettinger *et al.*, 2017). Toutefois, leur prévalence peut descendre à 22% selon les études. (Buffington *et al.*, 1997 ; Gerber *et al.*, 2005 ; Hostutler *et al.*, 2005 ; Houston *et al.*, 2003) Ces dernières années, l'incidence des calculs de PAM serait en train de diminuer. (Davidson *et al.*, 2004) Cependant la prévalence des calculs de PAM est probablement sous-estimée puisque ces calculs peuvent être dissous médicalement sans forcément passer par une analyse spectrophotométrique. (Palma *et al.*, 2009)

Toutes les races de chat peuvent être affectées mais une prédisposition des domestic shorthair, ragdoll, chartreux, oriental shorthair, et himalayen est rapportée. A l'inverse, certaines races semblent présenter un risque diminué de développer ces urolithes, telles que les Rex, Abyssin, Burmese, Bleu Russe, Birman, les Siamois ainsi que les européens. (Palma *et al.*, 2009)

Les calculs de PAM peuvent survenir à tout âge et l'âge médian des patients atteint est de 5.75 ans (Thumchai *et al.*, 1996).

Les calculs de PAM se forment majoritairement dans l'urine stérile chez le chat (contrairement aux chiens et à l'homme qui nécessitent des bactéries uréases positives) mais elles peuvent aussi être la conséquence d'une infection du tractus urinaire (ITU) par des bactéries uréases positives. L'épidémiologie de ces types de calculs est donc différente selon leur mode de formation. (Dru Forrester et Roudebush, 2007)

En ce qui concerne les calculs de PAM stériles, ils sont majoritaires chez le chat entre 1 et 10 ans d'âge, aucune prévalence de sexe n'est connue et une baisse de fréquence après l'âge de 6-8 ans est rapportée. (Bartges et Callens, 2015)

Les calculs de PAM secondaires aux ITU sont documentés chez les individus âgés de moins de 1 an ou de plus de 10 ans sans prédisposition de sexe (Bartges et Callens, 2015) et sont plus fréquentes chez les chats de moins d'un an que chez ceux de plus de 10 ans. (Palma *et al.*, 2009) Notons qu'en présence de calculs rénaux, le risque d'ITU est augmenté de 80%.

2. Mécanisme de formation

Les calculs de PAM sont composés de phosphate ammonium magnésium hexahydraté ($Mg_2+NH_4+PO_4\cdot 6H_2O$). Pour se former, l'urine doit être sursaturée en chacun des composants formant les cristaux de PAM. La physiopathologie de la formation de ces cristaux n'est pas bien comprise mais la formation d'un calcul est favorisée par une combinaison de plusieurs facteurs de risque : race, sexe et alimentation. Elle dépend également du pH urinaire, de la densité urinaire, de l'excrétion minérale rénale, de la présence de promoteurs, de l'absence d'inhibiteurs et enfin de la présence d'infection ou d'inflammation. (Hostutler *et al.*, 2005)

Une alimentation riche en magnésium, phosphore, calcium, chlore et fibres favorise la formation de calculs de PAM chez des chats ayant déjà souffert d'urolithiases par rapport à des chats pour lesquels ce n'est pas le cas (Lekcharoensuk *et al.*, 2001). L'interaction des minéraux semble avoir plus de poids dans la formation des calculs de PAM que les facteurs individuels.

Les cristaux de PAM réagissent aux autres solutés dans les urines, appelés struvites activity products (SAP), qui favorisent la formation de calculs. En effet, dès lors que les SAP augmentent jusqu'à saturation, les cristaux s'agrègent puis forment des urolithes. Une augmentation marquée des SAP peut amener à une cristallisation spontanée.

Chacun des facteurs de risque précédemment cités joue un rôle spécifique dans la formation des calculs de PAM. Ainsi, en ce qui concerne l'alimentation, il est suggéré que la source de protéines influe sur les déchets nitrogéniques, ce qui a pour impact une altération de l'acidification des urines et la formation de cristaux de PAM. Les protéines pourraient également jouer un rôle de nid pour la formation de calculs de PAM. (Funaba *et al.*, 2001a).

Enfin, les protéines solubles dans les urines semblent agir comme promoteurs de la formation de cristaux de PAM indépendamment de la SAP. Il est alors suggéré qu'une réduction des protéines urinaires réduirait le risque de formation de ces calculs. (Matsumoto et Funaba, 2008)

L'alcalinisation du pH est un facteur prépondérant dans la formation de calculs de PAM puisqu'il réduit la déprotonation des phosphates, empêchant alors l'augmentation secondaire des anions phosphates trivalents puis empêchant la réduction de la SAP. (Buffington, Rogers et Morris, 1990) Des urines alcalines sont favorisées par une alimentation faible en protéines, une acidose tubulaire distale rénale ou des antécédents familiaux de calculs de PAM. (Ettinger *et al.*, 2017)

Comme évoqué précédemment, les calculs de PAM peuvent également se développer suite à une ITU. En effet, une infection à bactéries uréases positives produit par définition de l'uréase ; cette dernière convertit l'urée en ammoniac (NH₃) qui, par addition d'un ion H⁺, mène à la formation d'ammonium (NH₄) dans les urines. Cela contribue directement à la formation de calculs de PAM par la présence d'un substrat et par l'augmentation du pH urinaire, mais aussi indirectement par la création de nids de formation de lithiases au sein de lésions urothéliales.

Contrairement aux calculs de CaOx, il n'est pas encore établi qu'une alimentation humide ait un impact sur la formation de calculs de PAM. (Palma *et al.*, 2009) Toutefois, il semblerait que la prise hydrique et la consommation de nourriture étalée en de nombreux petits repas au cours de la journée diminuent l'incidence d'apparition de ces calculs. (Bartges et Callens, 2015)

D. Les calculs de purines (urates et xanthines)

1. Les calculs d'urates

a. Epidémiologie

L'urate est le 3^{ème} minéral le plus commun formant les urolithes des chiens et des chats (entre 5 et 8% des urolithes totaux) et le 2^{ème} chez les chiens et les chats de moins de 1 an après les calculs de PAM causées par des infections urinaires. (Bartges et Callens, 2015)

La prévalence des urolithiases puriques est stable au fil des années et se situe entre 3 et 10% selon les études (Albasan *et al.*, 2012 ; Appel *et al.*, 2010). Une de ces études, sur 10.083 chats, rapporte une prévalence de 3.9% d'urates dont 96.7% d'urates d'ammonium et 3.3% d'acide urique. Cinquante-huit pourcent des chats de l'étude sont des mâles. Le Mau Egyptien est le plus représenté (82%) puis le Birman (27%) et le Siamois (13%) (Appel *et al.*, 2010).

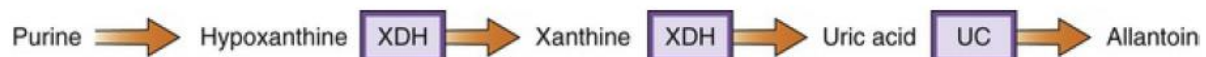
Une association existe entre l'âge et l'apparition des calculs d'urate. Les chats jeunes auraient tendance à être plus sujets aux calculs d'urate. Le Mau Egyptien semble développer des calculs d'urates plus précocement que les autres races. (Ettinger *et al.*, 2017) Plus généralement, la formation de ces calculs est plus commune chez les chiens et les chats de moins de 7 ans. (Bartges et Callens, 2015)

b. Mécanisme de formation

Peu de données sont disponibles chez le chat quant au mécanisme de formation de ces calculs et la plupart des informations supposées sont tirées de celles du chien. (Bartges et Callens, 2015)

L'acide urique est l'un des produits de la biodégradation métabolique des nucléotides puriques. Ils sont faits de 3 groupes de composants : oxypurines (hypoxanthine, xanthine, acide urique, allantoïne), aminopurines (adénine, guanine) et méthylpurines (caféine, théophylline, théobromine). La plupart des chats (et des chiens) admettent l'allantoïne comme produit final de cette chaîne métabolique. (Figure 15)

Figure 15 : Voie métabolique des purines. UC = uricase ; XDH = Xanthine déshydrogénase (Ettinger *et al.*, 2017)



C'est le plus soluble des produits de cette dégradation excrété dans l'urine. Les urolithes puriques sont composés d'acide urique (anhydraté, dihydraté, urate de sodium, urate d'ammonium) ou de xanthine car les urines sont sursaturées avec ces substances. (Bartges et Callens, 2015) Les urates d'ammonium sont les sels d'ammonium monobasiques de l'acide urique et correspondent à la forme la plus commune d'urolithe purique. Ils sont d'apparition naturelle chez les chats. (Bartges et Callens, 2015)

Ils se forment secondairement à une affection hépatique telle que les shunts porto-systémiques (SPS) ou une autre anomalie congénitale résultant en une hyperuricosurie (dalmatiens et bouledogue anglais). Chez le chat, malgré la rareté des SPS, il semblerait qu'ils soient également associés à la formation de calculs d'urates à l'instar des hypoplasies de la veine porte, ainsi que d'autres causes d'insuffisance hépatique. La présence de calculs d'urates chez un chat justifie alors la réalisation d'un bilan hépatique complet. (Ettinger *et al.*, 2017)

Un déficit métabolique d'origine génétique pourrait également exister chez certaines races de chat. (Ettinger *et al.*, 2017)

2. Les calculs de xanthines

a. Epidémiologie

Ces types minéraux sont rares chez le chat. (Osborne *et al.*, 2009b ; Tsuchida *et al.*, 2007) Quelques rapports de cas d'urolithes de xanthine non iatrogène sont décrits (Mestrinho *et al.*, 2013 ; Tsuchida *et al.*, 2007 ; White *et al.*, 1997, p. 7). Ces cas correspondent à 0.14% des urolithes félines analysés au MUC. (Bartges et Callens, 2015)

Ils sont composés généralement de xanthine pure et sont souvent décrits chez les chats de moins de 5 ans, sans distinction de genre. Les xanthines ont tendance à se former en grand nombre mais sont généralement plus petits que 5 mm. Des études décrivent que les calculs de xanthines du chat sont souvent associés à l'administration d'un inhibiteur de la xanthine oxydase : l'allopurinol. (Osborne *et al.*, 2009b ; Tsuchida *et al.*, 2007) Toutefois, une étude portant sur 64 cas de calculs de xanthines chez des chats ne décrit aucun cas de traitement avec de l'allopurinol. Parmi eux, 61/64 calculs de xanthine concernaient le BAU et 3 le haut appareil urinaire. L'âge moyen était de 2.8 ans +/- 2.3 ans, dont 8 chats de moins d'un an, 30 mâles castrés, 8 mâles non castrés et 25 femelles castrées. (Bartges et Callens, 2015)

b. Mécanisme de formation

Chez les chiens et les chats, la formation de ces calculs est souvent causée par un déficit d'activité de l'enzyme xanthine déshydrogénase entraînant un excès d'excrétion urinaire de xanthine et d'hypoxanthine. La première étant très peu soluble quel que soit le pH urinaire, cette excrétion favorise l'agrégation et la formation de calculs urinaires de xanthine. (Ettinger *et al.*, 2017)

E. Les calculs de cystines

1. Epidémiologie

Documentés pour la première fois en 1991, les calculs de cystine sont rares et représentent seulement 0.1% des urolithiases observées chez le chat au Canada et aux Etats-Unis. (Ettinger *et al.*, 2017)

L'âge moyen des chats présentant des calculs de cystine est de 3.6 ans. Aucune prédisposition de sexe ou de race n'est avérée à ce jour même si le Siamois et le domestic shorthair semblent surreprésentés. Chez le chat, tous les calculs de cystines ont été retrouvés dans le BAU (contrairement à l'homme ou au chien). (Ettinger *et al.*, 2017)

Les animaux atteints ont souvent montré des défauts de transport rénal de cystine. La cystinurie est associée à plusieurs mutations génétiques chez le chien et le chat. Elle n'est pas associée à une malnutrition protéique ou à une carence en acide aminé, mais peut cependant être associée à une hypercarnitinurie et une hypertaurinurie et parfois à une myocardopathie dilatée. (Sanderson *et al.*, 2001). La cystinurie en elle-même ne résulte pas inévitablement en une urolithiase. En effet, beaucoup de chiens et d'humains cystinuriques ne forment pas d'urolithes. (Bartges et Callens, 2015)

2. Mécanisme de formation

Un défaut de réabsorption du tubule proximal rénal souvent d'origine héréditaire est à l'origine de la formation de cristaux de cystine puis de calculs de cystines. Ce processus implique ainsi les cystines et des acides aminés dibasiques (ornithine, lysine et arginine (COLAs)). L'identification d'une mutation dans le gène SLC3A1 a été décrite chez un jeune chat mâle domestic shorthair. S'il est probable que des mutations à l'origine d'une cystinurie existent chez le chat, elles ne sont possiblement pas les mêmes que chez le chien et l'humain. (Mizukami *et al.*, 2015)

F. Les calculs de silices

Chez le chat, les calculs de silice ont une prévalence de 0.3% parmi tous les calculs. Il ne semble pas y avoir de prédisposition sexuelle pour le développement de ces calculs. (Ettinger *et al.*, 2017) Ces calculs sont très peu documentés chez le chat dans la littérature vétérinaire que ce soit concernant leurs données épidémiologiques ou celles relatives à leur formation.

G. Les calculs mixtes

1. Epidémiologie

Les calculs de composition mixte représentent 6% des calculs du chat selon le MUC. (Ettinger *et al.*, 2017)

Entre 5 et 15% des urolithes ont une composition mixte ou « compound ». Plus d'un minéral est présent dans le calcul, soit sous forme d'association minérale désorganisée au sein des différentes couches du calcul, il est alors dit mixte, soit lorsque le calcul est organisé en couches structurées de composition différentes et il est alors dit « compound ». Les formations admettant une structure en couches de compositions différentes ont été décrites et les différentes couches nommées ont été précédemment explicitées. (Bartges et Callens, 2015)

2. Mécanisme de formation

En ce qui concerne ces calculs de composition mixte, qu'ils soient structurés en couches ou non, plusieurs mécanismes de formation sont décrits. Les urates d'ammonium et les carbonates de calcium peuvent être mélangés avec des PAM lors du processus de formation des calculs de PAM induits par infection (dans cette situation, on va se concentrer sur le traitement des calculs de PAM pour la prévention des récurrences). Certains calculs peuvent être composés de PAM et de CaOx ; dans ce cas, l'oxalate est souvent central et le PAM périphérique. En effet, une infection secondaire entraîne la formation d'une couche de PAM autour de l'oxalate.

Enfin, les calculs d'urates d'ammonium peuvent contenir de la xanthine chez les patients recevant de l'allopurinol pour la dissolution ou la prévention.

3. Présentation clinique et diagnostic

A. PRESENTATION CLINIQUE

Les chats présentant des lithiases vésicales sont souvent atteints de signes cliniques variés. Ainsi, quelle que soit la nature minérale de l'urolithe développé, l'animal atteint peut présenter de la pollakiurie, de la strangurie, de l'hématurie, de la périurie, une combinaison de ses signes ou parfois aucuns d'entre eux. (Pressler et al) Lorsque les urolithes atteignent l'urètre des signes liés à une obstruction urétrale apparaissent. Celle-ci est souvent associée à une azotémie, une hyperkaliémie, une acidose métabolique et une déshydratation. Toutefois, ces signes ne sont pas spécifiques des urolithes et peuvent être également causés par des infections du tractus urinaire (ITU), des cystites idiopathiques félines et des néoplasies. Il est fréquent que la découverte de lithiases vésicales soit fortuite au cours d'une palpation abdominale, d'une radiographie abdominale ou d'une échographie abdominale. (Ettinger *et al.*, 2017)

B. PARACLINIQUE

a. BIOLOGIQUE

i. Analyses sanguines

Les paramètres sanguins dosés lors de numération formule sanguine et de biologie clinique sont dans la plupart des cas dans les normes. Cependant ils peuvent révéler des affections favorisant la formation de calculs urinaires comme des paramètres hépatiques augmentés en lien avec la présence d'un shunt porto-systémique (Pressler *et al.*, 2004), d'un diabète sucré ou encore d'une maladie rénale chronique ainsi que toute cause d'hypercalcémie chez le chat. Il est important de monitorer l'apparition d'une obstruction et de désordres électrolytiques qui, par leurs conséquences dramatiques, peuvent rendre la prise en charge urgente. (Ettinger *et al.*, 2017)

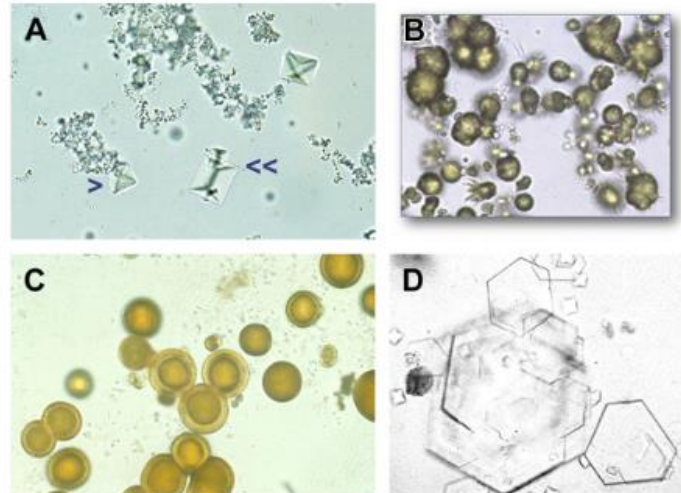
ii. Analyses urinaires

Lorsque des désordres urinaires sont suspectés, il est important de réaliser une analyse d'urine complète (bandelette, densité et analyse du culot urinaire). En effet, la cristallurie peut fortement orienter le diagnostic en suggérant une saturation de l'urine. (Figure 16) Cependant, les cristaux ne sont pas diagnostic de la présence ou de la composition des urolithes et peuvent être retrouvés chez des chats sains. Il arrive également que des lithiases urinaires soient présentes en l'absence de cristallurie. (Ettinger *et al.*, 2017). Cela est parfaitement illustré par le cas des cristaux de CaOx. La détection au culot de cristaux de CaOx indique une saturation et représente un facteur de risque de formation des calculs de CaOx. En revanche, seuls 50% des chats présentant des calculs de CaOx ont une cristallurie oxalo-calcique. (Bartges et Callens, 2015)

Enfin, des cristaux peuvent se former dans les urines après prélèvement (ce qui donne des faux positifs), notamment si celles-ci datent de plus d'une heure ou sont réfrigérées, suite à une alcalinisation urinaire. (Osborne *et al.*, 2009a, 2009b) Il est donc important d'analyser des urines fraîches. (Ettinger *et al.*, 2017)

La densité et le pH urinaire donnent des indications relatives à l'environnement chimique des urines qui peut également donner des indications sur la probabilité de formation d'urolithes et la nature probable de ces derniers. Aussi, une haute densité urinaire implique une plus forte probabilité de formation d'urolithes par forte concentration de précurseurs urolithiques. (Bartges et Callens, 2015)

Figure 16 : Cristallurie. (A) cristaux de PAM (flèche à double tête) et de CaOx (tête de flèche simple) dans un prélèvement urinaire de chat mâle castré européen de 6 ans. (B) Cristaux d'urates d'ammonium dans un échantillon urinaire de chien mâle castré de 1.5 ans. (C) Cristaux de xanthine dans un échantillon d'urine de femelle beagle stérilisée de 3 ans traitée à l'allopurinol. (D) Cristaux de cystine dans un échantillon urinaire d'un bouledogue anglais mâle de 2 ans. (Bartges et Callens, 2015)



Une bactériurie, cause ou conséquence d'urolithes de PAM principalement, est possible lors d'infection concurrente. Il convient alors de réaliser une uroculture afin de rechercher des bactéries uréases positives (*Saphylococcus* sp., *Proteus* sp., *Ureaplasma* sp.). Des urines alcalines persistantes constituent également une indication à l'uroculture. (Ettinger *et al.*, 2017)

b. IMAGERIE MEDICALE

La littérature vétérinaire indique qu'aujourd'hui, la radiographie et l'échographie sont toutes deux utiles dans l'évaluation des calculs de l'appareil urinaire et sont même complémentaires. L'entièreté du tractus urinaire félin doit être vérifiée au vu de la diversité des localisations possibles des calculs.

i. La radiographie

En radiographie, les calculs sont des structures d'opacité variable pouvant aller d'une opacité minérale à une radio-transparence. Cette opacité dépend notamment de la composition minérale du calcul en question. Il est traditionnellement accepté que les urolithes visualisables en radiographie sont ceux ayant subi une minéralisation à savoir les calculs de CaOx, de PAM, d'apatites et de silices. (Ettinger *et al.*, 2017). (Tableau 2)

Sur ce principe, les calculs non minéralisés à savoir les urates d'ammonium et les cystines purs ne devraient en théorie pas être visualisables à la radiographie et ont longtemps été considérés comme radio-transparents. Cependant, non seulement ils peuvent être radio-opaques lorsqu'ils comprennent en partie un composite minéralisé, mais des études récentes décrivent des calculs d'urates et de cystine radio-opaques s'ils sont de taille supérieure à 1 mm (DeBow *et al.*, 2023 ; Thrall, 2017)(Nell *et al.*, 2021) (Figure 17). Cela s'explique par des densités similaires entre les calculs dits radio-opaques et ceux dits radio-transparents, une faible densité étant le facteur principal d'atténuation de la visualisation des calculs sur des images radiographiques. (Nell *et al.*, 2021)

Figure 17 : Image radiographique d'un chien atteint de calculs de cystine et d'urate visibles à la radiographie. (A) Calcul de cystine dans la vessie (flèche) ; (B) Calcul d'urate dans l'urètre (flèche) (Nell *et al.*, 2021)

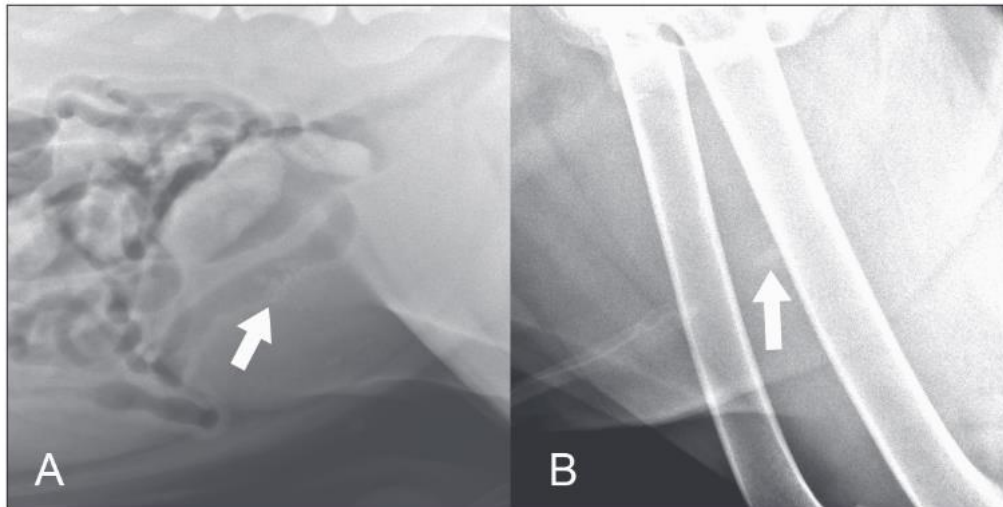


Tableau 2 : Radio-opacité des différents types minéraux de calculs cystiques à la radiographie abdominale (Thrall, 2017)

CALCULUS COMPOSITION	OPACITY	SURFACE CHARACTERISTICS
Calcium oxalate	Moderately to markedly radiopaque	Sharp projections or smooth
Calcium phosphate	Moderately to markedly radiopaque	Smooth
Struvite (ammonium phosphate)	Moderately to markedly radiopaque	Usually smooth; can be spiculated
Silica	Moderately radiopaque	Jackstone appearance
Urate	Nonradiopaque to faintly radiopaque	Smooth
Cystine	Nonradiopaque to faintly radiopaque	Smooth

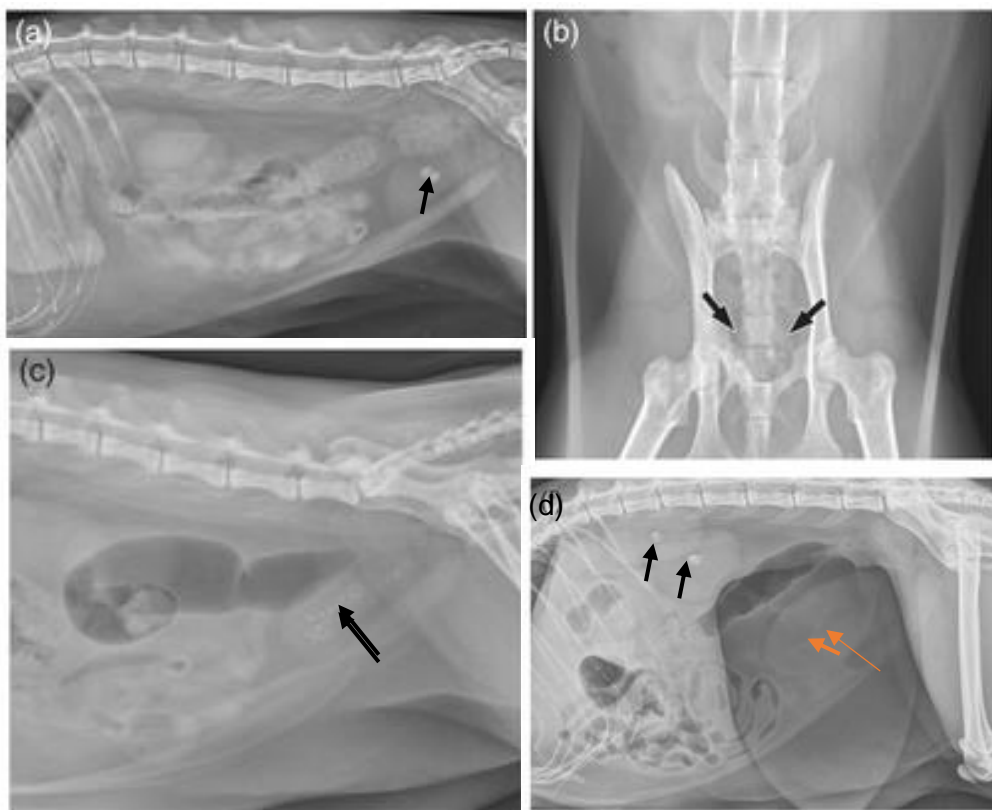
D'autres facteurs que la composition peuvent jouer un rôle dans la radio-opacité des calculs comme la taille des calculs, les constantes radiographiques et la quantité d'urine dans la vessie. Des projections radiographiques orthogonales sont conseillées afin de diminuer la probabilité de confondre des structures extérieures à la vessie avec des calculs vésicaux. En cas de doute, l'emploi d'un objet radio-transparent pour faire compression sur la vessie afin d'écartier toute structure adjacente à la vessie est possible. Une échographie peut également permettre de lever ce doute et de confirmer la présence d'un calcul vésical. (Thrall, 2017). Lorsque des calculs sont visualisés dans la vessie, il convient d'examiner soigneusement l'urètre, les uretères ainsi que les reins afin d'établir la présence ou l'absence de calculs additionnels.

Des études montrent un intérêt chez le chien des images radiographiques dans la détection des urolithes du BAU d'une part et dans leur diagnostic *in vitro*. Des études utilisant des fantômes de vessie ont montré des résultats similaires. Ainsi, chez le chien, 99% des calculs du BAU de plus de 3 mm sont détectés à la radiographie ce qui fait de la taille un critère plus important que l'opacité. (DeBow *et al.*, 2023) D'autres critères radiographiques tels que la forme et la surface des urolithes

sont corrélées à leur composition minérale *in vitro* au même titre que la taille et la radio-opacité. (Figure 18)

Les formes de calculs décrites dans la littérature comme jouant un rôle dans l'identification *in vitro* de la nature minérale des calculs du BAU sont : les calculs avec des facettes, ceux de forme ronde, ovoïde, irrégulière ou en forme de « jackstone ». En ce qui concerne l'étude de la surface des urolithes dans l'identification de leur nature minérale, les surfaces rugueuses ou lisses sont décrites. L'architecture interne des calculs est également un facteur identifié comme une aide à l'identification de la nature minérale *in vitro* ; elle peut être qualifiée d'hétérogène ou d'homogène. (Weichselbaum *et al.*, 2000)

Figure 18 : (a) Oxalates de calcium monohydraté à 100% (flèche noire) avec une enveloppe de CaOx dihydraté chez un chat européen de 4 ans présenté pour périurie (b) Calculs plus difficiles à voir (flèches noires) sur la vue ventro-dorsale à cause de la superposition avec la colonne (c) Chat européen de 11 ans ayant comme antécédent un épisode d'incontinence par défaut de vidange, plusieurs calculs vésicaux sont visibles (flèche noire) (d) Utilisation d'une rame afin de comprimer l'abdomen et de mieux voir les calculs urinaires (flèche orange). Des calculs rénaux sont également visibles (flèches noires). (HOLLAND et HUDSON, 2020)



ii. L'échographie

A l'échographie, les calculs apparaissent hyperéchogènes et sont associés à un cône d'ombre, leur surface peut être entièrement ou partiellement visualisée. (Figure 19) Lorsqu'ils sont nombreux et

de petite taille ils peuvent s'agglutiner, donnant ainsi l'impression qu'un calcul plus conséquent est présent. Il convient alors de faire bouger le chat afin de remettre les calculs en suspension. Cela est important car le traitement des calculs de petite taille sera moins souvent chirurgical que pour les calculs de grande taille. (HOLLAND et HUDSON, 2020)

Les calculs peuvent être associés à des signes plus ou moins importants de cystite, invisibles aux images radiographiques standards mais visibles à la cystographie à double contraste ou à l'échographie.

Figure 19 : Echographie de la vessie. Un large calcul à l'origine d'un cône d'ombre (S) caractéristique est visualisé. Un épaissement irrégulier de la région crânio-ventrale de la paroi vésicale est noté. (Thrall, 2017)



iii. Autres techniques et techniques complémentaires

Afin d'évaluer la présence de calculs dans la vessie, notamment lorsqu'ils sont radio-transparents, il est possible d'avoir recours à la cystographie à double contraste.

Une migration urétrale des urolithes est possible. Si les calculs en question sont radio-opaques, ils seront visibles sur les zones de projection de l'urètre à la radiographie abdominale de face et/ou de profil. Ils peuvent également être mis en évidence en image par soustraction à l'aide d'une urétrographie rétrograde. A l'urétrographie, les calculs entraînent un défaut de remplissage focal ou multifocal de la colonne de produit de contraste qui dilate la lumière de l'urètre. Ils sont différenciables des bulles d'air introduites au cours de la technique par la dilatation urétrale qu'ils entraînent, leur stabilité au cours des injections suivantes et leur forme et contours typiquement irréguliers (Figure 20). (Thrall, 2017)

Il est souvent recommandé de coupler les examens d'imagerie. Par exemple, pour les calculs de CaOx, la réalisation de radiographie abdominale et d'une échographie abdominale permet d'augmenter la sensibilité de détection des calculs. Ces derniers sont visibles facilement à la radiographie mais il est possible de les rater s'ils sont de petite taille notamment s'ils sont de taille inférieure à 1 mm. A l'inverse, il est possible de rater des lithiases présentes dans l'urètre à l'échographie. (Langston *et al.*, 2008)

Figure 20 : Urétrogramme rétrograde chez un chien mâle présentant de l'hématurie. Un défaut de la colonne de contraste focal distend la lumière de l'urètre membraneux et est compatible avec un urétrolithe. (Thrall, 2017)



Pour augmenter la sensibilité de détection des urolithes du BAUF, il est possible d'interpréter les radiographies en prenant en compte les données cliniques et épidémiologiques à disposition. Par exemple, des calculs radio-opaques chez un animal ayant un historique de calculs de PAM, de cristaux de PAM, d'urines alcalines et de radiographies compatibles avec des calculs de PAM nous orientent très fortement vers un diagnostic de calculs de PAM. Cependant, le diagnostic définitif se fait uniquement par analyse quantitative des calculs. (Palma *et al.*, 2009)

c. Analyse spectrophotométrique

Il est possible et très recommandé de faire analyser chaque calcul après son retrait afin d'en connaître la composition exacte. La seule situation justifiant de ne pas réaliser une telle analyse est lorsqu'un calcul minéralisé répond à une alimentation acide confirmant alors le diagnostic de calcul de PAM.

Plusieurs techniques existent afin d'analyser la nature minérale des calculs telles que la cristallographie optique par microscopie à lumière polarisée, la diffractométrie à rayons X, la spectroscopie infrarouge, le scan par microscopie électronique. (Pressler *et al.*, 2004) Ces différentes techniques d'analyses ne seront pas détaillées dans ce manuscrit.

4. TRAITEMENT

De nombreux traitements des calculs urinaires sont décrits chez le chat et le choix du traitement dépend du nombre, de la taille et de la nature des urolithes, ainsi que des possibles affections prédisposantes et/ou concomitantes. Ainsi, la détermination de la composition minérale des urolithes est primordiale afin de choisir le traitement le plus efficace et le moins invasif avant d'envisager un traitement chirurgical. (Pressler *et al.*, 2004)

En cas d'obstruction urétrale, il convient de lever en premier lieu l'obstruction et de corriger les désordres électrolytiques et acido-basiques le plus rapidement possible.

En cas de récurrence, une urétrostomie scrotale chez le chien et périnéale chez le chat est parfois recommandée. Ces procédures sont toutefois associées à des complications et un risque accru d'ITU.

A. PRISE EN CHARGE CHIRURGICALE

La détection d'urocystolithes ne nécessite pas nécessairement une intervention chirurgicale. En revanche, une obstruction à la miction, une augmentation de la taille et du nombre de calculs, des signes cliniques persistants ou un manque de réponse à un traitement médical sont des indications d'interventions chirurgicales. Une prise en charge chirurgicale est également le traitement de choix pour les calculs dont la dissolution est impossible. La technique chirurgicale usuellement employée est la cystotomie mais l'urétrotomie et l'urétrostomie sont parfois réalisées, notamment si un calcul urétral ne peut pas être repoussé dans la vessie. (Bartges et Callens, 2015)

Il existe également plusieurs techniques chirurgicales dites peu invasives permettant le retrait des urolithes telles que l'urohydropulsion, le retrait par cystoscopie transurétrale avec ou sans utilisation de lithotripsie par laser, la cystoscopie assistée par minilaparotomie encore appelée cystolithotomie percutanée (PCCL). (Bartges et Callens, 2015)

i. Urohydropulsion

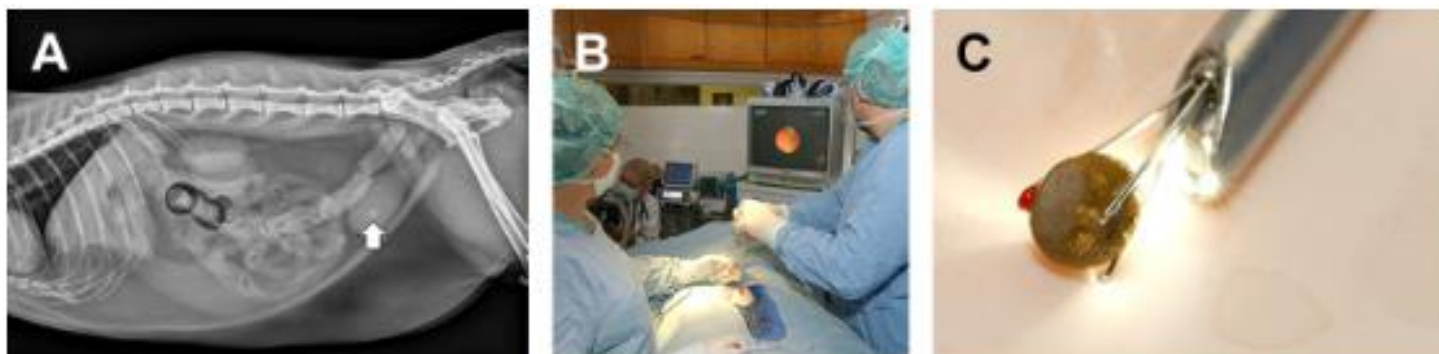
Pour un retrait d'urolithe assisté par cathétérisation (urohydropulsion), le chat est anesthésié, la vessie est remplie d'une solution cristalloïde stérile et un cathéter transurétral est placé. (Lulich *et al.*, 1999) Chez les chats, cette technique est réalisée à l'aide d'un cathéter de taille 3.5 French ou 5 French en fonction de la taille du patient. Au cours de la cathétérisation, le contenu de la vessie est aspiré pendant que la vessie est stimulée et agitée par palpation ou en bougeant le corps du patient. Le cathéter est alors retiré et les urines sont collectées dans un filtre, le « stone strainer », afin de piéger les urolithes. Cette procédure n'est pas évidente du fait de la taille limitée de l'urètre chez le mâle ainsi que de la taille limitée du cathéter introduit. Au cours de cette technique, le chat est ensuite placé à la verticale afin de faire tomber les urolithes dans le trigone vésical et l'urètre proximal (Lulich *et al.*, 1999)

La taille des calculs pouvant être retirés à l'aide de cette technique est d'environ 1 mm chez les chats mâle et 5 mm chez les chats femelles. Cette méthode est utilisée pour éliminer et analyser les calculs de petite taille. Elle est à risque de discrète hématurie ainsi que de rupture vésicale. (Ettinger *et al.*, 2017)

ii. Cystolithotomie percutanée (PCCL)

La PCCL est une technique au cours de laquelle la vessie est attachée à la ligne d'incision ce qui permet le retrait du calcul par une incision courte ou une ouverture laparoscopique dans la vessie (Figure 21). (Runge *et al.*, 2011) Cette méthode comporte peu de risques et est efficace pour retirer les calculs vésicaux. (Bartges et Callens, 2015)

Figure 21 : Réalisation d'une PCCL. (A) Radiographie abdominale de profil d'un chat européen mâle castré de 8 ans présenté pour un unique calcul vésical (flèche). (B) La vessie est saisie et attachée à la paroi abdominale. Un cystoscope rigide est inséré dans la vessie. Le calcul est visualisé sur l'écran, est saisi puis retiré. (C) Urocystolithe retiré suite à la procédure. (Bartges et Callens, 2015)



iii. Cystoscopie transurétrale

La cystoscopie transurétrale consiste en l'insertion dans l'urètre d'un cystoscope jusqu'à la vessie. Cette procédure est préférée chez les femelles mais est également décrite chez les mâles car elle est moins invasive que d'autres procédures. Pour les petits calculs, ils peuvent être retirés avec des « stone baskets ». Pour ceux de taille plus conséquente, la lithotripsie peut être envisagée. Elle consiste en l'utilisation d'une fibre de laser passée à travers le cystoscope. Cette fibre de laser va émettre une lumière infrarouge permettant de fragmenter le calcul. Cette technique ne peut en revanche pas être utilisée chez les chats mâles dont le diamètre urétral est trop faible pour supporter l'insertion d'un cathéter de taille suffisante pour le passage du laser. (Bartges et Callens, 2015)

iv. Autres techniques chirurgicales

La lithotripsie extra-corporelle par ondes de choc (ESWL) et la lithotripsie intra-corporelle par ondes de choc sont de plus en plus disponibles en médecine vétérinaire. Cependant, ces techniques peuvent engendrer des hypertensions indésirables, une perte de la fonction rénale et une augmentation du risque de récurrence. En outre, les urolithes n'y sont pas tous sensibles (9.4 à 26.3% d'échecs chez les humains) et les résultats dépendent de leur nature minérale ; les calculs de CaOx, de PAM et d'hydroxyapatites y sont sensibles, alors que les calculs de cystines ne le sont pas. (Nykamp, 2017)

B. PRISE EN CHARGE SPECIFIQUE

a. Calculs d'oxalate de calcium

Aucun protocole connu ne permet la dissolution médicale ou alimentaire des calculs de CaOx. Un retrait chirurgical est donc fortement indiqué.

i. Traitement chirurgical

Les techniques chirurgicales sont identiques à celles précédemment décrites.

ii. Prévention des récurrences

Les calculs de CaOx sont sujets à de nombreuses récurrences, il est ainsi préconisé de mettre en place autant que possible des mesures préventives. En effet, au bout de 6 mois, 10% des chats atteints de calculs de CaOx présentent une récurrence. Cela est également le cas pour 35% des cas à 12 mois chez les chiens. De nombreux chats sont également sujets à des récurrences 2 ans après le premier épisode de calculs de CaOx en l'absence de prise de mesures préventives. Le manque de connaissances quant à la formation des calculs de CaOx les rend d'autant plus difficiles à gérer. Ainsi, aucun traitement médical n'a été à ce jour mis en évidence. Il est en revanche possible de jouer sur les facteurs métaboliques connus afin de diminuer le risque de formation de calculs de CaOx.

Les mesures de prévention alimentaire ont pour but de réduire la concentration urinaire en calcium et en oxalate, de favoriser l'activité et la concentration urinaire élevée en inhibiteurs d'urolithes, de réduire l'acidité de l'urine et de favoriser la dilution des urines. Cette dernière mesure est très importante pour la prévention de la formation de calculs de CaOx. Cela passe par l'augmentation des apports hydriques en favorisant la prise de boisson, ce qui diminue la concentration urinaire en minéraux calculogéniques. De plus, cela augmente la fréquence de vidange urinaire, ce qui réduit le temps disponible pour la formation de calculs ainsi que leur croissance. Un moyen simple de réaliser cela est de donner une nourriture humide. D'autres moyens pour y parvenir consistent en l'aromatisation de l'eau de boisson, la multiplication des points d'eau et l'ajout d'eau à la nourriture sèche. L'objectif est d'obtenir une densité urinaire inférieure à 1.025. (Lekcharoensuk *et al.*, 2001).

Des inhibiteurs tels que le citrate, le magnésium et le pyrophosphate, forment des sels solubles avec l'acide oxalique ou le calcium et réduisent la disponibilité de ces éléments.

Plusieurs aliments ont été créés pour diminuer la RSS du CaOx. Ces aliments contiennent plus de NaCl et légèrement moins de protéines. Une supplémentation en NaCl pour favoriser la prise hydrique était controversée dans les études rétrospectives car elle favoriserait également l'excrétion urinaire de calcium. Toutefois, une étude prospective a montré la diminution de la RSS du CaOx suite à une supplémentation en sodium chez les chats en bonne santé ou ayant des calculs de CaOx en cours de formation. Il manque cependant des études sur le long terme afin de confirmer ce point. Il convient ainsi d'être précautionneux sur la supplémentation en sodium, même si l'animal ne présente a priori pas de problème rénal ou d'hypertension artérielle systémique. De plus, des complications peuvent apparaître sur les animaux présentant des cardiopathies. (Ettinger *et al.*, 2017)

Le pH urinaire a un effet direct sur la solubilité des cristaux de CaOx. Une étude a montré que la saturation urinaire en CaOx était plus basse à pH > 7.2 et plus haute à pH < 6.5. Cependant les études divergent quant à l'importance de la régulation du pH dans la prévention de la formation de calculs de CaOx. Les alimentations acidifiantes ou les acidificateurs urinaires augmentent la calciurie et diminuent l'activité des inhibiteurs urolithiques endogènes : ils sont donc contre-indiqués chez les chats à risque de formation de CaOx. Un pH cible compris entre 6.6 et 7.5 est recommandé chez les chiens et chats à risque de récurrence d'urolithe de CaOx. (Bartges et Callens, 2015)

Si des récurrences sont notées, il est possible de choisir une alimentation alcalinisant les urines. Chez les chats, il existe plusieurs alimentations formulées pour réduire les concentrations urinaires en acide oxalique et calcium comme l'« Urinary-O Plus can and dry » de la marque Iams®.

Dans une étude sur des chats atteints de CaOx formés naturellement, la consommation d'une alimentation préventive a permis la baisse de la saturation urinaire et ainsi la prévention des récurrences d'oxalates. (Lulich *et al.*, 2004) (Figure 23) Chez les chats atteints d'hypercalcémie, les alimentations à haute teneur en fibres et le citrate de potassium semblent plus adaptés à la prévention d'urolithes de CaOx (à la dose de 75 mg/kg par voie orale toutes les 12 heures à ajuster pour avoir un pH compris entre 7.0 et 7.5) mais l'efficacité d'un tel traitement n'est pas prouvée. Un monitoring de la kaliémie est recommandé au cours de l'utilisation du citrate de potassium afin d'éviter une éventuelle hyperkaliémie. (Bartges et Callens, 2015)

L'alimentation doit contenir de la vitamine B6, ce qui est le cas pour la plupart des alimentations du commerce, car une carence en cette dernière favorise la production endogène et l'excrétion urinaire d'acide oxalique. (Bai *et al.*, 1989) En pratique, les animaux présentant des récurrences ou une cristallurie persistante peuvent être complétés en vitamine B6 à la dose de 2 mg/kg par voie orale une fois par jour. (Bartges et Callens, 2015)

Des diurétiques thiazidiques sont également envisageables pour réduire la saturation en CaOx. En effet, en inhibant le fonctionnement des canaux Na/K, la réabsorption tubulaire du calcium est augmentée ce qui diminue son excrétion urinaire, diminuant alors la RSS en CaOx. Toutefois, aucune étude n'a étudié la sécurité de l'emploi de ces agents ainsi que leur efficacité dans ce contexte sur le long terme. (Bartges et Callens, 2015)

iii. Suivi sur le long terme

Il est recommandé de réaliser un suivi radiographique et échographique à 4 semaines, 3 mois et 6 mois après la prise en charge initiale puis tous les 6 mois. Il est également important de réaliser une analyse urinaire complète afin de contrôler la densité urinaire, le pH urinaire et la cristallurie. Idéalement l'urine est diluée, le pH urinaire est neutre et il n'y a pas de cristallurie. En cas de récurrences, il convient de réaliser un suivi radiographique tous les 2 à 3 mois. (Ettinger *et al.*, 2017)

b. Calculs de PAM

Plusieurs possibilités thérapeutiques concernant les calculs de PAM existent, qu'elles soient chirurgicales, médicamenteuses ou même alimentaires, et dépendent de l'expérience du clinicien, du contexte épidémiologique-clinique et des préférences du propriétaire.

La prévention de formation des calculs de PAM stériles passe par la diminution du pH urinaire et de la SAP, l'augmentation du volume d'urine et enfin la baisse d'excrétion urinaire de magnésium, d'ammonium et de phosphore. Cela est rendu possible par la modification de l'alimentation, l'administration d'acidifiants urinaires et l'augmentation de la prise hydrique qui augmente la clairance des cristaux de PAM ainsi que des urolithes de petite taille (Funaba *et al.*, 2001b). La solubilité des cristaux de PAM est maximisée lorsque le pH est inférieur à 6.4. (Bartges et Callens, 2015 ; Palma *et al.*, 2009)

i. Dissolution alimentaire

En ce qui concerne l'alimentation, des alimentations limitées en magnésium et en phosphore et maintenant un pH acide des urines favorisent la solubilité des calculs de PAM (Figure 22). (Dru Forrester et Roudebush, 2007)

Les dissolutions alimentaires n'entraînent pas d'obstructions urétrales, les calculs de PAM diminuant en taille. Elles ont pour avantage d'éviter une intervention chirurgicale. Plus de matières grasses dans la ration semble également réduire le risque de formation des calculs de PAM.

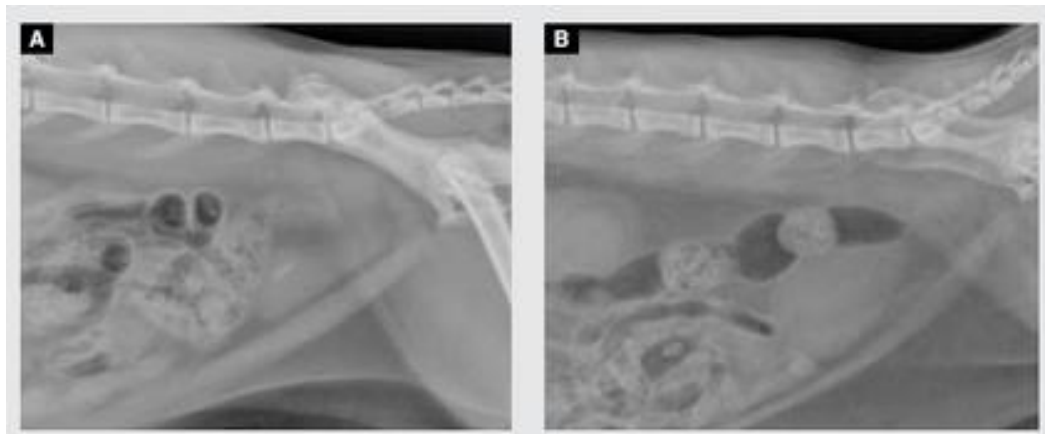
La prise hydrique peut être favorisée par une alimentation humide, l'ajout d'arômes dans l'eau ainsi que l'ajout de fontaines à eau. (Palma *et al.*, 2009)

Figure 22 : (A) Liste des alimentations conçues pour la dissolution et la prévention des calculs de PAM ; (B) Liste des aliments conçus pour la dissolution et la prévention des calculs de PAM d'une part et de CaOx d'autre part (Ettinger *et al.*, 2017)

Diets Marketed for Struvite Only Dissolution and Prevention	
Hill's Prescription Diet s/d can and dry—dissolution only	A
Iams Urinary-S Plus can and dry—prevention only	
Box is not inclusive of all dietary possibilities.	
Diets Marketed for Struvite Dissolution and Prevention and Calcium Oxalate Prevention	
Hill's Prescription Diet c/d Multicare can and dry	B
Hill's Prescription Diet Metabolic + Urinary can and dry	
Hill's Prescription Diet c/d Multicare Stress can and dry	
Royal Canin Veterinary Diets Urinary SO can and dry	
Royal Canin Veterinary Diets Moderate Calorie can and dry	
Royal Canin Veterinary Diets Olfactory Attraction dry	
Purina Veterinary Diet UR St/Ox Urinary Formula can and dry	
Box is not inclusive of all dietary possibilities.	

Suite à l'adaptation de l'alimentation, la dissolution des calculs de PAM stériles a lieu en une moyenne de 36.2 jours (pour des valeurs situées entre 14 et 141 jours) selon une étude réalisée sur 22 chats (Osborne *et al.*, 1990) et 44 jours sur des calculs infectés (Houston *et al.*, 2004). D'autres études ont corroboré ces résultats (Houston *et al.*, 2004). Une autre étude a montré une efficacité de 79% d'une alimentation spécifique sur la dissolution des calculs de PAM stériles (Medi-Cal Dissolution Formula, Veterinary Medical Diets, Guelph, Ontario) (Figure 23). Ces alimentations sont toutefois déconseillées en cas d'hypervolémie, de gestation et de croissance car la faible quantité de protéines peut acidifier et augmenter l'hypervolémie par augmentation de la concentration sanguine en sodium. (Osborne *et al.*, 1996)

Figure 23 : Images radiographiques d'un chat présumé atteint de calculs de PAM. (A) Avant thérapie de dissolution ; (B) Même chat après 1 mois de thérapie de dissolution. (Palma *et al.*, 2009)



ii. Dissolution médicale

En situation d'ITU, un traitement diététique n'est pas toujours suffisant car la cause principale de formation des cristaux est la présence de bactéries uréases positives (*Staphylococcus Spp*, *Enterococcus spp.* et *Proteus spp.* en sont les représentants les plus communs). (Bartges et Callens, 2015)

Il est indiqué dans ce cas une dissolution alimentaire d'une part et l'administration d'antibiotiques en adéquation avec les résultats d'un antibiogramme d'autre part. Le temps de dissolution moyen suite à la mise en place d'un tel traitement est de 79 (entre 64 et 92 jours) jours chez le chat (3 CT dans l'étude). (Osborne *et al.*, 1990) Un rapport de cas a mis en évidence une dissolution suite à la seule mise en place d'antibiotiques. (Rinkardt et Houston, 2004)

Il est important que le patient reçoive une antibiothérapie adaptée tout au long du protocole de dissolution car celle-ci libère des bactéries piégées dans l'urolithe, ce qui augmente les risques de récurrences d'ITU. (Bartges et Callens, 2015)

Chez le chien, un protocole à base d'acidifiant urinaire, la D-L méthionine à la dose de 75 à 100 mg/kg q12h, et d'un antibiotique approprié sans modification alimentaire a été testé et un temps de dissolution médian de 2 mois avec des valeurs allant de 1 à 4 mois a été observé (efficace chez 8 sur 11 chiens de l'étude). (Bartges et Callens, 2015)

Par ailleurs, le citrate pourrait jouer un rôle similaire à celui décrit pour les calculs de CaOx, réduisant alors la saturation urinaire en cristaux de PAM et donc la formation de calculs de PAM. (Palma *et al.*, 2009)

iii. Autre traitement et suivi sur le long terme

Lorsqu'il y a peu d'urolithes et qu'ils sont de petite taille (<4 mm), une antéhydropulsion peut être réalisée chez les chats femelles ou les mâles ayant subi une urérostomie périnéale. Ainsi, il est possible de les faire analyser et de lancer une culture. Cette technique peut être utilisée dès lors

que le chat présente des signes cliniques marqués ou que le propriétaire n'a pas la possibilité de réaliser une dissolution alimentaire. Dans ces cas-là, il est aussi possible de réaliser un retrait chirurgical en utilisant les techniques précédemment décrites. (Ettinger *et al.*, 2017)

Des radiographies de contrôle sont recommandées 2 à 4 semaines après le début de la dissolution alimentaire et doivent mettre en évidence une diminution de la taille des calculs de PAM comprise entre 33 et 100%. Un échec du traitement de dissolution est également possible suite à une mauvaise observance. L'alimentation doit être maintenue entre 2 et 4 semaines après dissolution complète des calculs de PAM pour s'assurer de la dissolution des calculs de moins de 3 mm et peut être maintenue tout le long de la vie du chat. L'aliment peut également être donné à tous les chats du domicile. (Ettinger *et al.*, 2017)

Les chats à risque d'ITU (notamment atteints de maladie rénale chronique, polyurie, diabète sucré, hyperthyroïdie ou ayant subi une urétrostomie périnéale) devraient être contrôlés tous les 3 à 6 mois (Bailiff *et al.*, 2006 ; Griffin et Gregory, 1992 ; Mayer-Roenne *et al.*, 2007) par la réalisation d'analyses urinaires et éventuellement de radiographies ou d'une échographie. (Palma *et al.*, 2009)

c. Calculs de purine

- **Calculs d'urate**

Contrairement au chien, aucun essai de dissolution d'urolithe d'urate d'ammonium sur affection porto-vasculaire n'a été réalisée chez le chat. Des études cliniques sont nécessaires pour évaluer la valeur d'une alimentation calculolytique, de l'allopurinol ou de l'alcalinisation des urines chez les chats atteints d'affections hépatiques avec calculs d'urates d'ammonium. En effet, la pharmacocinétique et l'efficacité de l'allopurinol peuvent être altérées chez les chats en insuffisance hépatique car sa transformation nécessite une fonction hépatique dans les normes et son temps de demi-vie est très court. (Bartges et Callens, 2015)

Chez les chats sans dysfonction hépatique la dissolution peut être tentée. Chez les chats aucune étude ne s'est intéressée à l'efficacité ou à la sécurité d'une dissolution médicale des calculs d'urates. Cependant, une alimentation à base de croquettes à visée rénale (Diet k/d, hill's pet products) associée à de l'allopurinol (7.5 mg/kg PO q12h) a permis la dissolution des calculs d'urates chez certains chats. L'utilisation de l'allopurinol n'a cependant pas été évaluée dans cette espèce. (Bartges et Callens, 2015) En attendant la validation d'un protocole médical, le traitement de choix en cas de calculs d'urates non dissolvables chez le chat reste le retrait chirurgical, l'urohydropulsion ou la cystoscopie complétée ou non d'une lithotripsie par laser. (Bartges et Callens, 2015)

Une alimentation en pâtée pauvre en protéines et alcalinisante est recommandée afin de réduire les récurrences et favoriser l'apport hydrique. Un suivi échographique est recommandé. (Bartges et Callens, 2015)

Des études cliniques sont nécessaires pour étudier l'efficacité d'un retrait chirurgical suivi de l'élimination de l'acidurie hyperurique et de la concentration élevée en urate d'ammonium en tant que traitement des calculs d'urates.

- **Calculs de xanthine**

En ce qui concerne les calculs de xanthines, il n'existe pas de dissolution médicale chez le chat. Le traitement passe obligatoirement par un retrait chirurgical.

La prévention passe par une alimentation pauvre en protéines et alcalinisante sous forme de pâtée afin de favoriser la prise hydrique. Un communiqué non publié de JW Bartges a étudié 10 chats atteints de calculs de xanthines confirmés, suivis pendant 2 ans après la mise en place de l'alimentation spécifique et seul un de ces chats a présenté une récurrence. Sans mesure de prévention on observe souvent des récurrences entre 3 et 12 mois après la réalisation du retrait chirurgical. (Bartges et Callens, 2015)

d. Calculs de cystine

A la différence du chien, une prise en charge médicale, alimentaire ou chirurgicale n'ont pas été décrites chez le chat. La solubilité des calculs de cystines augmente à $\text{pH} > 7.5$. Il est donc important de maintenir un pH alcalin chez ces animaux. Du citrate de potassium peut être utilisé (à la dose de 75 mg/kg par voie orale toutes les 12h, à ajuster au pH urinaire >7.2) ainsi qu'une alimentation supplémentée en arginine favorisant les apports hydriques. Les mesures de prévention passent également par une baisse de la saturation urinaire en cystine. Une alimentation à visée rénale peut jouer ce rôle chez le chat et permet de prévenir les récurrences de calculs de cystine.

La D-penicillamine et le 2-mercaptopropionylglycine (2-MPG) sont des agents chélateurs de cystine et sont utilisés chez l'homme et le chien. Toutefois, les études divergent quant à l'utilisation du 2-MPG chez le chat. Certaines avancent que les chats ne le tolèrent pas puisqu'il est associé à des signes digestifs, à des maladies hépatiques et des anémies. (Bartges et Callens, 2015) D'autres rapportent une utilisation sans risque chez cette espèce. (Ettinger *et al.*, 2017)

Dans la cystinurie de type III (forme androgéno-dépendante) chez le chien, la castration des adultes mâles semble curative. Nous ne savons pas si cette forme existe chez le chat ; cependant cette possibilité pourrait être envisagée. (Ettinger *et al.*, 2017)

e. Calculs de silice

Pour les silices, aucune dissolution médicale n'est connue. Une prévention via une alimentation pauvre en fibres d'une part et riche en protéine d'autre part et favorisant l'apport hydrique pourrait être utile, par transposition des connaissances disponibles chez le chien au chat. (Ettinger *et al.*, 2017)

f. Calculs mixtes

Une dissolution alimentaire pour des calculs de composition mixte peut-être essayée et révéler des types minéraux différents suite à sa mise en place.

Pour les calculs mixtes, dans le cas où le calcul est composé en son centre d'oxalate et de PAM en périphérie (l'infection secondaire est à l'origine de la couche de PAM autour de l'oxalate), la thérapie préventive notamment alimentaire, est dans ce cas dirigée contre le calcul de CaOx , qui s'est formé en premier et a conduit à l'apparition de la couche de PAM. Il convient de traiter l'infection en parallèle. Les urates d'ammonium peuvent contenir de la xanthine chez les chats recevant de

l'allopurinol en vue de dissolution ou de prévention. Cette situation peut être due à l'utilisation d'une dose trop élevée d'allopurinol, un déficit de restriction alimentaire en protéine/purine, le métabolisme spécifique de l'animal, et une alimentation inadaptée. La prévention est dirigée vers une diminution ou un arrêt de l'allopurinol ainsi qu'un changement alimentaire vers une alimentation plus riche en protéine, purine ou les deux.

5. POURQUOI ET COMMENT PREDIRE LA NATURE MINERALE

La capacité de prédire la nature minérale d'un urolithe est un enjeu clinique majeur. La réalisation de clichés radiographiques standards est à la portée de la majorité des vétérinaires praticiens. Déterminer des critères radiographiques fiables permettant de prédire *in vivo* avec confiance la composition minérale de l'urolithe visualisé serait un gain de temps et de chance pour l'animal et une économie pour le propriétaire. En effet, cela pourrait éviter des procédures invasives risquées ou spécialisées. Une étude sur les calculs vésicaux associés aux sutures de la paroi vésicale réalisées après une cystotomie indique qu'il serait intéressant d'éviter autant que possible les méthodes invasives afin de diminuer les récurrences d'urolithiases en priorisant des techniques telles que la lithotripsie par laser, l'urohydropulsion, la cystoscopie à panier et la PCCL ou encore en permettant l'emploi d'un traitement médical. (Hickey *et al.*, 2020) D'autre part, en cas de traitement médical notamment, cette prise en charge serait moins onéreuse pour le propriétaire qui serait plus à même d'adhérer à la prise en charge proposée.

Par ailleurs, la démocratisation des traitements médicaux et diététiques (Weichselbaum *et al.*, 2001) rend la prédiction des types minéraux des calculs du BAUF sur la base de clichés radiographiques d'autant plus pertinente. De plus, les clichés radiographiques standards sont largement intégrés dans la prise en charge classique des urolithiases. De ce fait, la prédiction radiographique de la nature minérale des urolithes s'intégrerait aisément dans cette démarche diagnostique standardisée.

Malheureusement, de tels caractères prédictifs n'ont pas été démontrés à ce jour que ce soit chez le chat ou chez le chien (Nykamp, 2017) et il est ainsi recommandé de retirer l'urolithe en question si le chat en est clinique afin de l'analyser et de mettre en place un plan de traitement permettant la prévention des récurrences. En cas de récurrence il est important d'analyser à nouveau l'urolithe en question car il peut être de nature différente du premier urolithe retiré.

Des études se sont intéressées à la mise en évidence d'une éventuelle relation entre l'opacité radiographique des calculs urinaires et celle de diverses concentrations de produits de contraste chez le chien. Un classement des calculs selon leur radio-opacité en 4 catégories y a été effectué : les calculs de radio-opacité faible (calculs d'urates), ceux de radio-opacité moyenne (calculs de PAM, cystine et silice), ceux de haute radio-opacité (calculs de CaOx) et enfin ceux de très haute radio-opacité (calculs d'apatite). Suite à ce classement, les auteurs rapportent une différenciation radiographique aisée des différents groupes *in vitro*. (Weichselbaum *et al.*, 1998)

Des études ont essayé de retrouver les résultats obtenus *in vitro* dans de nouveaux protocoles utilisant des fantômes de vessie. Une étude de la prédiction du type minéral des calculs du BAU du chien a montré une précision de 66% à l'analyse radiographique, de 70% en utilisant le signalement seul et enfin de 75% en utilisant les deux ou suite à la réalisation d'une cystographie à double contraste. (Weichselbaum *et al.*, 2001)

Une augmentation de la prédictibilité générale des calculs du BAU du chien de 7 à 10% est observée lorsque l'on combine le signalement avec une double cystographie de contraste dont le produit de

contraste est concentré à 200 mgI2/mL (cette augmentation est quantifiée à 1.7% pour les calculs d'urates et jusqu'à 55.6% pour les calculs d'apatite). En revanche, les calculs de silices et les calculs de CaOx sont peu détectés avec cette combinaison. Pour distinguer les calculs de CaOx des calculs de PAM, cystines et urates, il est possible que les cystographies à double contraste dont le produit de contraste est concentré à 80 mgI2/mL soient utiles ; à cette concentration, la plupart des oxalates sont iso-opaques alors que les autres sont radio-transparents. Une confusion commune entre calculs de CaOx et de silice existe avec cette technique mais ne pose pas de problème dans l'élaboration d'un modèle de prédictibilité car le traitement est chirurgical dans les deux cas. (Weichselbaum *et al.*, 2001)

Cependant à la différence des protocoles réalisés *in vitro* ce protocole n'a montré qu'une très faible amélioration entre le pouvoir prédictif du signalement seul et du signalement couplé aux images radiographiques ; cela pourrait être en lien avec une moins bonne visualisation des caractéristiques telles que la forme et la surface entre les images radiographiques capturées *in vitro* et celle capturées sur un fantôme de vessie. (Weichselbaum *et al.*, 2001)

Toutefois, en prenant en compte uniquement les cas locaux dans leur modèle, les auteurs ont augmenté la précision de leur prédiction de nature minérale des calculs de 1.0 à 70.3% en utilisant uniquement des examens d'imagerie et de 8.8 à 79.1% en utilisant uniquement le signalement de leurs animaux. Selon eux cette différence s'explique probablement par des différences de prévalence saisonnières et régionales. Il serait alors intéressant de réaliser un algorithme prédictif adapté à chaque région et période. (Weichselbaum *et al.*, 2001)

Avant de vouloir appliquer à une population *in vivo* les résultats présentés ci-dessus obtenus *in vitro* et dans un fantôme de vessie, il convient dans un premier temps d'être capable de détecter efficacement les calculs *in vivo*.

Une étude compare les différentes techniques d'imagerie utilisée chez le chien dans la détection des urocystolithes en utilisant une nouvelle fois un fantôme de vessie. Ainsi la radiographie semble plus sensible en cas de calcul d'apatite ou de calcul de CaOx monohydraté de faible taille (de taille inférieure à 1mm) et donne de meilleurs résultats que la cystographie à double contraste pour les calculs de haute densité. En ce qui concerne les calculs d'urates de sodium, de phosphate ou encore de CaOx dihydraté, la pneumocystographie est la plus sensible. La cystographie à double contraste permet une meilleure détection des calculs d'urate d'ammonium, de cystine ou de silice. Cependant, les résultats de la cystographie à double contraste diffèrent en fonction de la dilution du produit de contraste utilisé et de la profondeur du calcul dans la vessie. (Weichselbaum *et al.*, 1999)

Des modèles étudiant des caractéristiques potentiellement prédictives de la nature minérale des calculs urinaires *in vivo* chez le chien ont été décrits. Ils prennent en compte les types de cristaux visualisés au culot urinaire, le pH urinaire, l'opacité des urolithes, leur forme, leurs caractéristiques de surface et enfin leur homogénéité à la radiographie classique ou contrastée. En revanche, ces modèles sont limités par leur manque de significativité et par la présence d'artéfacts d'imagerie qui influent les résultats sans pour autant être compris à ce jour. (Weichselbaum *et al.*, 2000 ; Weichselbaum *et al.*, 2000)

Cependant, la totalité des études présentées concernent le chien. Aucune étude ne s'intéresse à la recherche d'une prédictibilité efficace de la nature minérale des calculs du BAU chez le chat. Il serait intéressant de mettre en place dans cette espèce un algorithme similaire à ceux précédemment évoqués applicable *in vivo* et se basant sur les critères d'imagerie déjà étudiés chez le chien ou combinant des critères épidémiologiques et d'imagerie si un modèle uniquement basé sur l'imagerie se révèle imprécis.

Deuxième partie : Etude rétrospective des cas de lithiase du bas appareil urinaire félin présentés à l'EnvA entre avril 2013 et janvier 2023

1. Introduction

Nous avons énoncé précédemment qu'il n'existe pas à ce jour de méthode *in vivo* décrite dans la littérature vétérinaire permettant de prédire la nature minérale d'un calcul du BAUF sur la simple base de critères radiologiques.

Notre étude rétrospective a ainsi pour objectif de déterminer la place de différents critères radiologiques des calculs du BAUF dans la prédiction de leur nature minérale. Nous essaierons donc de mettre en évidence des corrélations entre la présence de caractéristiques urolithiques visibles à la radiographie et évoqués dans la littérature vétérinaire et la nature minérale des urolithes en question après analyse spectrophotométrique.

Pour ce faire, un arbre de décision basé sur de l'apprentissage automatique (ou machine learning = ML) sera créé. Ce dernier permettra dans un premier temps d'étudier chaque caractéristique radiographique séparément. Puis, il permettra au lecteur de le guider étape par étape jusqu'au diagnostic présumé de la nature minérale du calcul en question à partir des caractéristiques du calcul qu'il souhaite étudier. Il permettra par ailleurs de classer les caractères radiographiques selon leur potentiel prédictif.

Nous espérons qu'à l'issue de cette étude, il sera possible, ou du moins plus aisé, pour tout vétérinaire, de choisir la prise en charge la plus adaptée à chaque cas de calculs du BAUF.

2. Matériels et méthodes

A. Définition de la population étudiée : critères d'inclusion et d'exclusion

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'ensemble des chats ayant subi une cystotomie au Centre Hospitalier Universitaire Vétérinaire d'Alfort (ChuvA) pour cause de lithiase vésicale ou urétrale entre avril 2013 et janvier 2023. Ces chats pouvaient être présentés au sein de différents services et présentaient des signes cliniques classiques de lithiases obstructives ou non obstructives tels que de la dysurie, de la pollakiurie, de la périurie, de la strangurie et parfois une insuffisance rénale aiguë nécessitant une stabilisation par traitement médical dans un premier temps.

La recherche et la sélection des cas a été réalisée sur le logiciel Clovis®, logiciel informatique commun aux quatre Ecoles Nationales Vétérinaires Françaises, dont l'Ecole Nationale

Vétérinaire d'Alfort (EnvA), qui permet de recenser la totalité des cas vus au ChuvA au cours des dernières années (consultations, examens complémentaires, traitements, ...).

Les données utilisées dans notre travail proviennent d'une part des comptes rendus qui s'y trouvent, rédigés par les étudiants et validés par les cliniciens et, d'autre part, des données d'un laboratoire extérieur à l'EnvA qui a réalisé les analyses spectrophotométriques des calculs.

Nous avons utilisé la fonction recherche du logiciel Clovis® en filtrant les résultats correspondant aux caractères suivants : « chat », « cystotomie », « urolithe », « urolithiase », « calcul », chacun de ces mots ayant par la suite été refiltré au pluriel. Pour ces critères 106 chats ont été retrouvés sur la période étudiée. Parmi eux 48 chats présentaient des analyses spectrophotométriques directement indexées sur clovis et 58 n'en avaient pas. Celles-ci ont alors été demandées directement au Pr. MAUREY-GUENEC qui a pu en retrouver 50. Parmi les 8 manquants, les analyses n'ont souvent pas été envoyées.

Six cas furent exclus de l'étude car les urolithes concernaient le haut appareil urinaire uniquement. Neufs autres cas ont été exclus car le diagnostic a été réalisé par échographie uniquement dans 8 cas et au scanner dans un seul cas. Enfin 6 autres cas ont été exclus car les calculs n'ont pas pu être visualisés à la radiographie. Ces derniers seront tout de même inclus dans la discussion.

Un total de 77 chats présentant des calculs du BAU sur la période étudiée et traités par cystotomie précédée de radiographie dont les analyses spectrophotométriques des calculs retirés sont disponibles. Ces 77 chats sont inclus dans notre étude.

La population à laquelle nous souhaiterions inférer nos résultats est l'ensemble des chats atteints de calculs du BAU dont le traitement nécessite à priori une chirurgie.

B. Méthodologie

Dans un premier temps nous avons analysé les clichés radiographiques réalisés en amont du retrait des calculs à l'aide du logiciel Horos® entre juin 2023 et août 2023.

Nous avons analysé deux fois chaque image radiographique afin de minimiser le biais lié au manque d'expérience initial potentiellement associé à un gain de sensibilité de détection et à une amélioration du classement des calculs au cours de la phase analytique.

Chacun des chats inclus dans l'étude a eu au moins une radiographie abdominale de profil. Pour 17 chats seules des vues de profil étaient disponibles, pour les 60 restants des vues de face et de profil étaient disponibles.

Les données ont été répertoriées au sein d'un tableur Excel® comportant deux feuilles de calcul. Pour chacune des deux feuilles une ligne correspond à un animal. Les tableurs sont représentés en annexe 1.

Dans la première feuille de calculs les colonnes font état de :

- nom des propriétaires
- numéro de dossier Clovis® des chats de l'échantillon
- date de la cystotomie
- nature et proportion des différents minéraux qui composent les urolithes de chaque chat.

Les natures minérales des calculs inclus sont les CaOx (qui comprennent les CaOx mono et dihydratés), les PAM, les urates (qui comprennent les urates d'ammonium, de potassium et de sodium), les apatites, les calculs de protéines ainsi que les calculs mixtes.

Un calcul était considéré comme mixte dès lors qu'il était composé de moins de 60% de son composé minéral majoritaire. Aucune distinction n'est réalisée entre les calculs mixtes et les calculs

mixtes structurées en couches car les couches n'étaient pas différenciées à l'analyse spectrophotométrique.

La seconde feuille recense d'une part les numéros de dossier Clovis® des chats de l'échantillon, les dates des radiographies précédant l'intervention chirurgicale, les vues disponibles pour chaque chat et enfin les caractéristiques radiologiques observées à l'analyse des différentes images radiographiques disponibles. Ainsi 8 critères y sont répertoriés : le nombre de calculs visualisés, leur localisation, la taille maximale du calcul le plus grand, leur forme, leur homogénéité, leur contour, leur bord et pour finir un rapport d'opacité entre celle du calcul le plus volumineux en son centre et celle de la partie caudale du corps vertébral de la 5^{ème} vertèbre lombaire (L5).

Pour chaque chat, une valeur unique était attribuée à chaque caractéristique.

Les analyses des images radiographiques ont été réalisées sans connaissance des résultats de l'analyse spectrophotométrique.

Suite à la collecte de ces données, l'écriture d'un programme de ML est réalisée. Une copie du code est présentée en annexe 2. Ce dernier a pour but d'étudier l'éventuelle existence de corrélations entre la nature minérale des calculs des chats de notre échantillon et leurs critères radiographiques puis d'analyser la pertinence de chaque critère dans une éventuelle prédiction de la nature minérale en déterminant pour chaque critère quantitatif étudié une valeur permettant une séparation optimale des différents calculs de notre échantillon. Enfin, il va nous permettre de déduire une combinaison et un ordre de critères à appliquer dans notre échantillon afin d'associer de manière optimale les différents calculs à leur nature minérale vraie. Ce procédé utilisera les corrélations précédemment établies .

Colaboratory® de Google research est le support utilisé pour coder le programme. Un langage Python® est utilisé. Les bibliothèques pandas®, numpy®, scikit-learn® et matplotlib® sont sollicitées dans le code.

Les données des tableurs Excel® sont importées dans le code et converties en données numériques utilisables pour du ML. Les résultats du programme entraîné par la totalité des valeurs de notre échantillon sont données sous forme d'arbres de décision et de matrices de confusion.

La matrice de confusion représente une comparaison entre le classement prédictif de la nature minérale du calcul analysé en fonction de ses caractéristiques radiographiques effectué par le programme, et le classement réel confirmé par analyse spectrophotométrique.

Elle admet donc sur ses lignes la nature minérale supposée des urolithes du chat et sur ses colonnes la nature minérale vraie du calcul dont le résultat est donné par l'analyse spectrophotométrique.

Un arbre de décision est représenté de la manière suivante : un critère est associé à une valeur seuil permettant une dichotomie à partir de laquelle sont construites les « branches ».

Il est possible de choisir différents paramètres tels que la taille de l'arbre en question ainsi que le nombre d'échantillon minimal accepté au sein d'une catégorie permettant la création d'une branche. Nous pouvons également choisir quelle caractéristique radiographique ou quelle association de caractéristiques nous décidons d'étudier. En faisant varier ces données nous obtenons différents résultats discutés ultérieurement et dont la présentation est effectuée au sein de la prochaine partie.

Pour les caractères quantitatifs, les chats dont le caractère analysé sur les images radiographiques à une valeur inférieure à la valeur seuil calculée par le programme sont classés d'un côté tandis que ceux dont le caractère analysé à une valeur supérieure à la valeur seuil sont classés de l'autre côté. Puis, sur chaque nouvelle « feuille », une nouvelle valeur seuil est calculée pour un nouveau ou pour le même caractère.

Pour les caractères qualitatifs, une valeur binaire est créée pour chacun d'entre eux, ce qui permet de les classer d'un côté de l'arbre si le chat présente ce caractère ou de l'autre si ce n'est pas le cas. Le chiffre 1 correspond à la présence du caractère et 0 correspond à son absence tout au long de l'étude.

Le caractère correspondant à la forme a été traité de manière particulière et chaque forme est traitée séparément et transformée en caractère binaire « présente la forme » (matérialisé par le chiffre 1 au sein d'un arbre) versus « ne la présente pas » (matérialisé par le chiffre 0 au sein d'un arbre). Chaque animal présente des calculs d'une unique forme. Cela permet de déterminer si une des dites formes présente une importance particulière dans la prédiction de la nature minérale étudiée et éventuellement pour un type minéral particulier.

En étudiant un arbre à une seule branche, après sélection de la caractéristique qui nous intéresse, le programme pourra déterminer une valeur optimale permettant la séparation des calculs de l'échantillon. A la lumière de cette valeur, nous pourrions essayer d'établir une corrélation entre un critère radiographique et un calcul de type minéral particulier. En effet, une fois cette valeur établie, nous pourrions étudier pour chaque type minéral de calcul une corrélation entre le pourcentage de calculs de la nature minérale d'intérêt classés d'un côté de la valeur estimée et celui de calculs de cette même nature minérale classés de l'autre côté de la valeur estimée.

Pour notre analyse statistique, nous supposons une absence de différence entre les pourcentages des calculs de chaque type minéral selon si le chat atteint est classé d'un côté ou de l'autre de la valeur optimale de séparation estimée par l'algorithme concernant la caractéristique étudiée.

Puis la significativité des résultats sera étudiée à l'aide d'un test statistique du Chi2 si ses conditions de validité sont remplies ou d'un test exact de Fisher notamment si un ou plusieurs des effectifs attendus est inférieur à 5 (Hsieh et al., 1998). Une significativité des résultats est considérée lorsque p est inférieur à 0.05.

Si l'on considère un arbre à plusieurs branches, la succession des classements du chat dont l'analyse des caractéristiques radiographiques est effectuée, d'un côté ou de l'autre d'une branche de l'arbre, permet *in fine* d'arriver à une supposition de la nature minérale qui prend en compte la totalité des caractéristiques qui nous intéressent.

L'algorithme classe les caractères par ordre d'importance de pouvoir prédictif. Ce pouvoir prédictif est quantifié par le programme avec une valeur comprise entre 0 et 1. La valeur maximale 1 étant : cette caractéristique seule permet une corrélation optimale entre la nature minérale vraie des urolithes des chats de l'échantillon et le classement effectué au sein de l'arbre construit et 0 étant cette caractéristique ne contribue pas à l'établissement d'une corrélation optimale entre la nature minérale vraie des urolithes de l'échantillon et le classement effectué au sein de l'arbre construit.

Au sein d'un arbre de décision les résultats se présentent de la manière suivante : la 1^{ère} ligne correspond au critère et à sa valeur estimée prise comme valeur seuil pour la réalisation de la dichotomie qui suit. La seconde ligne correspond à la valeur du gini-score noté « gini » dont l'interprétation est présentée ultérieurement. La troisième ligne est le nombre d'échantillons restants à ce stade dans la partie de l'arbre considérée. Enfin, la dernière ligne correspond à une matrice exprimant la proportion de chaque type minéral de calcul restant par rapport à la totalité des calculs initialement (soit 77 dans notre cas). L'ordre d'écriture de ces types minéraux est comme suit : calculs de CaOx, de PAM, d'urate, d'apatite, de protéines et mixtes.

Pour tout arbre de décision, la pertinence statistique des données est analysée à l'aide du F1-score et du Gini score.

Le F1-score est un score utilisé en ML permettant la pondération égale de la sensibilité, notée « recall » dans le code, et de la spécificité, notée « precision » dans le code. Ainsi le F1 score est calculé de la façon suivante :

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Sensibilité} \times \text{spécificité}}{\text{Sensibilité} + \text{spécificité}}$$

Ce score est compris entre 0 et 1, 1 correspondant à une sensibilité et une spécificité parfaites et 0 à des sensibilités et spécificités de 0%. (Hicks et al., 2022)

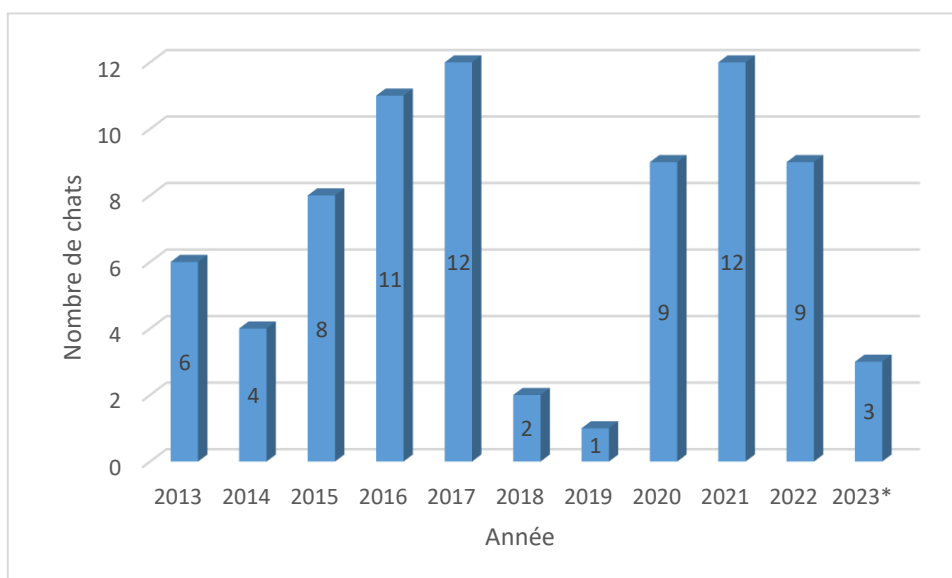
Le Gini score est un coefficient qui représente une séparation entre 2 critères, il représente la probabilité que le calcul d'un chat sélectionné au hasard dans une catégorie de l'arbre de décision obtenu soit classé dans la mauvaise branche de l'arbre de décision. Nous comprenons donc qu'il est compris entre 0 et 1, 1 correspondant à une classification incorrecte de tous les éléments de la catégorie et 0 correspondant à un classement parfait au sein de la catégorie au sein de l'arbre de décision. Il est représenté sur chacun des arbres de décision.

3. Résultats

A. Présentation de la population étudiée

Un total de 77 chats sujets à des calculs du bas appareil urinaire dont les analyses spectrophotométriques sont disponibles et traités par cystotomie précédée de clichés radiographiques ont été recensés au ChuvA sur la période d'avril 2013 à janvier 2023 (Figure 24)

Figure 24 : Nombre de chats atteints de calculs du BAUF et traités par cystotomie au ChuvA *Seul le mois de Janvier est inclus dans l'année 2023



Le nombre de chats présentant des urolithiases retirées par cystotomie dont les analyses spectrophotométriques sont disponibles est drastiquement plus faible en 2018 et en 2019. Cela est à mettre en relation avec une impossibilité de retrouver les analyses sur cette période. Par ailleurs, après une augmentation entre 2014 et 2015 le nombre de cas présenté semble relativement stable jusqu'à aujourd'hui.

B. Race, sexe, âge, nature minérale

Pour chaque critère épidémiologique recensé des intervalles de confiance (IC) à 95% sont calculées à l'aide des formules suivantes :

- En cas de pourcentage :

$$IC_{min} = p - 1.96 \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

$$IC_{max} = p + 1.96 \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

Avec p = le pourcentage observé dans l'échantillon, 1.96 = le degré de confiance à 95% et n = le nombre de chats dans notre population soit 77 dans notre étude.

- En cas de moyenne :

$$IC_{min} = m - 1.96 \sqrt{\frac{s^2}{n}}$$

$$IC_{max} = m + 1.96 \sqrt{\frac{s^2}{n}}$$

Avec m = la moyenne mesurée dans l'échantillon, 1.96 = le degré de confiance à 95%, s^2 la variance de l'échantillon et n le nombre de chats dans notre population soit 77 dans notre étude

Des biais statistiques sont à prendre en compte, à savoir des biais d'échantillonnage et des biais de mesure. Le biais d'échantillonnage est le protocole qui conduit à une sur ou sous-estimation systématique lors de la sélection des individus. Le biais de mesure est le fait que la technique de mesure va sur ou sous-estimer nos résultats.

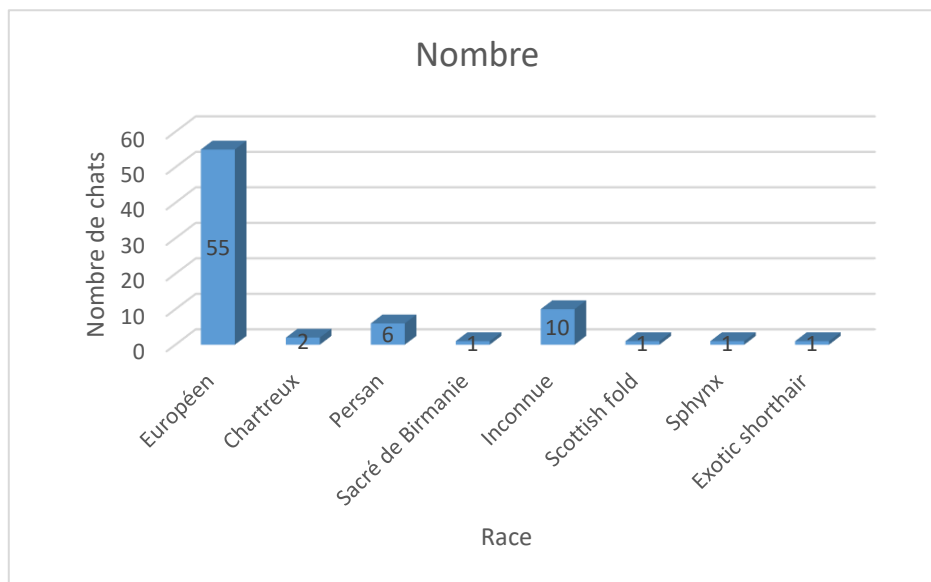
Sous réserve de l'absence de ces deux biais, nous pouvons affirmer qu'il y a 95 % de chances pour que, dans la population des chats français présentant des calculs du BAU *ayant été traités par cystotomie entre avril 2013 et janvier 2023*, notre paramètre étudié soit compris entre IC min et IC max.

a. Etude des races

- Répartition des races dans la population étudiée

Les races rencontrées sont recensées sur la figure 25. La race n'est pas connue pour 10 chats de l'étude.

Figure 25 : Répartition des races des chats incluses dans notre étude



Dans notre échantillon, 71% des chats sont des Européens (n=55) ce qui correspond à la grande majorité des chats étudiés. Les autres chats rencontrés sont des chats de race dont 7.8% de Persans (n=6) et 2.6% de chartreux (n=2). Les races du reste des chats de notre échantillon ne sont observées qu'une seule fois. Treize pourcent des races n'ont pas pu être retrouvées.

- Extension des résultats à la population cible

Les IC à 95% ont été calculés pour chaque race et présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Pourcentage estimé des races de chats dans la population cible

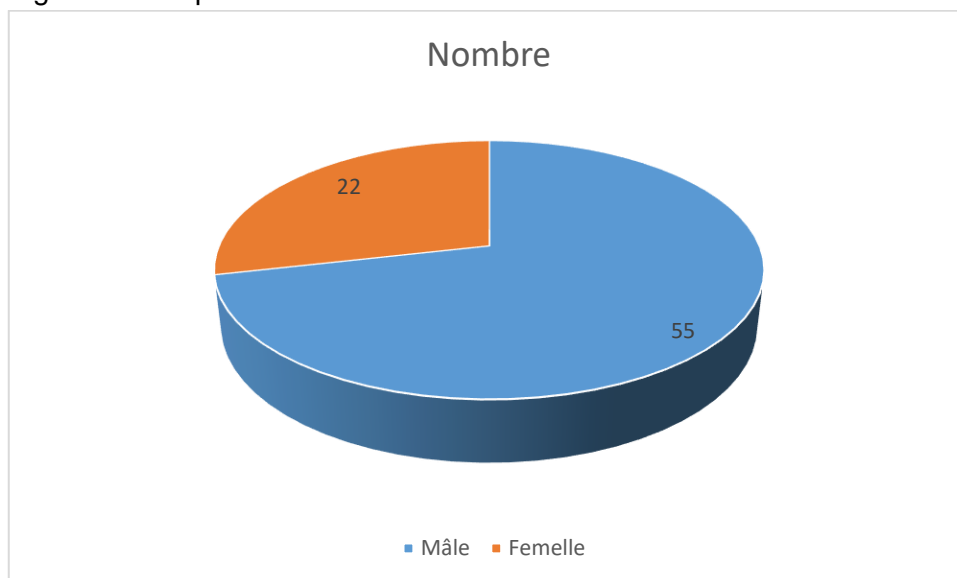
Race	Pourcentage estimé	IC min	IC max
Européen	71% (n = 55)	61%	81%
Persan	7.8% (n = 6)	1.8%	13.8%
Chartreux	2.6% (n = 2)	0%	6.1%
Sacré de Birmanie	1.3% (n = 1)	0%	3.8%
Scottish Fold	1.3% (n = 1)	0%	3.8%
Sphynx	1.3% (n = 1)	0%	3.8%
Exotic Shorthair	1.3% (n = 1)	0%	3.8%
Inconnue	13% (n = 10)	5.5%	20.5%

b. Etudes des sexes

- *Répartition des sexes dans la population étudiée*

Sur les 77 chats de la population étudiée 71% sont des mâles et 29% sont des femelles, ce qui montre une majorité des mâles dans la population d'étude. (Figure 26)

Figure 26 : Répartition des sexes des chats dans notre échantillon



- *Extension des résultats à la population cible*

Les IC à 95% ont été calculés pour chaque sexe et présentés dans le tableau 4

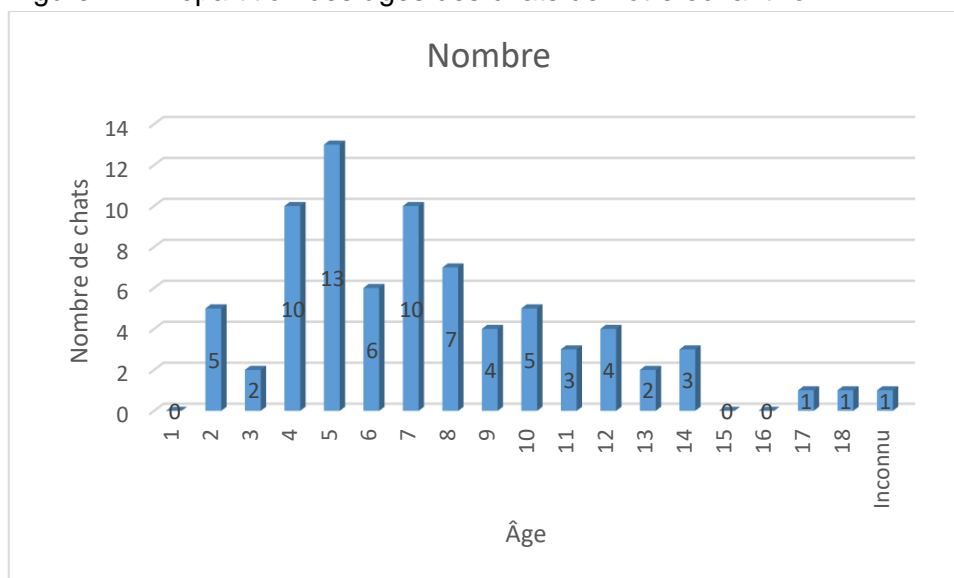
Tableau 4 : Pourcentage des races de chat de la population cible

Sexe	Pourcentage estimé	Ic min	IC max
Mâle	71% (n = 55)	61%	81%
Femelle	29% (n = 29)	19%	39%

c. Etude des âges

La répartition des âges des chats de notre étude est représentée sur la figure 27 pour un âge moyen de 7.2 +/- 0.79 ans. Un seul chat est d'âge inconnu.

Figure 27 : Répartition des âges des chats de notre échantillon



d. Etudes des natures minérales (sur la base de l'analyse spectrophotométrique) et extension à la population cible.

La répartition de la nature minérale des urolithes étudiés est recensée dans le tableau 5.

Tableau 5 : Répartition des âges des chats dans la population cible

Nature minérale	Nombre	Pourcentage estimé	IC min	IC max
CaOX	42	54%	43%	65%
PAM	27	35%	25%	45%
Urate	3	3.9%	0%	8.2%
Apatite	1	1.3%	0%	3.8%
Protéines	1	1.3%	0%	3.8%
Mixtes	3	3.9%	0%	8.2%

Les CaOx et les PAM sont majoritaires dans la population étudiée et représentent respectivement 54% (n=42) et 35% (n=27) des calculs du BAUF de l'échantillon. Environ 4% des calculs étudiés sont des calculs d'urate (n=3) et 4% sont des calculs mixtes (n=3). Le reste des types minéraux des calculs ne sont observés que chez un chat (apatite, protéines).

C. Etude des radio-opacités

Nous avons décidé dans notre expérience d'étudier l'existence d'une éventuelle association entre l'opacité des urolithes visualisés à la radiographie et leur nature minérale. Pour ce faire, l'opacité du

calcul de plus grande taille a été mesurée sur chaque radiographie et comparée à l'opacité du centre de la partie caudale du corps vertébral de L5. Une valeur de rapport d'opacité est alors calculée. Puis les valeurs obtenues sont intégrées dans notre algorithme afin de déterminer une valeur de ce rapport permettant la séparation optimale de la nature des urolithes de notre échantillon. Une fois cette valeur établie, une analyse statistique est réalisée afin d'étudier une éventuelle association statistique entre le rapport d'opacité calculé et la nature minérale du calcul en question. Cette analyse est réalisée pour les types minéraux de calculs du BAUF dont l'effectif est suffisamment élevé pour pouvoir être statistiquement analysés. Le test statistique utilisé dans ce but est le test du Chi-2.

La matrice de confusion obtenue après exécution du programme adapté pour l'étude du rapport des opacités des urolithes et de L5 est présentée sur la figure 28.

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 29.

Dans ce cas, l'algorithme propose de classer les calculs dont le rapport des opacités étudiée est supérieur à 0.858 dans la catégorie des calculs de CaOx. Ce classement s'accompagne d'un F1-score de 0.7. Ceux ne remplissant pas cette condition sont classés dans la catégorie des calculs de PAM avec un F1-score de 0.48.

Aucun classement n'est proposé pour les autres catégories de calcul.

Figure 28 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « rapport d'opacité »

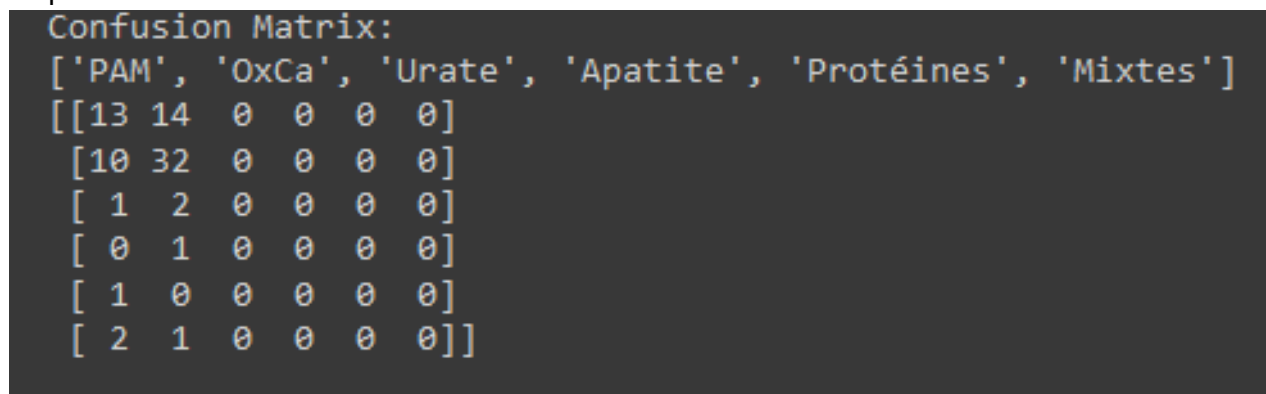
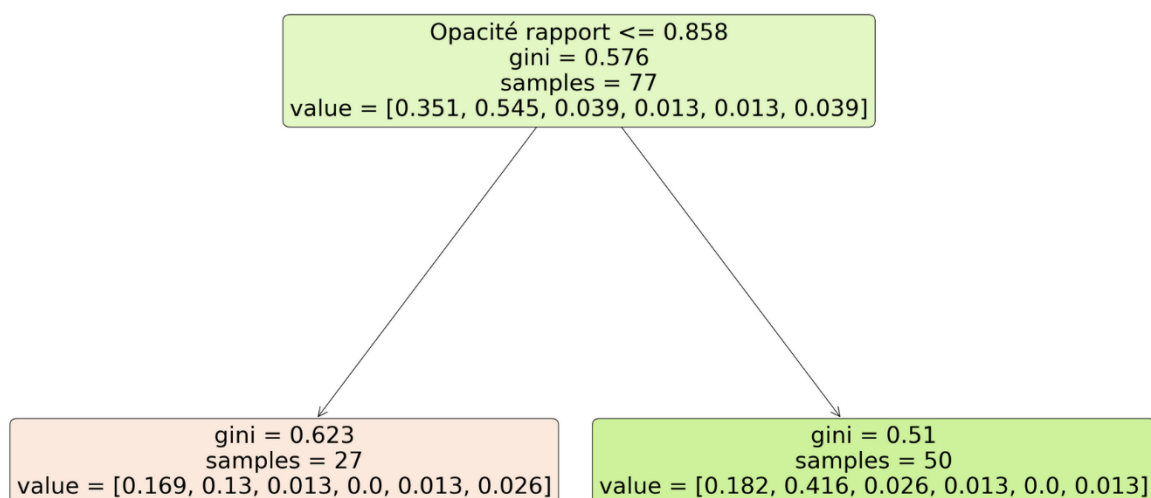


Figure 29 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « rapport d'opacité »



1. Etude pour les calculs de PAM :

On observe qu'en fixant une valeur de rapport arbitraire égale à 0.858, 48% des calculs de PAM (n=13) ont un rapport d'opacité inférieur à cette valeur et 52% ont un rapport d'opacité supérieur à cette valeur.

De plus on peut y voir que parmi l'ensemble des calculs dont le rapport d'opacité est inférieur à 0.858, 48% sont des calculs de PAM alors que pour l'ensemble des calculs dont le rapport d'opacité est supérieur à cette valeur seuls 28% sont des calculs de PAM.

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la valeur estimée par l'algorithme du rapport entre l'opacité du calcul de plus grande taille et celle de la partie caudale du corps vertébral de L5, valeur permettant une séparation optimale des urolithes du BAUF. »

La dite-valeur estimée par l'algorithme est ici 0.858.

Les résultats relatifs aux calculs de PAM sont affichés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « rapport d'opacité »

	Struvite (nombre)	Autre Calcul (nombre)	Total (nombre)	%Struvite
Rapport opacité < 0,858	13	14	27	48,14814815
Rapport opacité > 0,858	14	36	50	28
Total (nombre)	27	50	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats présentant un calcul dont le rapport d'opacité avec L5 est supérieur à 0.858 (48%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats présentant un calcul dont le rapport d'opacité avec L5 est inférieur à 0.858 (28%) ; $p = 0.077$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

2. Etude pour les calculs de CaOx :

Pour l'étude des calculs de CaOx le raisonnement est similaire. Ainsi 24% des calculs de CaOx ont une valeur de rapport d'opacité inférieur à 0.858 alors que 76% de ces mêmes calculs ont une valeur de rapport d'opacité qui y est supérieure.

Enfin, 64% des calculs dont l'opacité est supérieure à 0.858 sont des calculs de CaOx là où ils représentent 37% des calculs de la catégorie opposée.

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la valeur estimée par l'algorithme du rapport entre l'opacité du calcul de plus grande taille et celle de la partie caudale du corps vertébral de L5, valeur permettant une séparation optimale des urolithes du BAUF. »

La dite-valeur estimée par l'algorithme est ici 0.858.

Les résultats relatifs aux calculs de CaOx sont affichés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « rapport d'opacité »

	CaOx (nombre)	Autre calcul (nombre)	Total (nombre)	%CaOx
Rapport opacité < 0,858	10	17	27	37,03703704
Rapport opacité > 0,858	32	18	50	64
Total (nombre)	42	35	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous rejetons H0. Ainsi dans notre échantillon, le pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont le rapport d'opacité avec L5 est supérieur à 0.858 (64%) était significativement supérieur au pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont le rapport d'opacité avec L5 est inférieur à 0.858 (37%) ; $p = 0.02$.

Nous pouvons donc en conclure que sous l'hypothèse d'absence de biais d'association, chez les chats victimes de calculs du BAU, il y a des chances pour que le pourcentage de calculs de CaOx, parmi les chats présentant un calcul du BAU dont le rapport d'opacité avec L5 est supérieur à 0.858 soit réellement supérieur au pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont le rapport d'opacité avec L5 est inférieur à 0.858.

D. Taille maximale

Nous avons dans notre expérience décidé d'étudier l'existence d'une éventuelle association entre la taille des urolithes visualisés à la radiographie et leur nature minérale. Pour ce faire, la taille du calcul le plus grand a été mesuré sur chaque radiographie. Puis les valeurs obtenues sont intégrées dans notre algorithme afin de proposer une valeur permettant une séparation optimale de la nature des urolithes de notre échantillon. Une fois cette valeur établie, une analyse statistique étudiant une éventuelle association entre la taille des calculs du BAUF et leur nature minérale est réalisée pour les types minéraux de calculs dont l'effectif est suffisamment élevé pour pouvoir être analysés.

Le test statistique utilisé est le test du Chi-2.

La matrice de confusion obtenue après exécution du programme adapté pour l'étude de la taille des calculs est présentée sur la figure 30.

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 31.

Dans ce cas, l'algorithme propose de classer les calculs dont la taille est supérieure à 4.35 mm dans la catégorie des calculs de PAM. Ce classement s'accompagne d'un F1-score de 0.7. Ceux ne remplissant pas cette condition sont classés dans la catégorie des calculs de CaOx avec un F1-score de 0.8.

Aucun classement n'est proposé pour les autres catégories de calcul.

Figure 30 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « Taille Max »

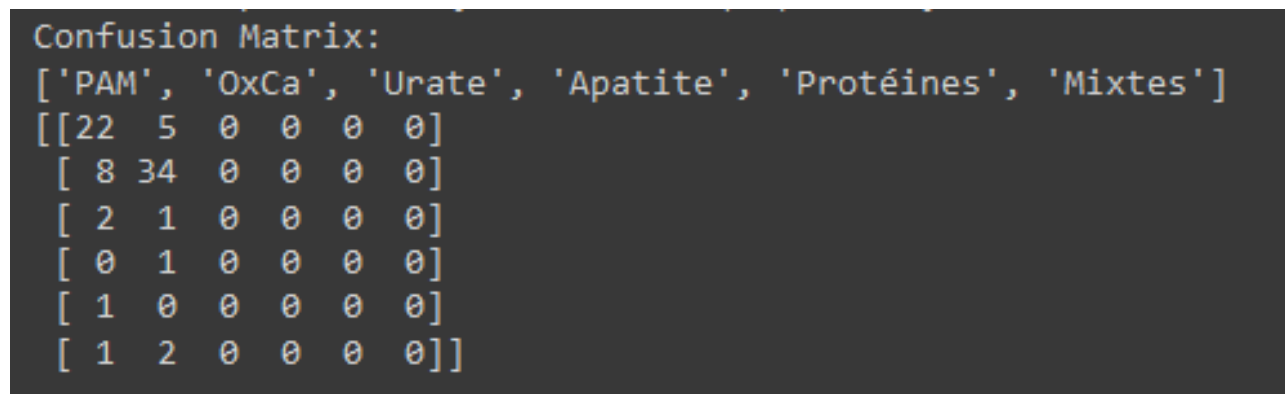
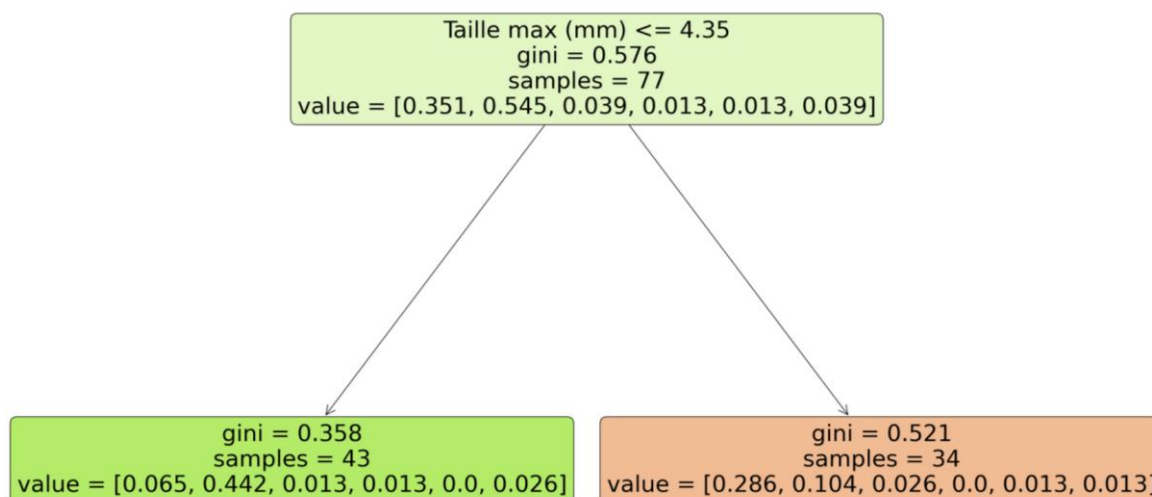


Figure 31 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « Taille Max »



1. Analyse des struvites :

On observe qu'en fixant une valeur de taille de calcul arbitraire égale à 4.35 mm, 18.5% des calculs de PAM (n=5) ont pour calcul du BAU le plus grand un calcul dont la taille maximale est inférieure à cette valeur et 81.5% ont pour calcul du BAU le plus grand un calcul dont la taille est supérieure à cette valeur. (n=22)

De plus on peut y voir que parmi l'ensemble des calculs dont la taille est inférieure à 4.35 mm, 12% sont des calculs de PAM alors que pour l'ensemble des calculs dont la taille est supérieure à cette valeur 65% sont des calculs de PAM.

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la valeur estimée par l'algorithme de la taille du calcul de plus grande taille permettant une séparation optimale des urolithes du BAUF. »

La dite-valeur estimée par l'algorithme est ici 4.35 mm.

Les résultats relatifs aux calculs de PAM sont affichés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « taille max »

	Struvite (nombre)	Autre Calcul (nombre)	Total (nombre)	%Struvite
Taille max <4,35 mm	5	38	43	11,62790698
Taille max > 4,35 mm	22	12	34	64,70588235
Total (nombre)	27	50	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test nous rejetons H0. Ainsi dans notre échantillon, le pourcentage de calculs de PAM parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille maximale est supérieure à 4.35 mm (65%) était significativement supérieur au pourcentage de calculs de PAM parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille maximale est inférieure à 4.35 mm (12%) ; $p = 1.2 \times 10^{-6}$.

Nous pouvons donc en conclure que, sous l'hypothèse d'absence de biais d'association, chez les chats victimes de calculs du BAU, il y a des chances pour que le pourcentage de calculs de PAM parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille du calcul de plus grande taille est supérieure à 4.35 mm soit réellement supérieur au pourcentage de calculs de PAM parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille du calcul de plus grande taille est inférieure à 4.35 mm.

2. Analyse des CaOx :

En suivant la méthode employée pour les calculs de PAM on remarque que 81% des calculs de CaOx (n=34) ont pour calcul du BAU le plus grand un calcul dont la taille maximale est inférieure à cette valeur et 19% ont pour calcul du BAU le plus grand un calcul dont la taille est supérieure à cette valeur. (n=8)

De plus on peut y voir que parmi l'ensemble des calculs dont la taille est inférieure à 4.35 mm, 79% sont des calculs de CaOx alors que pour l'ensemble des calculs dont la taille est supérieure à cette valeur 23% sont des calculs de CaOx.

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la valeur estimée par l'algorithme de la taille du calcul de plus grande taille permettant une séparation optimale des urolithes du BAUF. »

La dite-valeur estimée par l'algorithme est toujours estimée à 4.35 mm.

Les résultats relatifs aux calculs de CaOx sont affichés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « taille max »

	CaOx (nombre)	Autre calcul (nombre)	Total (nombre)	%CaOx
Taille max <4,35 mm	34	9	43	79,0697674
Taille max > 4,35 mm	8	26	34	23,5294117
Total (nombre)	42	35		6

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test nous rejetons H0. Ainsi dans notre échantillon, le pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille maximale est supérieure à 4.35 mm (23%) était significativement inférieur au pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille maximale est inférieure à 4.35 mm (79%) ; $p = 1.2E-6$.

Nous pouvons donc en conclure que sous l'hypothèse d'absence de biais d'association, chez les chats victimes de calculs du BAU, il y a des chances pour que le pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille du calcul de plus grande taille est supérieure à 4.35 mm soit réellement inférieur au pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont la taille du calcul de plus grande taille est inférieure à 4.35 mm.

E. Localisation

Un autre des critères radiographiques qui nous a intéressé dans notre étude est la localisation des différents urolithes au sein du BAUF. Pour cela nous avons défini 3 localisations qui découlent directement des différents segments anatomiques du BAUF.

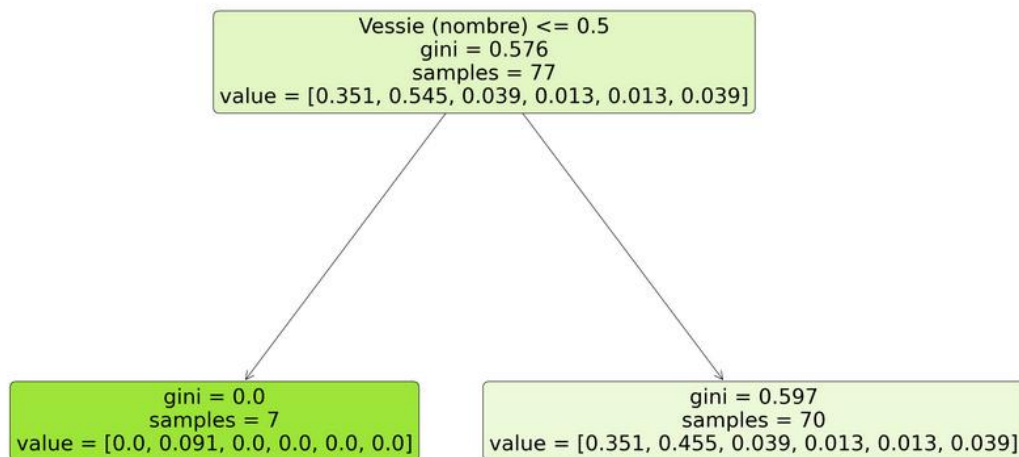
Ainsi les calculs visualisés au sein de la vessie ou sur l'aire de projection de la vessie en cas d'image radiographique unique sont classés dans la catégorie « vessie ». Ceux visualisés crânialement à la zone de projection de la prostate ou sur la zone de projection de la prostate sont classés dans la catégorie « urètre pelvien ». Enfin ceux dont la localisation est caudale aux localisations précédemment décrites sont classés dans la catégorie « urètre pénien »

Nous avons tout d'abord essayé d'étudier les différentes localisations séparément.

Toutefois, l'ensemble des parties anatomiques du BAUF étant en relation, il est cohérent d'étudier ces différentes localisations ensembles. Une seconde partie est donc consacrée à l'étude des 3 localisations au sein d'un même arbre de décision.

- Vessie

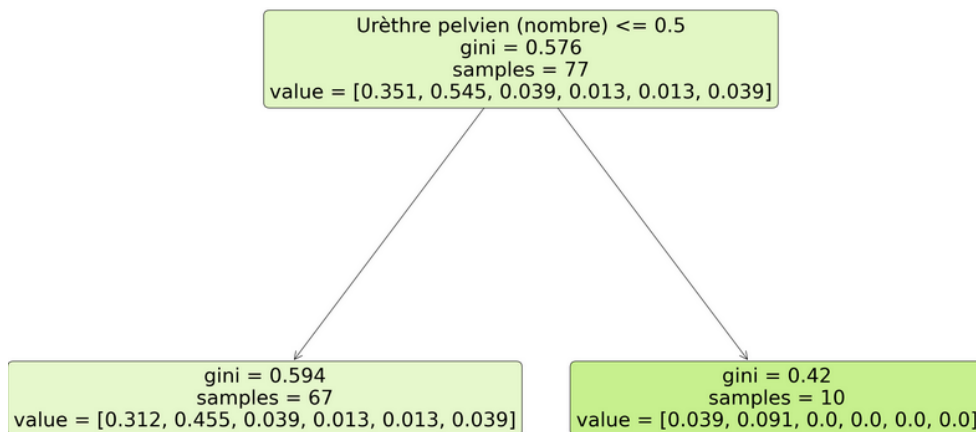
Figure 32 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « vessie »



Nous observons que 100% (n=7) des chats de l'échantillon qui n'ont pas de calcul dans la vessie sont des calculs de CaOx. (Figure 32)

- *Urètre pelvien*

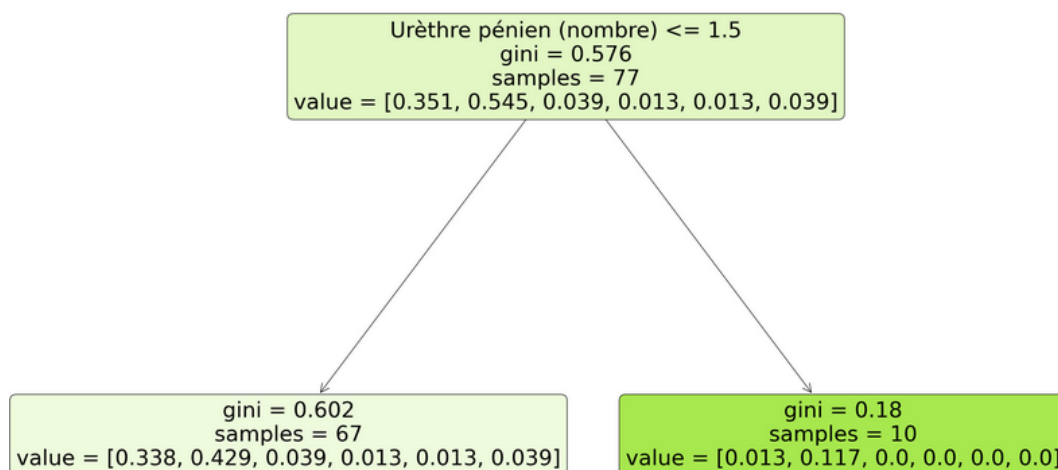
Figure 33 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « urètre pelvien »



Nous observons que dans notre échantillon 13% (n=10) des chats ont des calculs dans l'urètre pelvien. Parmi eux, 70% (n=7) sont des calculs de CaOx et les 30% restants (n=3) sont des calculs de PAM. (Figure 33)

- *Urètre pénien*

Figure 34 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « urètre pénien »



Dans notre échantillon 13% (n=10) des chats ont des calculs dans l'urètre pénien. Parmi eux, 90% (n=9) sont des calculs de CaOx. Les 10% restants(n=1) sont des calculs de PAM. (Figure 34)

En revanche l'algorithme classe la totalité des calculs parmi les calculs de CaOx quelle que soit la localisation étudiée.

F. Nombre total de calculs

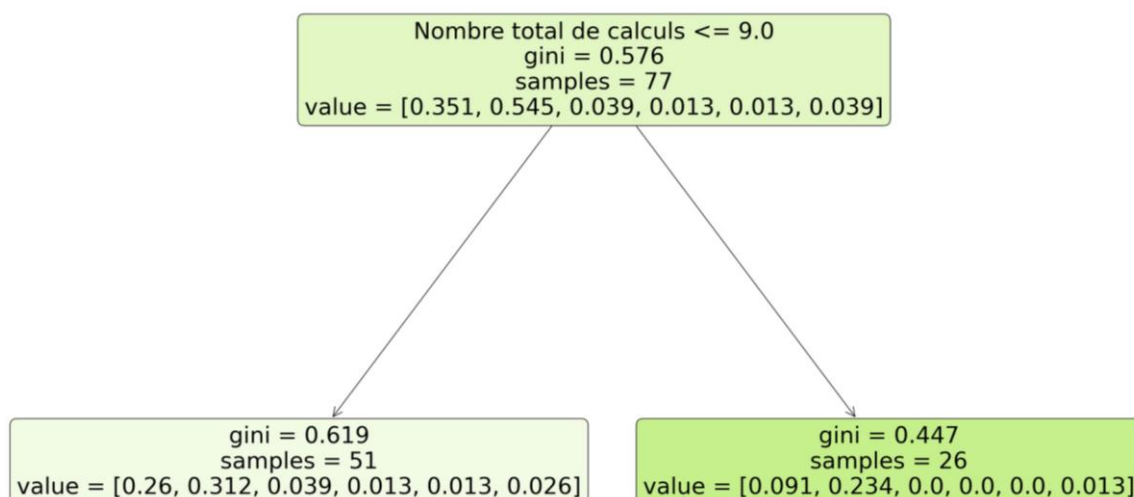
Le nombre de calculs au sein du BAUF peut être un des indicateurs du type minéral de lithiase urinaire chez le chat. Pour cela nous avons simplement compté le nombre de lithiases visualisées au sein du BAU sur les images radiographiques des chats de notre échantillon. Lorsque le nombre de calculs dépassait la dizaine, nous ne faisons plus de distinction. Par exemple un chat comptabilisant 10 calculs du BAU visualisés sur les images radiographiques de son abdomen sera dans la même catégorie qu'un chat pour lequel nous comptons 20 calculs sur les images radiographiques de son abdomen, cette catégorie est notée « nombre de calculs >10 » au sein du tableur Excel® qui recense les données de l'échantillon. Une fois toutes ces valeurs récupérées, elles sont intégrées dans notre algorithme afin de proposer une valeur permettant la séparation optimale de notre échantillon en fonction du nombre de calcul observé sur chaque chat. Une fois cette valeur établie, une analyse statistique étudiant une éventuelle association entre le nombre de calculs du BAUF et leur nature minérale est réalisée pour les types minéraux de calculs dont l'effectif est suffisamment élevé pour pouvoir être analysés.

Le test statistique utilisé est le test du Chi-2.

La matrice de confusion obtenue après exécution du programme adapté pour l'étude du nombre de calculs n'est pas présentée ici puisqu'elle ne proposait pas de classement des différents calculs.

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 35.

Figure 35 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « nombre total de calculs »



1. Analyse des struvites :

On constate que 74% des calculs de PAM (n=20) ont un nombre de calculs dans le BAU inférieur à 9 et 26% en ont plus (n=7).

De plus on peut y voir que parmi les chats ayant moins de 9 calculs, 39% sont des calculs de PAM alors que pour les chats ayant plus de 9 calculs, 27% sont des calculs de PAM.

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la valeur estimée par l'algorithme du nombre de calcul permettant une séparation optimale des urolithes du BAUF. »

La dite-valeur estimée par l'algorithme est ici 9.

Les résultats relatifs aux calculs de PAM sont affichés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « nombre de calculs »

	Struvite (nombre)	Autre Calcul (nombre)	Total (nombre)	%Struvite
Nombre de calculs <9	20	31	51	39,21568627
Nombre de calculs >9	7	19	26	26,92307692
Total (nombre)	27	50	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant plus de 9 calculs du BAU (27%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant moins de 9 calculs du BAU (39%) ; p = 0.28.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

2. Analyse des CaOx :

En suivant la méthode employée pour les calculs de PAM on remarque que 57% des calculs de CaOx (n=24) ont moins de 9 calculs dans le BAU, ainsi 43% en ont plus de 9. (n=18)

De plus on peut y voir que parmi les chats ayant moins de 9 calculs dans le BAU, 47% sont des calculs de CaOx alors que parmi les chats qui en ont plus de 9, 69% sont des calculs de CaOx.

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la valeur estimée par l'algorithme du nombre de calculs du permettant une séparation optimale des urolithes du BAUF. »

La dite-valeur estimée par l'algorithme est toujours estimée à 9.

Les résultats relatifs aux calculs de CaOx sont affichés dans le tableau 11.

Tableau 11 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « nombre de calculs »

	CaOx (nombre)	Autre calcul (nombre)	Total (nombre)	%CaOx
Nombre de calculs <9	24	27	51	47,0588235
Nombre de calculs >9	18	8	26	69,2307692
Total (nombre)	42	35		

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant plus de 9 calculs du BAU (69%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant moins de 9 calculs du BAU (47%) ; $p = 0.06$. Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

G. Etude des contours des urolithes

Les contours des urolithes sont décrits comme une aide à la prédiction de la nature minérale des urolithes du BAUF. Il est possible d'étudier indépendamment leur régularité ainsi que leur forme.

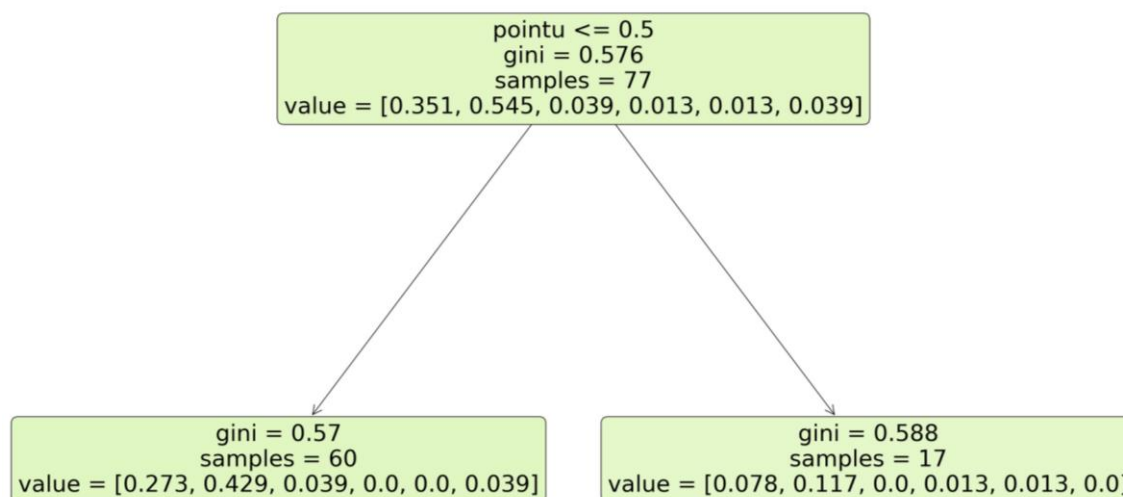
- *Etude de la forme des contours*

La forme de contours de calculs « pointus » est opposée à la forme de contours des calculs « lisses ». Dans notre échantillon, 22% des calculs de PAM (n=6) ont des contours pointus contre 21% des calculs de CaOx (n=9). Aussi, parmi les calculs de l'échantillon qui présentent des contours pointus 52% sont des calculs de CaOx et 35% sont des calculs de PAM.

La matrice de confusion obtenue après exécution du programme adapté pour l'étude de la forme des contours des calculs n'est pas présentée ici puisqu'elle ne proposait pas de classement des différents calculs.

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 36.

Figure 36 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « pointu »



a. Analyse des calculs de CaOx :

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la visualisation de contours pointus de ces mêmes urolithes. ».

Les résultats relatifs aux calculs de CaOx sont affichés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « forme pointue »

	CaOx (nombre)	Autre calcul (nombre)	Total (nombre)	%CaOx
Pas pointu	33	27	60	55
Pointu	9	8	17	52,94117647
Total (nombre)	42	35	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs pointus (53%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats n'ayant pas de calculs pointus (55%) ; p = 0.88.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

b. Analyse des calculs de PAM :

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la visualisation de contours pointus de ces mêmes urolithes. ».

Les résultats relatifs aux calculs de PAM sont affichés dans le tableau 13.

Tableau 13 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « forme pointue »

	Struvite (nombre)	Autre Calcul (nombre)	Total (nombre)	%Struvite
Pas pointu	21	39	60	35
Pointu	6	11	17	35,29411765
Total (nombre)	27	50	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs pointus (35%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats n'ayant pas de calculs pointus (35%) ; $p = 0.98$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

- *Régularité des contours*

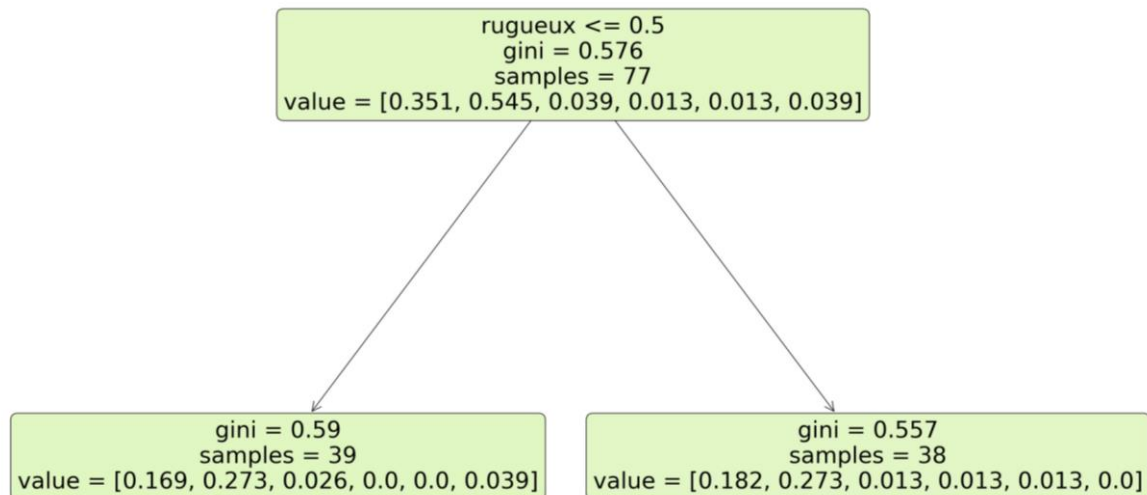
Les deux catégories étudiées pour évaluer la régularité des contours sont les calculs de contours « rugueux » opposés à ceux de contours « lisses ».

Dans notre échantillon, 52% des calculs de PAM (n=14) ont des contours rugueux contre 33% des calculs de CaOx (n=14). Aussi, parmi les calculs de l'échantillon qui présentent des contours rugueux 55% sont des calculs de CaOx et 37% sont des calculs de PAM.

La matrice de confusion obtenue après exécution du programme adapté pour l'étude de la forme des contours des calculs n'est pas présentée ici puisqu'elle ne proposait pas de classement des différents calculs.

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 37.

Figure 37 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « rugueux »



a. Analyse des calculs de CaOx :

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la visualisation de contours rugueux de ces mêmes urolithes. ».

Les résultats relatifs aux calculs de CaOx sont affichés dans le tableau 14.

Tableau 14 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « forme rugueuse »

	CaOx (nombre)	Autre calcul (nombre)	Total (nombre)	%CaOx
Pas rugueux	21	18	39	53,84615385
Rugueux	21	17	38	55,26315789
Total (nombre)	35	42	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs rugueux (55%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats n'ayant pas de calculs rugueux (54%) ; p = 0.90.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

b. Analyse des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la visualisation de contours rugueux de ces mêmes urolithes. ».

Les résultats relatifs aux calculs de PAM sont affichés dans le tableau 15.

Tableau 15 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « forme rugueuse »

	Struvite (nombre)	Autre Calcul (nombre)	Total (nombre)	%Struvite
Pas rugueux	13	26	39	33,33333333
Rugueux	14	24	38	36,84210526
Total (nombre)	27	50	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs rugueux (37%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats n'ayant pas de calculs rugueux (33%) ; $p = 0.74$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

H. Etude de l'homogénéité du plus gros calcul

L'homogénéité des calculs est évaluée au sein du calcul de plus grande taille visible aux images radiographiques. Deux catégories s'opposent dans cette analyse : calcul de contenu homogène versus calcul de contenu hétérogène. Cette évaluation est subjective mais, à l'instar de l'ensemble des analyses des images radiographiques, toujours réalisée par le même observateur. On observe dans notre échantillon que 55% des calculs de PAM ($n=15$) ont un contenu homogène contre 79% des calculs de CaOx ($n=33$). Aussi, parmi les calculs de l'échantillon qui présentent un contenu homogène, 62% sont des calculs de CaOx et 28% sont des calculs de PAM.

La matrice de confusion obtenue après exécution du programme adapté pour l'étude du contenu des calculs est présentée sur la figure 38.

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 39.

Dans ce cas, l'algorithme propose de classer les calculs dont le contenu est homogène dans la catégorie des calculs de PAM. Ce classement s'accompagne d'un F1-score de 0.47. Ceux dont le contenu est hétérogène sont classés dans la catégorie des calculs de CaOx avec un F1-score de 0.7.

Aucun classement n'est proposé pour les autres catégories de calcul.

Figure 39 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « homogène »

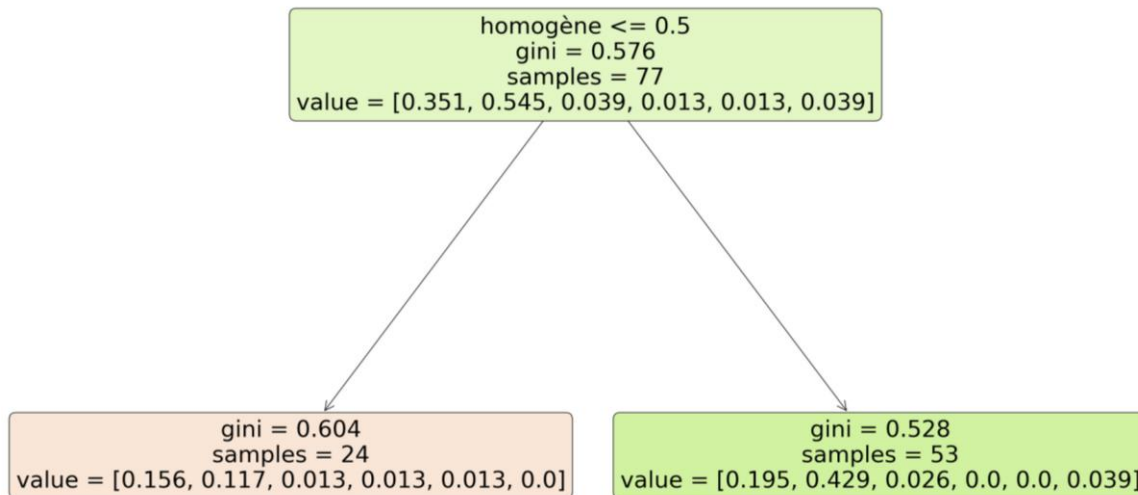


Figure 38 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « homogène »

```

Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[12 15  0  0  0  0]
 [ 9 33  0  0  0  0]
 [ 1  2  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 0  3  0  0  0  0]]
    
```

a. Analyse des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et l'homogénéité du contenu du calcul de plus grande taille. »

Les résultats relatifs aux calculs de CaOx sont affichés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « contenu homogène »

	CaOx (nombre)	Autre calcul (nombre)	Total (nombre)	%CaOx
Homogène	33	20	53	62,26415094
Hétérogène	9	15	24	37,5
Total (nombre)	42	35	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test nous rejetons H0. Ainsi dans notre échantillon, le pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU de contenu homogène (62%) était significativement supérieur au pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU de contenu hétérogène (37.5%) ; $p = 0.04$.

Nous pouvons donc en conclure que sous l'hypothèse d'absence de biais d'association, chez les chats victimes de calculs du BAU, il y a des chances pour que le pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont le contenu est homogène soit réellement supérieur au pourcentage de calculs de CaOx parmi les chats présentant un calcul du BAU dont le contenu est hétérogène.

b. Analyse des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et l'homogénéité du contenu du calcul de plus grande taille. »

Les résultats relatifs aux calculs de PAM sont affichés dans le tableau 17.

Tableau 17 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « contenu homogène »

	Struvite (nombre)	Autre Calcul (nombre)	Total (nombre)	%Struvite
Homogène	15	38	53	28,30188679
Hétérogène	12	12	24	50
Total (nombre)	27	50	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont le contenu est homogène (28%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs de contenu hétérogène (50%) ; $p = 0.06$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

I. Etude de la forme des calculs

Afin d'étudier la forme des calculs, nous les avons classés en 7 catégories distinctes : bosselé, rond, facetté, ovoïde, irrégulier, spiculé et pyramidal. Chaque chat est alors classé comme ayant des calculs d'une unique catégorie. Nous avons décidé d'analyser tout d'abord chaque forme séparément puis dans un second temps nous les comparerons les unes aux autres.

Les formes des différents calculs sont récapitulés dans le tableau 18.

Tableau 18 : Répartition des formes des calculs en fonction de leur nature minérale

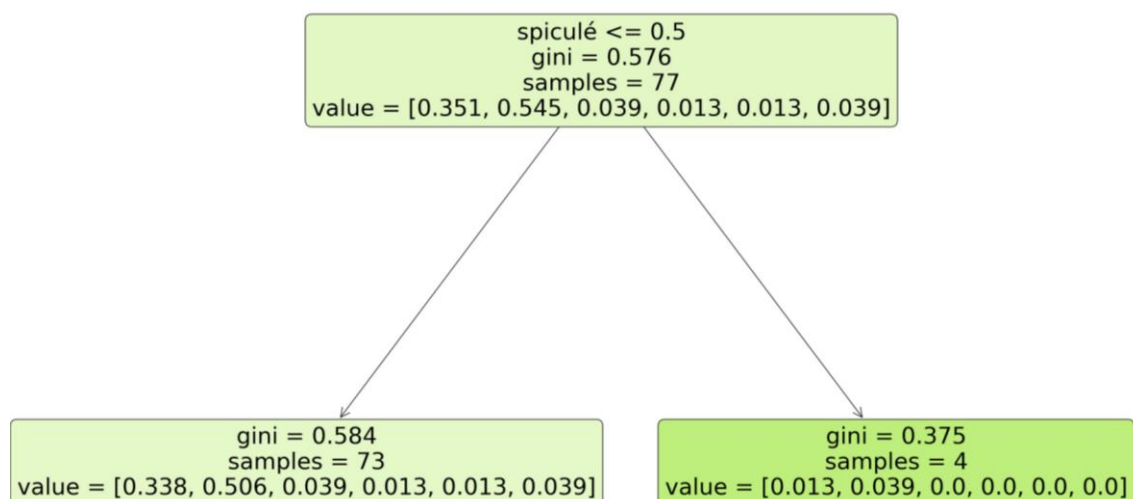
Nature minérale	Spiculée	Ronde	Pyramidale	Ovoïde	Irrégulière	Facettée	Bosselée
%CaOx (n)	7 (3)	43 (18)	0	9.5 (4)	9.5 (4)	17 (7)	9.5 (4)
%PAM (n)	4 (1)	30 (8)	7.4 (2)	15 (4)	18 (5)	11 (3)	15 (4)
%Urate (n)	0	(2)	0	(1)	0	0	0
%Apatite (n)	0	0	0	0	(1)	0	0
%Protéines (n)	0	0	0	0	(1)	0	0
%Mixtes (n)	0	(1)	(1)	0	(1)	0	0

Nous observons que 38% des chats (n=29) présentent des calculs de forme ronde de différentes composition, 62% d'entre eux sont des calculs de CaOx (n=18), 28% des calculs de PAM (n=8), le reste sont des urates ou ponctuellement un calcul de composition mixte. Les autres formes de calculs se répartissent de manière plus ou moins équitable avec 16% de chats ayant des calculs de forme irrégulière (n=12), 13% de forme facetté (n=10), 12% de forme ovoïde (n=9) et 10% de forme bosselé (n=8). Enfin les formes spiculés et pyramidales sont les moins représentées avec respectivement 5% (n=4) et 4% (n=3) des formes de la totalité des calculs du BAUF.

- *Etude des calculs de forme spiculées*

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 40.

Figure 40 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « spiculé »



i. Etude des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAUF, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la forme spiculée des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H_0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme est spiculée (75%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas spiculée (53%) ; $p = 0.6$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

ii. Etude des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H_0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la forme spiculée des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

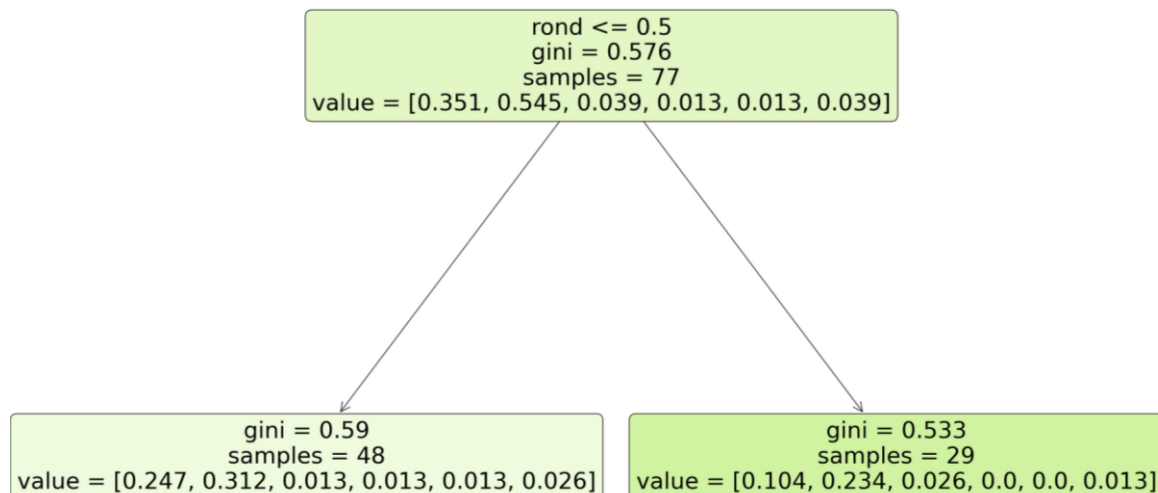
Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H_0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme est spiculée (25%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas spiculée (36%) ; $p = 1$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

- *Etude des calculs de forme ronde*

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 41.

Figure 41 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « rond »



i. Analyse des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H_0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la présence de calculs de forme ronde dans le BAUF. »

Les résultats relatifs aux calculs de CaOx sont affichés dans le tableau 19.

Tableau 19 : Répartition des calculs de CaOx et des autres calculs au sein de la catégorie « calculs de forme ronde »

	CaOx (nombre)	Autre calcul (nombre)	Total (nombre)	%CaOx
pas rond	24	24	48	50
rond	18	11	29	62,06896552
Total (nombre)	42	35	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs de forme ronde (62%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats n'ayant pas de calculs de forme ronde (50%) ; $p = 0.3$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

ii. Analyse des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et l'homogénéité du contenu du calcul de plus grande taille. »

Les résultats relatifs aux calculs de PAM sont affichés dans le tableau 20.

Tableau 20 : Répartition des calculs de PAM et des autres calculs au sein de la catégorie « calculs de forme ronde »

	Struvite (nombre)	Autre Calcul (nombre)	Total (nombre)	%Struvite
pas rond	19	29	48	39,58333333
rond	8	21	29	27,5862069
Total (nombre)	27	50	77	

Les individus de l'échantillon sont considérés comme indépendants et les effectifs attendus sous H0 sont tous supérieurs ou égaux à 5.

Les conditions de validité du test du Chi-2 sont donc vérifiées.

Suite à la réalisation de ce test, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs de forme ronde (28%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats n'ayant pas de calculs de forme ronde (40%) ; $p = 0.28$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

- Etude des calculs de forme pyramidale

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 42. La matrice de confusion qui y est associée est présentée en figure 43.

Figure 42 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « pyramidal »

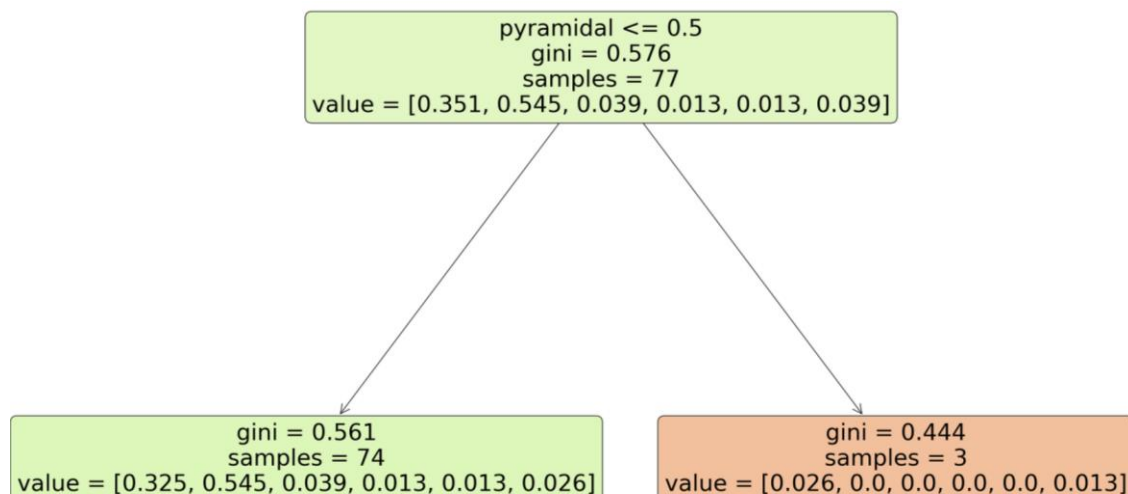


Figure 43 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « pyramidal »

```

Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[ 2 25  0  0  0  0]
 [ 0 42  0  0  0  0]
 [ 0  3  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 1  2  0  0  0  0]]
  
```

i. Etude des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la forme pyramidale des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme est pyramidale (0%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas pyramidale (56%) ; $p = 0.09$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

ii. Etude des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la forme pyramidale des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme est pyramidale (66%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas pyramidale (34%) ; $p = 0.28$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

- *Etude des calculs de forme ovoïde*

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 44. La matrice de confusion qui y est associée est présentée en figure 45

Figure 44 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « ovoïde ».

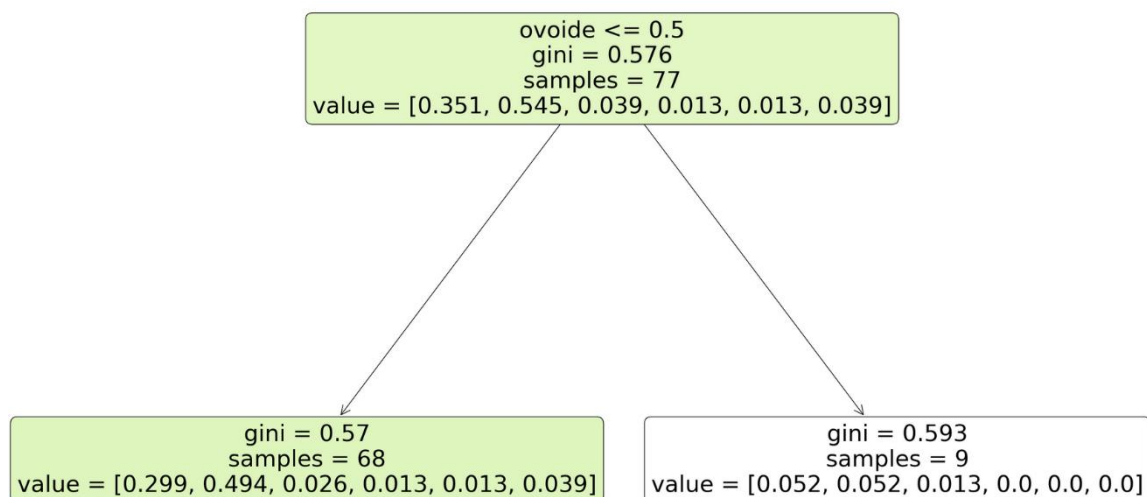


Figure 45 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « ovoïde »

```
Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[ 4 23  0  0  0  0]
 [ 4 38  0  0  0  0]
 [ 1  2  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 0  3  0  0  0  0]]
```

i. Etude des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la forme ovoïde des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme est ovoïde (44%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas ovoïde (56%) ; $p = 0.72$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

ii. Etude des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la forme ovoïde des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme est ovoïde (44%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas ovoïde (34%) ; $p = 0.71$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

- *Etude des calculs de forme irrégulière*

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 46. La matrice de confusion qui y est associée est présentée en figure 47.

Figure 46 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « irrégulier »

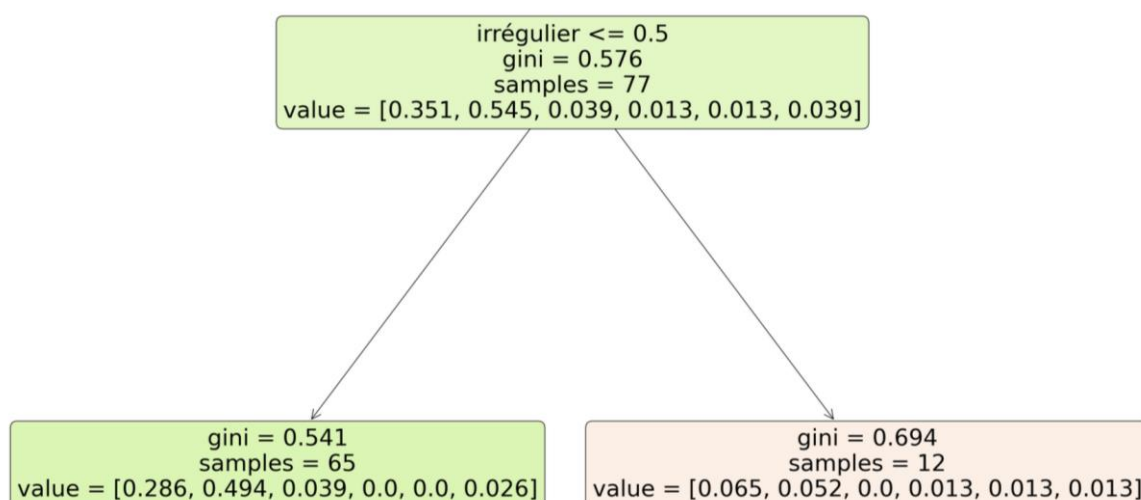


Figure 47 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « irrégulier »

```
Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[ 5 22  0  0  0  0]
 [ 4 38  0  0  0  0]
 [ 0  3  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 1  2  0  0  0  0]]
```

i. Etude des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la forme irrégulière des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme est irrégulière (33%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas irrégulière (58%) ; $p = 0.12$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

ii. Etude des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la forme irrégulière des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

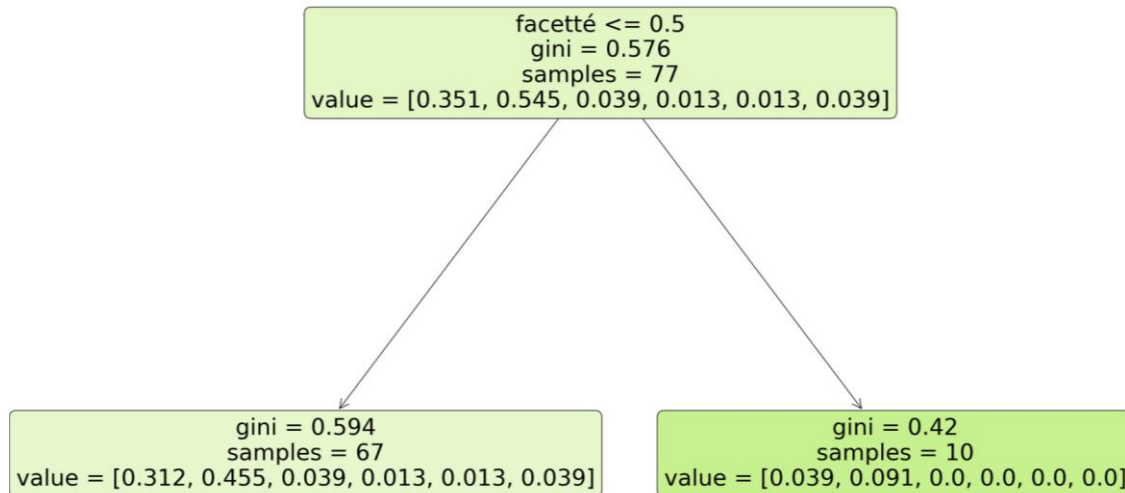
Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme est irrégulière (41%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas irrégulière (34%) ; $p = 0.74$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

- *Etude des calculs de forme facetté*

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 48.

Figure 48 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « facetté »



i. Etude des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la forme facettée des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme est facettée (70%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas facettée (52%) ; $p = 0.33$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

ii. Etude des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la forme facettée des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme est facettée (30%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas facettée (36%) ; $p = 1$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

- *Etude des calculs de forme bosselée*

L'arbre établi par le programme est présenté en figure 49. La matrice de confusion qui y est associée est présentée en figure 50.

Figure 49 : Arbre de décision après exécution du programme sur le paramètre « bosselé »

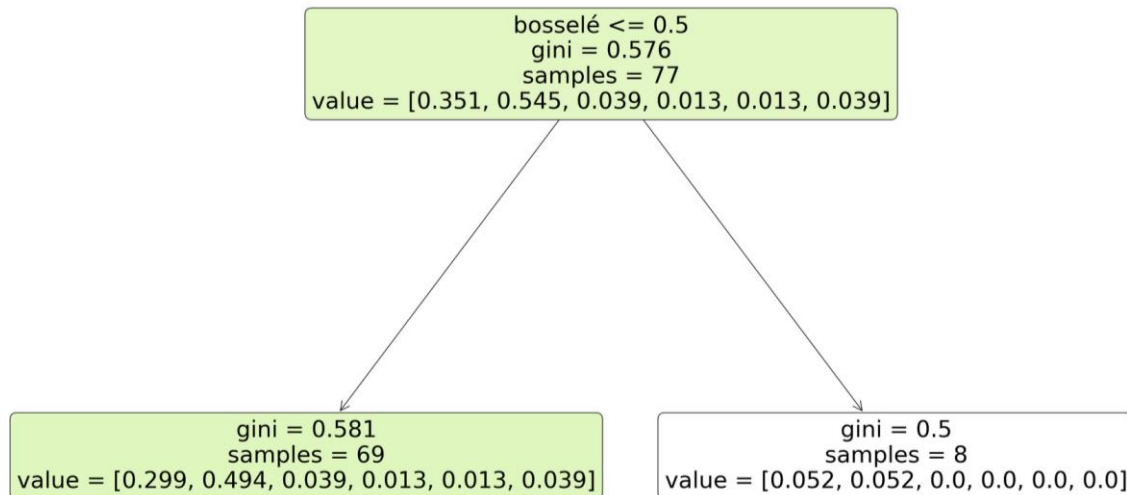


Figure 50 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur le paramètre « bosselé »

```

Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[ 4 23  0  0  0  0]
 [ 4 38  0  0  0  0]
 [ 0  3  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 0  3  0  0  0  0]]
  
```

i. Etude des calculs de CaOx

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de CaOx et la forme bosselée des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme est bosselée (50%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de CaOx parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas bosselée (55%) ; p = 1.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

ii. Etude des calculs de PAM

Notre hypothèse de départ H0 était : « Chez les chats victimes de calculs du BAU, il n'existe pas d'association réelle entre la présence de calculs de PAM et la forme bosselée des calculs. »

Les effectifs attendus pour la validité du test du Chi-2 sont inférieurs à 5, ce test statistique n'est donc pas applicable ici et nous avons alors décidé d'utiliser le test exact de Fischer.

Suite à la réalisation de celui-ci, nous acceptons H0 avec un risque d'erreur beta inconnu et pouvons en conclure que dans notre échantillon le pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme est bosselée (50%) n'était pas significativement différent du pourcentage de présence de calculs de PAM parmi les chats ayant des calculs dont la forme n'est pas bosselée (33%) ; $p = 0.44$.

Ces résultats nous empêchent de faire de l'inférence au niveau de la population cible.

J. Concordance de la nature minérale suspectée avec l'analyse spectrophotométrique après exécution du programme sur plusieurs caractères

a. Analyse des critères radiographiques qualitatifs non binaires

- *Etude des localisations anatomiques des calculs*

Nous nous sommes intéressés à l'étude des différentes localisations anatomiques des calculs du BAUF et à la mise en évidence d'une éventuelle corrélation entre ces localisations et la nature minérale des urolithes en question.

Les paramètres d'entrées de notre algorithme étaient les 3 localisations possibles citées précédemment. L'algorithme a alors construit un arbre à 3 branches dont les catégories étaient sélectionnées de manière à contenir au moins 3 chats dans chacune d'entre elles.

L'arbre de décision est présenté sur la figure 51.

La matrice de confusion associée est représentée dans la figure 52.

Figure 51 : Arbre de décision après exécution du programme sur les paramètres concernant la localisation des calculs du BAUF

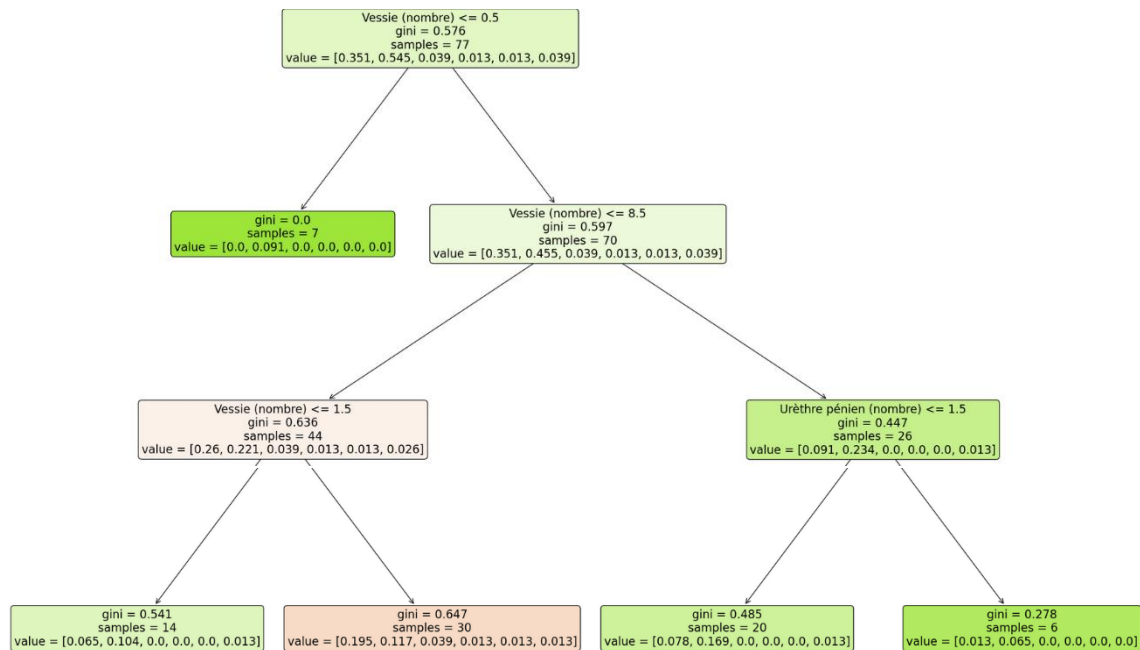
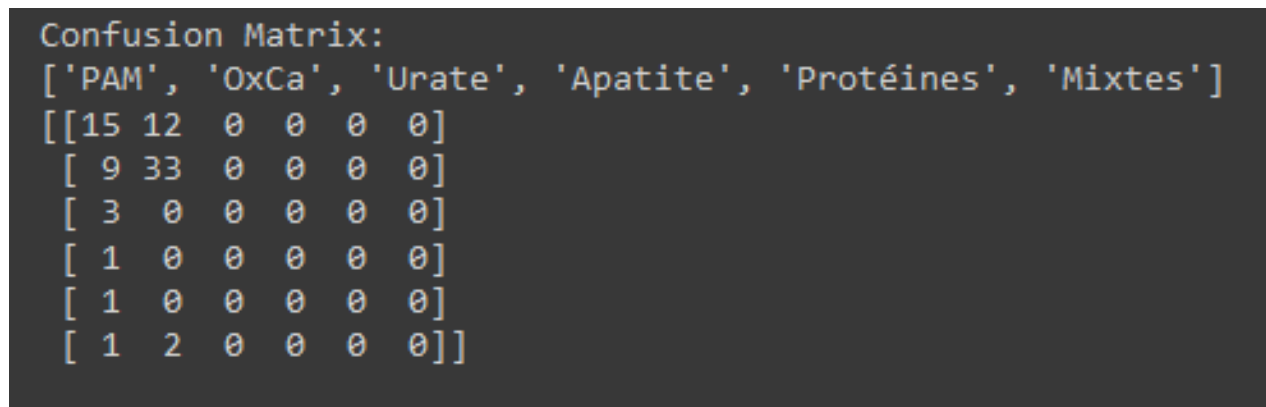


Figure 52 : Matrice de confusion brute après exécution du programme sur les paramètres concernant la localisation des calculs du BAUF



Nous observons qu'en appliquant l'arbre ainsi calculé à notre échantillon, 55% des calculs de PAM sont correctement classés (n=15, sensibilité = 0.55, spécificité = 0.53, F1 score = 0.53), 79% des calculs de CaOx sont correctement classés (n=33, sensibilité = 0.79, spécificité = 0.70, F1 score = 0.74), et 0% des autres ne le sont. Ce qui correspond ainsi à un classement correct de 62% (n=48) de la totalité des calculs du BAUF (F1 score = 0.59).

L'arbre ainsi construit classe les chats dont le nombre de calculs dans la vessie est compris entre 2 et 8 inclus comme étant atteints de calculs de PAM. Les autres chats sont tous classés comme atteints de calculs de CaOx.

- *Etude et comparaison de toutes les formes des calculs analysés*

Dans cette partie, nous avons comparé l'importance des différentes formes de calculs du BAUF pour l'établissement de la meilleure corrélation possible entre ces formes et la nature des urolithes étudiés.

Les paramètres d'entrées de notre algorithme sont les 7 formes analysées dans notre étude et permettent la formation d'un arbre à 3 branches dont les catégories sont sélectionnées de manière à contenir au moins 3 chats dans chacune d'entre elles.

L'arbre de décision présenté en figure 54 illustre ces résultats.

La matrice de confusion associée à cet arbre est représentée sur la figure 53.

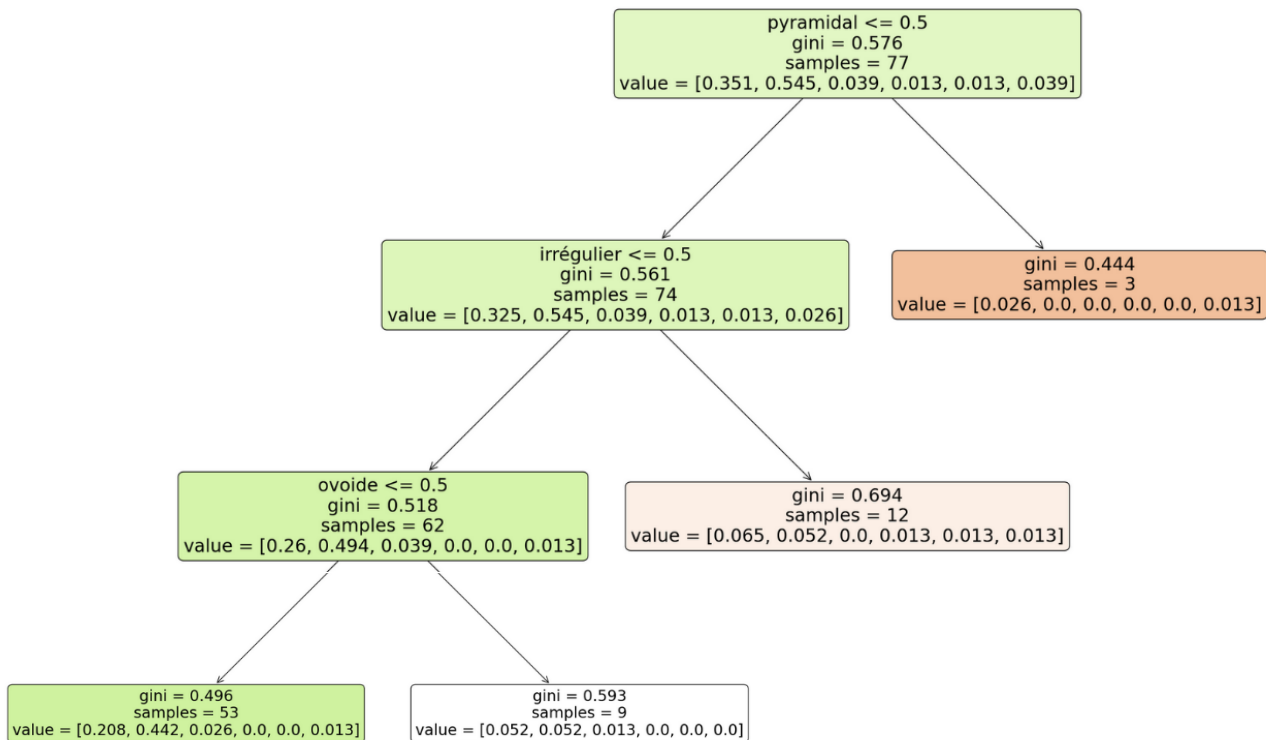
Figure 53: Matrice de confusion brute après exécution du programme sur les paramètres concernant la forme des calculs du BAUF

```
Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[11 16  0  0  0  0]
 [ 8 34  0  0  0  0]
 [ 1  2  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 2  1  0  0  0  0]]
```

En appliquant l'algorithme ainsi paramétré à notre échantillon nous obtenons 41% (n=11, sensibilité = 0.41, spécificité = 0.45, F1 score =0.43) des calculs de PAM qui sont bien classés, 81% (n=34, sensibilité = 0.81, spécificité = 0.64, F1 score =0.72) des calculs de CaOx qui sont bien classés et aucun autre type minéral de calcul. Ainsi cela correspond à 58% (n=45) de chats atteints de calculs classés dans la bonne catégorie parmi notre échantillon. (F1 score = 0.54)

L'arbre calculé classe les calculs pyramidaux, irréguliers et ovoïdes parmi les calculs de PAM et tous les autres parmi les calculs de CaOx.

Figure 54 : Arbre de décision après exécution du programme sur les paramètres concernant la forme des calculs du BAUF



b. Analyse de tous les critères radiographiques en même temps et construction d'un arbre de décision

Cette section a pour but de mettre en lien au sein de l'algorithme écrit tous les critères étudiés afin de déterminer un arbre qui établit une corrélation maximale entre les critères radiographiques des urolithes du BAUF étudiés et la nature minérale de ces mêmes urolithes.

Le premier exemple met en œuvre un arbre à 3 feuilles et dont l'échantillon minimal nécessaire au sein d'une catégorie pour qu'elle soit considérée par l'algorithme est de 3. Comme chaque exemple dans cette section, il est associé à une matrice de confusion ainsi qu'à des F1 scores et des gini score calculés pour déterminer une force de corrélation entre chaque critère et la nature minérale de chaque type de calcul ainsi que pour évaluer la confiance que nous pouvons avoir en la séparation de chaque branche de l'arbre de décision.

L'arbre de décision présenté en figure 55 illustre ces résultats.

La matrice de confusion associée à cet arbre est représentée sur la figure 56.

Dans cet arbre l'importance estimée des différentes caractéristiques radiographiques des calculs de l'échantillon dans la prédiction de leur nature minérale est comme suit :

- Taille max (mm) : participe à 63% de la prédiction,
- Le rapport des opacités entre celle du calcul le plus volumineux et la partie caudale du corps vertébral de L5 : participe à 32% de la prédiction,
- Forme irrégulière : participe à 5% de la prédiction,
- Contenu hétérogène : participe à 0.1% de la prédiction,
- Les autres critères ne participent pas à la prédiction

Figure 55 : Arbre de décision à 3 feuilles et au moins 3 échantillons pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude.

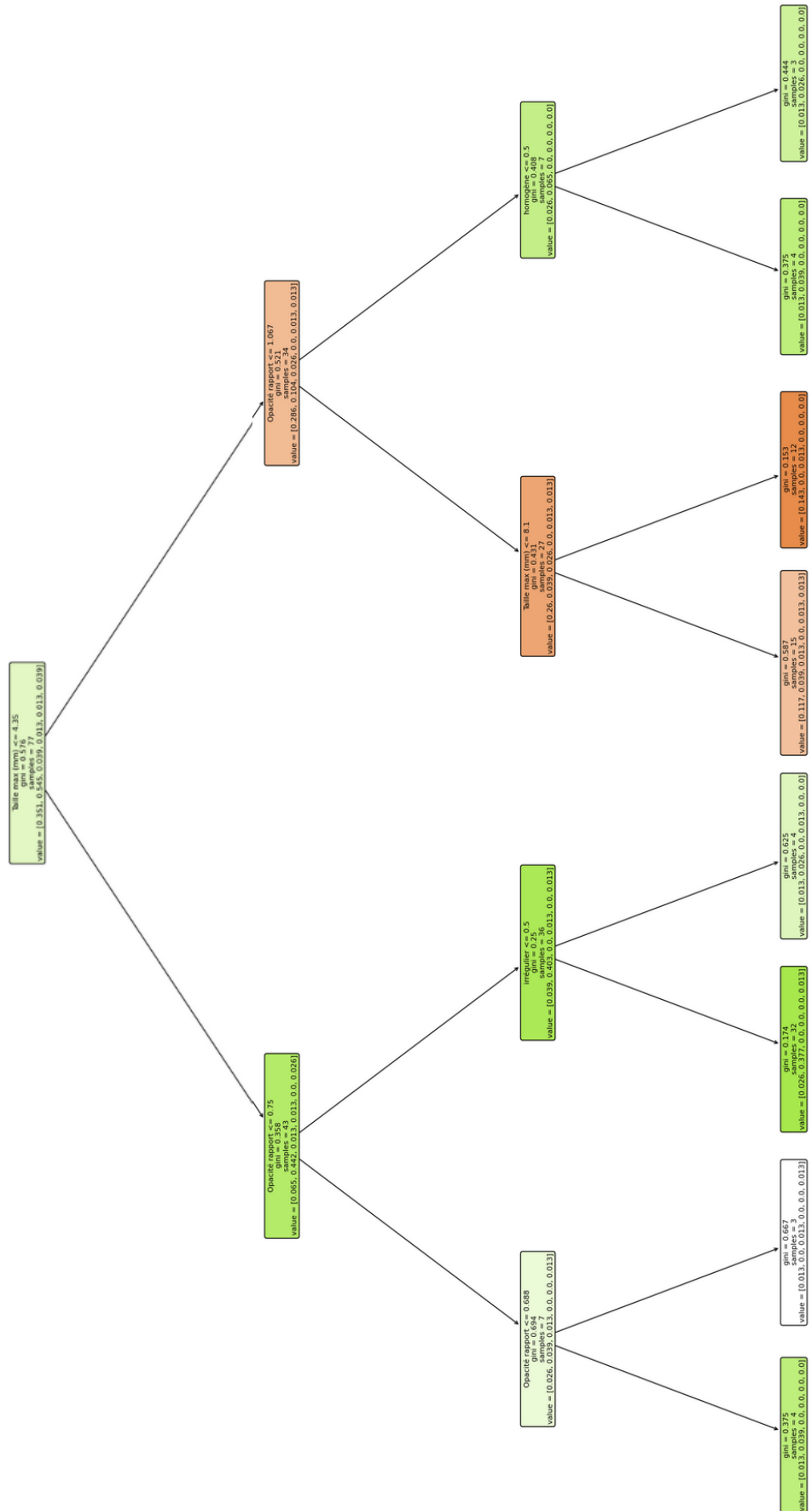


Figure 56 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 3 feuilles et au moins 3 échantillons pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude.

```

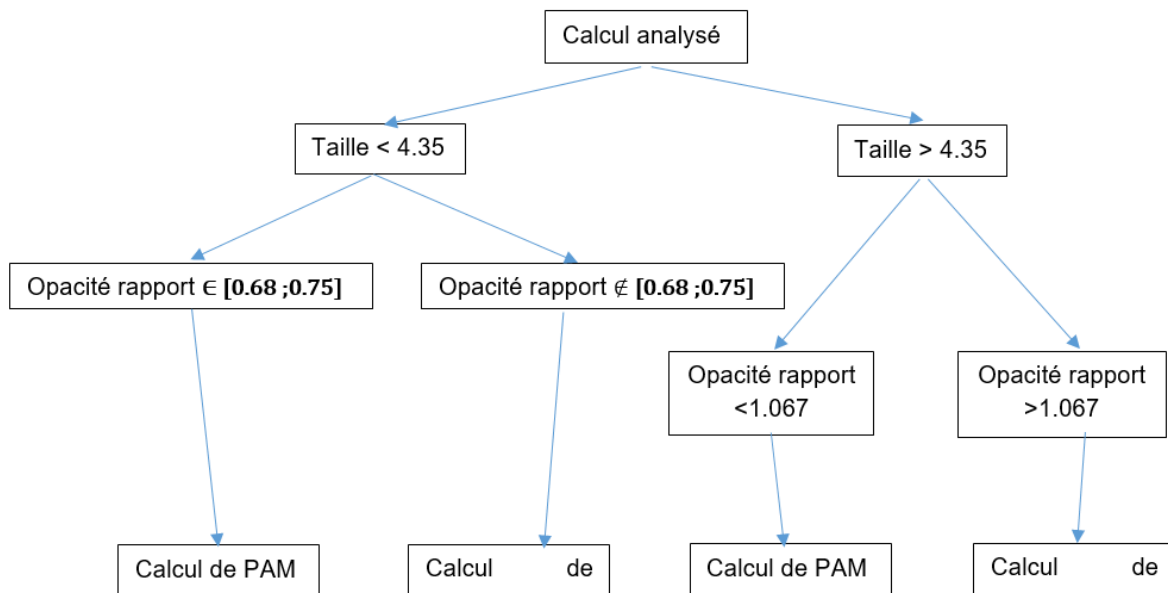
Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[21  6  0  0  0  0]
 [ 3 39  0  0  0  0]
 [ 3  0  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 2  1  0  0  0  0]]
    
```

Nous pouvons lire sur la matrice de confusion que, si l'on applique cet arbre à notre échantillon, nous classons correctement 21 calculs de PAM (sensibilité = 0.78, spécificité = 0.7, F1 score = 0.74) et 39 calculs de CaOx (sensibilité = 0.93, spécificité = 0.83, F1 score = 0.88) soit 78% des calculs au total (F1 score = 0.74).

Parmi les 22% d'erreurs 6 calculs de PAM sont classés en calculs de CaOx, 3 calculs de CaOx en calculs de PAM, 3 calculs d'urate en calculs de PAM, 1 calcul d'apatite en calculs de CaOx, 1 calcul de protéine en calcul de PAM et enfin 2 calculs mixtes en calculs de PAM et 1 en calcul de CaOx.

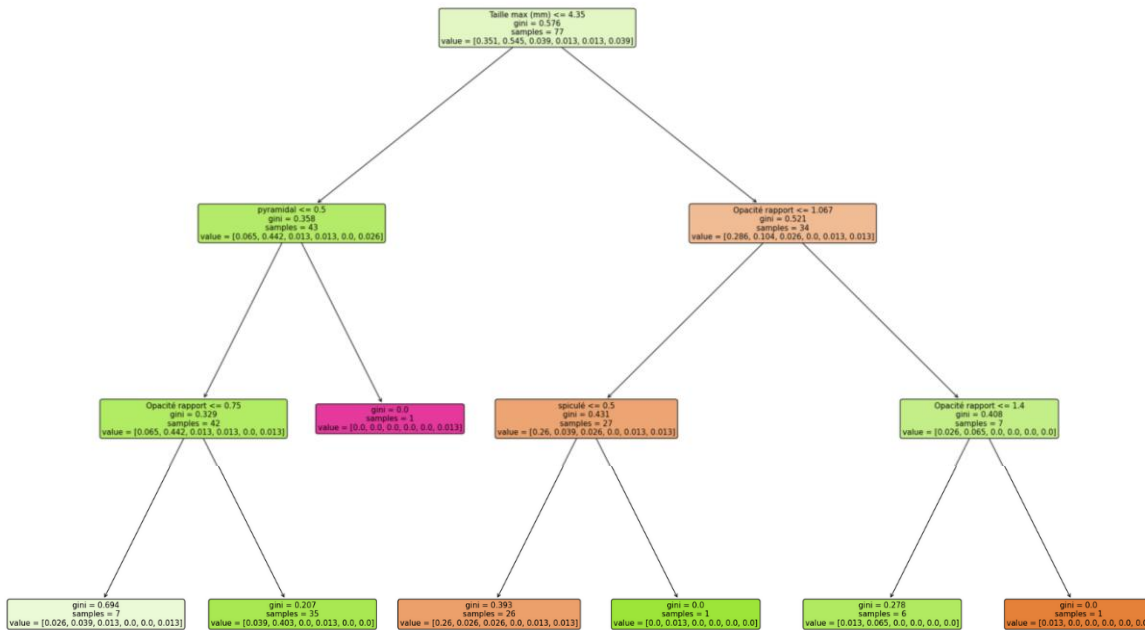
Si nous croisons les résultats de l'arbre de décision avec ceux de la matrice de confusion nous obtenons la démarche de classement de la nature des urolithes du BAUF en fonction de leurs caractéristiques radiographiques représentées sur la figure 57

Figure 57 : Algorithme de classement après croisement de l'arbre de décision et de la matrice de décision obtenus suite à l'exécution du programme sur tous les critères dont le paramétrage permettait la création d'un arbre à 3 branches associé à au moins 3 échantillons par critère obtenu



En faisant varier les paramètres d'entrée de l'algorithme simplement par le nombre d'échantillon dans chaque branche nous obtenons l'arbre présenté dans la figure 58. La matrice de confusion associée à cet arbre est représentée sur la figure 59.

Figure 58 : Arbre de décision à 3 feuilles et au moins 1 échantillon pour tous les critères



Dans cet arbre l'importance estimée des différentes caractéristiques radiographiques des calculs de l'échantillon dans la prédiction de leur nature minérale est comme suit :

- Taille max (mm) : participe à 55% de la prédiction,
- Le rapport des opacités entre celle du calcul le plus volumineux et la partie caudale du corps vertébral de L5 : participe à 30% de la prédiction,
- Forme pyramidale : participe à 8% de la prédiction,
- Forme spiculée : participe à 7% de la prédiction,
- Les autres critères ne participent pas à la prédiction

Figure 59 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 3 feuilles et au moins 1 échantillon pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude.

```

Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[21  6  0  0  0  0]
 [ 2 40  0  0  0  0]
 [ 2  1  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0]
 [ 1  0  0  0  0  0]
 [ 1  1  0  0  0  1]]
  
```

Nous pouvons lire sur la matrice de confusion que si l'on applique cet arbre à notre échantillon, nous classons correctement 21 calculs de PAM (sensibilité = 0.77, spécificité = 0.77, F1 score = 0.77) et 40 calculs de CaOx (sensibilité = 0.95, spécificité = 0.82, F1 score = 0.88) soit 79% des calculs au total (F1 score = 0.77).

Les résultats sont peu différents de l'arbre précédent mais les principales différences font ressortir 3 singularités d'analyse : un calcul à la forme spiculé, un à la forme pyramidale et un dont le rapport des opacités est augmenté.

D'autres exemples notamment pour des arbres contenant plus de branches sont présentés en annexe 3.

Ces arbres s'accompagnent de gini scores plus réduits et de F1 scores plus élevés. Ces scores s'améliorent au fur et à mesure de l'ajout de branches.

4. Discussion

L'objectif de notre étude était la mise en évidence d'éventuelles corrélations entre les caractéristiques radiographiques des calculs du BAUF et la nature minérale de ces calculs afin d'en établir un modèle prédictif basé sur une intelligence artificielle. Pour cela nous avons analysé les critères radiographiques décrits dans la littérature comme apportant une aide à l'identification *in vitro* de la nature minérale des urolithes analysés sur une population test de chats atteints de calculs du BAUF de natures diverses et ayant été traités chirurgicalement au ChuvA.

A. Epidémiologie

En comparant les données épidémiologiques relatives à notre échantillon de 77 chats atteints de calculs du BAUF, nous notons une grande majorité de chats européens et de mâles (71% dans les deux cas), avec une moyenne de 7.2 ans et 51% des chats dont l'âge est compris entre 4 et 7 ans. Ces valeurs peuvent ne pas être représentatives de l'ensemble des chats atteints de calculs du BAUF. En effet, il existe de nombreuses erreurs de classement au sein du logiciel Clovis® en ce qui concerne les races ; par ailleurs 13% sont de races inconnues. Tout cela peut diminuer l'incidence de races potentiellement surreprésentées en temps normal.

Certaines de ces valeurs sont retrouvées dans la littérature vétérinaire puisqu'une étude réalisée sur plus de 10 000 chats atteints de calculs du BAUF recense 68% de chats européens et 53% de mâles. (Houston et Moore, s. d.). En ce qui concerne l'âge des chats atteints, les études recensent un âge d'apparition des urolithes généralement inférieur à 7 ans pour la plupart des types de calculs sauf pour les calculs de CaOx qui apparaissent plus tardivement (Cannon *et al.*, 2007), ce qui pourrait expliquer une moyenne et une médiane d'âge relativement élevées dans notre échantillon.

Enfin, en nous concentrant sur la nature des calculs des chats de notre échantillon, 54% sont composés de CaOx, 35% de PAM, 3 cas d'urates et de compositions mixtes et 1 unique cas d'apatite et de protéines. La littérature fait état d'un nombre moins élevé de calculs de CaOx, plus élevé de calculs de PAM et de purines. (Ettinger *et al.*, 2017). Cela peut être expliqué par les critères d'inclusion dans notre étude. En effet nous avons décidé d'inclure uniquement les calculs du BAUF dont les analyses spectrophotométriques étaient rendues disponibles après retrait par cystotomie, ce qui implique que la chirurgie était nécessaire dans le cas de chaque chat de notre étude. Nous avons alors exclu tous les chats ayant répondu à une thérapie de dissolution, ce qui entraîne probablement une forte réduction du nombre de cas de calculs de PAM parmi les chats de notre étude. Pour les calculs de purine, nous n'avons pas eu d'autre choix que d'en exclure 3 car ils n'ont pas été visualisés sur les images radiographiques, rendant ainsi impossible toute interprétation des caractéristiques radiographiques, ces 3 chats exclus expliquent à eux seuls la différence notée entre

notre échantillon et la littérature. Les autres types minéraux sont suffisamment peu fréquents pour être présents de manière plus ou moins aléatoire au sein de notre échantillon.

En lien direct avec notre objectif, qui est d'optimiser le choix thérapeutique des chats atteints de calculs du BAU, nous avons choisi d'inclure au sein de notre étude les calculs de composition mixte car ils font partie intégrante des possibilités thérapeutiques de ce type d'affection. La littérature décrit pour la composition minérale majoritaire des calculs une valeur seuil établie à 70% afin de différencier les calculs mixtes des calculs dits purs. (« The most common types of uroliths larger than 1 mm are readily visible and accurately measured in an *in vitro* setting mimicking the canine abdomen using digital radiography - DeBow - 2023 - Veterinary Radiology & Ultrasound - Wiley Online Library », s. d.) Cette valeur étant définie de manière arbitraire nous avons, dans notre étude, établi un seuil plus bas à 60% afin de les inclure au maximum dans notre description. Ce choix a probablement pour conséquence de diminuer la significativité de nos résultats mais nous avons pris ce risque en espérant concentrer dans la catégorie « calculs mixtes » des calculs de compositions plus variées et éventuellement mettre en évidence des particularités spécifiques à cette haute variabilité.

Les autres types minéraux de calculs étaient présents dans notre échantillon dans des proportions sensiblement similaires à celles décrites dans la littérature.

B. Corrélations des caractéristiques radiographiques étudiées avec la nature minérale des calculs des chats de l'échantillon estimées à l'aide du programme et comparaison avec la littérature

Les résultats de (Weichselbaum *et al.*, 1998) indiquent une corrélation entre l'opacité et la nature minérale des urolithes *in vitro*. Ces résultats n'ont pas été retrouvés *in vivo* dans la littérature vétérinaire. En revanche aucun article n'a décrit l'étude de ces opacités urolithiques à travers l'utilisation de rapport. Nous avons alors pensé qu'afin d'augmenter la sensibilité et la spécificité de cette mesure il pourrait être intéressant de prendre pour référence un point fixe de l'anatomie afin de diminuer la variabilité individuelle et celle liée à la réalisation des clichés radiographiques notamment vis-à-vis des constantes employées qui sont différentes pour chaque animal étudié. Cela diminuerait les biais liés à une telle mesure. Empiriquement, la mesure de l'opacité de la partie caudale du corps vertébral de L5 nous paraissait stable chez les individus de même gabarit cette vertèbre ne se superposant pas à d'autres structures et étant facilement visible et évaluable sur la majorité des radiographies de profil de l'abdomen. Nous avons alors décidé d'utiliser cette répétabilité dans notre étude à travers un critère calculant un rapport entre cette opacité vertébrale et celle des calculs présentés par le chat en question.

Ainsi le critère correspondant aux rapports des opacités entre le calcul le plus radio-opaque et l'opacité de la partie caudale du corps vertébral de L5 nous permet de différencier de manière significative les calculs de CaOx des autres calculs. En effet lorsque ce rapport chez les chats atteints de calculs est supérieur à 0.858, les calculs ont significativement plus de risques d'être composés de CaOx, nécessitant ainsi un traitement chirurgical ($p = 0.02$). En revanche pour les autres types de calculs aucune corrélation n'a pu être montrée même si les résultats pour les calculs de PAM montrent une différence de près de 20% dans notre échantillon. ($p = 0.06$)

Un second critère important dans notre étude est la taille des calculs. Un calcul de taille supérieure à 4.35 mm a significativement plus de risque d'être un calcul de PAM ($p = 1.2E-6$), à

l'inverse un calcul de taille inférieure à 4.35 mm aura plus de risque d'être un calcul de CaOx ($p = 1.2E-6$). Plusieurs possibilités peuvent être évoquées pour nuancer cette significativité outre une réelle différence de taille entre les types minéraux des calculs. Une thérapie de dissolution de calcul est débutée sur les candidats atteints de probables calculs de PAM suspectés avant de présenter un risque d'obstruction. Or, les chats atteints de calculs de PAM inclus dans notre étude ont subi une cystotomie ce qui signifie probablement que ce sont des calculs du BAU pour lesquels le traitement de dissolution a été inefficace, ou ceux pour lesquels le risque d'obstruction était trop élevé à cause notamment d'une taille trop élevée. Cela entraîne un probable biais de sélection inhérent à nos critères d'inclusion, qui augmenterait artificiellement la taille des calculs de PAM de notre échantillon. Toutefois des études rapportent une détection supérieure à 99% des cas lorsque les calculs en question sont plus grands que 3 mm. (DeBow, 2023.), il est ainsi envisageable que nos résultats découlent directement de cette affirmation, une détection des calculs de PAM étant moins bien réalisée lorsque ces dernières sont de petite taille.

Par ailleurs, peu de calculs de CaOx avaient une taille supérieure à 3mm ; cela peut s'expliquer car le retrait chirurgical est indiqué dès leur détection ou leur suspicion et ce quelle que soit leur taille. Aussi, il est décrit que la radiographie permet une détection optimale des calculs de CaOx lorsque ces derniers sont de taille inférieure à 1mm ce qui explique probablement une meilleure détection des calculs de CaOx de petite taille et donc leur surreprésentation dans cette catégorie au sein de notre échantillon (Weichselbaum *et al.*, 1999).

Les autres types minéraux de calculs sont trop peu fréquents pour être représentatifs. Cependant, certaines études rapportent des difficultés de détection à la radiographie sur des fantômes de vessie lorsque les calculs d'urates sont de taille inférieure à 1 mm. (Weichselbaum *et al.*, 1999). Dans notre étude, 3/6 calculs d'urates n'étaient pas détectables à la radio et il est donc possible que ces calculs étaient de tailles inframillimétriques.

En ce qui concerne l'étude de la localisation des calculs, elle est difficile à interpréter. En effet, de nombreux chats de notre étude ont été initialement présentés suite à un épisode d'obstruction urinaire ayant nécessité un sondage urinaire et donc une potentielle modification de la localisation des calculs dans le BAUF.

Nous observons néanmoins que la plupart des chats ayant des calculs dans l'urètre sont des chats atteints de calculs de CaOx, (7/10 pour l'urètre pelvien, 9/10 pour l'urètre pénien). De plus 100% des chats ne présentant pas de calcul vésical sont des chats atteints de CaOx. En mettant ces résultats en relation avec ceux décrits précédemment il est possible que cela s'explique par une différence de taille des urolithes en fonction de leur nature minérale. Des calculs de CaOx, plus petits, auraient alors tendance à passer de la vessie à l'urètre plus facilement que des calculs de PAM, de plus grande taille, qui stagneraient au sein de la vessie.

Le nombre total de calculs du BAU visibles à la radiographie ne semble pas être corrélé à leur nature minérale. En revanche dans notre échantillon, 69% des chats présentant plus de 9 calculs étaient atteints de calculs de CaOx contre 47% chez les chats comptabilisant moins de 9 calculs ce qui constitue une différence notable même si elle n'est pas significative suite à la réalisation du test statistique ($p = 0.06$). Nous aurions envie de croire que la significativité de ce résultat est diminuée par la manière dont nous avons construit notre étude. En effet nous avons considéré une catégorie regroupant tous les chats dont le nombre de calculs était supérieur à 10 qu'ils en aient 10 ou 20. Puis le programme établit une valeur seuil estimée à un nombre de total de

9 calculs ce qui signifie que, quel que soit le nombre de calculs au-dessus de la dizaine chez les chats de cette catégorie, ils sont classés de la même manière, ce qui n'a pas d'impact sur la significativité de nos résultats. En revanche nous avons pu voir précédemment que certains calculs de taille inférieure à 3 mm ou à 1 mm pourraient ne pas être visualisés aux images radiographiques, ce qui peut éventuellement modifier la significativité de nos résultats. (DeBow, 2023. ; Weichselbaum *et al.*, 1999)

Les études concernant la régularité et la forme des contours des urolithes du BAU montrent une corrélation entre ces paramètres et la nature minérale des urolithes. Aucun de ces paramètres dans notre échantillon ne montrait de tels résultats. Une piste d'explication est proposée dans l'article en question mettant en cause une perte de visualisation des contours des urolithes *in vivo* par rapport aux analyses *in vitro* suite à la superposition de structures abdominales aux radiographies de profil.(Weichselbaum *et al.*, 2000)

Cette perte de visualisation *in vivo* est également décrite concernant l'architecture du contenu des calculs. Nous avons tout de même mis en évidence une corrélation entre un contenu homogène et la nature oxalo-calcique des calculs ($p = 0.04$). De plus une proportion non négligeable mais non significative de calculs de PAM parmi les calculs de contenu hétérogène est présente dans notre échantillon ($p = 0.06$). Cela peut être mis en relation avec la faible taille des calculs de CaOx qui peuvent mimer plus facilement un contenu homogène que les calculs de PAM de grande taille.

Enfin, la littérature décrit des formes permettant la prédiction de la nature minérale des urolithes du BAU *in vitro* mais une nouvelle fois ne transpose pas ces résultats aux analyses *in vivo*. Nos résultats sont en accord avec ces données puisqu'aucune forme analysée dans notre étude n'a donné de corrélation significative avec une quelconque nature minérale urolithique. La superposition des structures abdominales et osseuses en est probablement une des raisons (Weichselbaum *et al.*, 2000).

Weichselbaum *et al.* ont décrit en 1998 différentes méthodes de prédiction chez le chien de la nature minérale des urolithes associées à la précision de ces prédictions en utilisant des modèles sur fantômes de vessie. Ainsi dans leur étude, la précision des radiographies dans la prédiction de la nature minérale des urolithes est de 66%. En utilisant uniquement le signalement cette précision de prédiction s'élevait à 70%. Enfin en combinant ces deux méthodes ils ont obtenu des résultats similaires à la réalisation d'une cystographie à double contraste à savoir une précision de 75%. Des études de ce genre ne sont pas décrites chez le chat. (Weichselbaum *et al.*, 1998)

En utilisant notre programme, nous avons également pu quantifier cette précision qui varie selon les critères radiographiques inclus dans l'algorithme. Ainsi, un arbre classant les calculs selon leur nature minérale présumée en considérant uniquement leur localisation est correct pour 62% des calculs (55% pour les calculs de PAM et 79% pour les calculs de CaOx). Si l'on considère uniquement la forme des calculs nous obtenons des résultats assez similaires malgré une moins bonne précision pour les calculs de PAM et une meilleure pour les calculs de CaOx. Or nous cherchons à nous tromper le moins possible dans la prédiction des calculs de CaOx afin de ne pas mettre en place un traitement de dissolution sur un calcul qui doit être retiré chirurgicalement, ce qui pourrait amener à une obstruction urétrale et avoir de graves conséquences pour la santé de l'animal. Une erreur dans la prédiction d'un calcul de PAM aurait moins de conséquences mais entrainerait une intervention chirurgicale potentiellement non nécessaire. Cela représente un risque

évitable pour l'animal et des frais supplémentaires pour le propriétaire. Ainsi, les résultats obtenus dans notre échantillon ne sont pas optimaux mais pourraient être utilisés en pratique.

L'intérêt majeur de notre algorithme est de mettre en place un algorithme optimal permettant de prédire la nature minérale des calculs du BAUF, qui soit facile à mettre à jour au fil du temps, et qui puisse être adapté à une région à condition d'avoir à disposition un nombre suffisant de données pour pouvoir établir une population d'entraînement du programme.

Dans notre cas, les arbres de décisions obtenus montrent une précision globale allant de 78% à 92% en faisant varier le nombre de branches entre 3 et 6 puis le nombre d'échantillons minimum par catégorie entre 1 et 3. La précision maximale est obtenue pour un arbre à 6 branches et des catégories à un échantillon minimum pour pouvoir être considérées. La précision minimale est celle correspondant à un arbre à 3 branches et au moins 3 échantillons par catégorie pour que celle-ci soit considérée. Pour chaque arbre testé, les calculs de CaOx sont prédits correctement à plus de 93% et les calculs de PAM entre 78 et 96%. Le raisonnement précédent s'applique également ici, ainsi lorsqu'une chirurgie est nécessaire, il y a au maximum 7% de risques de ne pas partir au bloc opératoire lorsque cela est nécessaire.

En regardant plus en détail les critères les plus importants au sein de ces arbres généraux, nous observons que celui correspondant à la taille maximale du calcul de plus grande taille et celui correspondant au rapport des opacités étudiées représentent entre 80 et 95% de la prédiction réalisée. Cela implique qu'il n'est probablement pas nécessaire de construire des arbres de décision contenant de nombreuses branches pour obtenir une bonne précision de prédiction.

Nous nous sommes demandés si ces résultats pourraient, à l'instar de ceux retrouvés dans des fantômes de vessie, être améliorés en les combinant aux critères épidémiologiques des chats atteints des différents calculs en utilisant les critères décrits dans la littérature tels que le type de cristaux visualisés à l'analyse du culot urinaire (Pressler *et al.*, 2004), l'âge, la race et le genre des chats atteints (Weichselbaum *et al.*, 1998).

Ces résultats nous montrent une précision de notre algorithme dans la prédiction de la nature minérale des calculs du BAUF supérieure à toutes les techniques utilisées en médecine vétérinaire des carnivores domestiques jusqu'ici. Cependant nos résultats comportent de nombreuses limites et biais.

Le premier élément important à noter est que les raisonnements précédemment exposés ne différencient pas le chien du chat. En effet, la littérature concernant l'étude d'une prédictibilité de la nature des urolithes du BAU explore presque exclusivement l'espèce canine. Ainsi chaque différence observée avec la littérature peut être causée par les raisons citées précédemment mais aussi par de simples différences interspécifiques.

En jouant avec le paramétrage de notre algorithme il est possible d'améliorer nos résultats au détriment de leur significativité. Ainsi, en augmentant le nombre de branches de l'arbre nous nous rapprochons petit à petit du nombre total de chats dans notre échantillon assez réduit, nous obtenons donc une meilleure prédiction. En revanche celle-ci ne peut être applicable uniquement au sein de notre échantillon ce qui n'a aucun intérêt en pratique. L'explication derrière cela est qu'avec un nombre suffisant de branches, le programme codé peut se permettre de prendre en compte les singularités des calculs de chaque chat. Or ces singularités n'étant pas générales, l'arbre créé aura ainsi de moins bons résultats s'il est appliqué à une nouvelle population. Ces singularités sont d'autant plus utilisées par notre programme si l'on considère qu'un unique calcul peut créer une

séparation au sein de l'arbre (en lien avec le paramétrage de notre programme notamment en ce qui concerne le nombre d'échantillons minimum pour pouvoir créer une catégorie) d'où l'obtention de meilleurs résultats n'ayant aucune possibilité de généralisation.

L'un des biais majoritaires de notre étude est d'avoir testé notre algorithme à partir des données ayant servi à son entraînement. Ainsi des corrélations sont plus facilement trouvées. Ce biais est diminué par l'emploi d'un arbre contenant un nombre de branches restreint ; il convient donc de ne pas interpréter trop vite nos résultats pour les arbres de décision à 6 branches notamment. La taille restreinte de notre population ne nous a pas permis de créer un sous-groupe permettant le test de notre algorithme une fois entraîné. Nous n'avons donc eu d'autres choix que de le tester de cette manière. Il serait donc intéressant de le tester sur une nouvelle population remplissant les critères d'inclusion à notre étude afin d'augmenter la significativité de nos résultats.

Lors de la construction de notre étude, nous aurions pu ne pas prendre en compte tous les types minéraux de calculs pour nous concentrer sur les calculs de PAM et de CaOx uniquement, les autres calculs étant présents en quantité non représentative. Toutefois, il nous a paru intéressant de ne pas exclure les autres calculs car, en pratique, il est plus intéressant de montrer des résultats sur un type minéral qui se traite de manière spécifique par rapport à l'ensemble des types minéraux de calculs plutôt que simplement sur un type de calcul par rapport à un autre. Si, par exemple nous montrons une grande corrélation entre un critère particulier et la nature PAM d'un calcul par rapport aux calculs de CaOx, il est possible qu'en incluant d'autres types de calculs (mixtes, d'urates, ...) la corrélation ne soit pas significative. Cette différence modifierait la nécessité du traitement de dissolution de calculs de PAM en augmentant potentiellement le risque qu'il ne soit pas efficace, rendant une intervention chirurgicale plus indiquée dans ce cas.

Notre étude comporte également des biais dans l'analyse des images radiographiques. En effet les images radiographiques ont été intégralement lues et interprétées par un étudiant en 6^{ème} année à l'EnvA. Au cours du protocole nous avons relu une seconde fois les radios, comme expliqués précédemment, afin de diminuer au maximum l'impact lié à l'apprentissage de lecture des images. Aussi, nous étions au courant que chaque chat était atteint d'au moins un calcul du BAUF, même si celui-ci s'avérait ne pas être visible à la radiographie. Afin de s'affranchir au maximum de ces biais, il serait intéressant de réaliser une étude en double aveugle comparant une lecture réalisée par un étudiant, une lecture réalisée par un vétérinaire généraliste et une troisième réalisée par un spécialiste en imagerie médicale vétérinaire.

Conclusion.

Contrairement à ce qui est décrit dans la littérature vétérinaire concernant les carnivores domestiques, notre étude rétrospective a pu mettre en évidence des corrélations entre la nature minérale des calculs du BAUF et certains critères radiographiques grâce à l'utilisation d'un programme basé sur du ML, écrit au cours de notre étude puis appliqué à notre échantillon. Ainsi, des calculs de PAM semblent associés à une taille maximale du calcul de plus grande taille supérieure à 4.35 mm. Les calculs de CaOx sont quant à eux associés à une radio-opacité supérieure à 0.858, une taille maximale inférieure à 4.35 mm et à un contenu homogène au sein du calcul.

Grâce à la mise en évidence de ces corrélations, le programme codé au cours de notre étude rétrospective a permis la construction de divers arbres de décision permettant la prédiction d'au moins 78% de la nature minérale des calculs de notre échantillon, ce qui surpasse les prédictions *in vitro* décrites dans la littérature. (Pressler *et al.*, 2004) Toutefois ces résultats sont largement à modérer notamment à cause de l'existence de nombreux biais que ce soit lors de la construction de l'étude, de la description des lésions radiographiques ou dans l'analyse des résultats par le programme codé dans un second temps. Ils indiquent cependant des résultats qu'il serait intéressant de confirmer ou infirmer notamment au cours de la réalisation d'une étude prospective en double aveugle sur un échantillon de plus grande taille dont les données seraient utilisées pour l'entraînement de notre programme.

En effet, l'intelligence artificielle introduite au cours de ce travail est généralisable à n'importe quel tableur de format d'entrée correspondant à la trame du tableur utilisé dans notre étude. De plus, il serait possible d'y intégrer des notions épidémiologiques telles que l'âge, la race et le sexe afin d'obtenir des résultats plus conclusifs.

En allant plus loin, il serait aussi possible d'étudier des variations temporelles et régionales en entraînant le programme avec des populations différentes dans le temps et dans l'espace, ce qui pourrait permettre l'obtention d'arbres de prédiction adaptés à chaque région et dont la mise à jour régulière serait possible ce qui permettrait une nouvelle optimisation de la prise en charge en fonction du type minéral du calcul.

Liste des références bibliographiques

- ALBASAN, H., OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., *et al.* (2012) Risk factors for urate uroliths in cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 240, n° 7, p. 842-847. [<https://doi.org/10.2460/javma.240.7.842>]
- APPEL, S.L., HOUSTON, D.M., MOORE, A.E.P., *et al.* (2010) Feline urate urolithiasis. *The Canadian Veterinary Journal* vol. 51, n°5, p. 493-496.
- APPEL, S.L., LEFEBVRE, S.L., HOUSTON, D.M., *et al.* (2008) Evaluation of risk factors associated with suture-nidus cystoliths in dogs and cats: 176 cases (1999–2006). *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 233, n° 12, p.1889-1895. [<https://doi.org/10.2460/javma.233.12.1889>]
- BAI, S.C., SAMPSON, D.A., MORRIS, J.G., *et al.* (1989) Vitamin B-6 requirement of growing kittens. *The Journal of Nutrition* vol. 119, n° 7, p. 1020-1027. [<https://doi.org/10.1093/jn/119.7.1020>]
- BAILIFF, N.L., NELSON, R.W., FELDMAN, E.C., *et al.* (2006) Frequency and Risk Factors for Urinary Tract Infection in Cats with Diabetes Mellitus. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 20, n°4, p. 850-855. [[https://doi.org/10.1892/0891-6640\(2006\)20\[850:farffu\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1892/0891-6640(2006)20[850:farffu]2.0.co;2)]
- BARTGES, J.W., CALLENS, A.J. (2015) Urolithiasis. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* vol. 45, n° 4, p. 747-768. [<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2015.03.001>]
- BUFFINGTON, C.A., CHEW, D.J., KENDALL, M.S., *et al.* (1997) Clinical evaluation of cats with nonobstructive urinary tract diseases. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 210, n° 1, p. 46-50.
- BUFFINGTON, C.A., ROGERS, Q.R., MORRIS, J.G. (1990) Effect of diet on struvite activity product in feline urine. *American Journal of Veterinary Research* vol. 51, n° 12, p. 2025-2030.
- CANNON, A.B., WESTROPP, J.L., RUBY, A.L., *et al.* (2007) Evaluation of trends in urolith composition in cats: 5,230 cases (1985-2004). *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 231, n° 4, p. 570-576. [<https://doi.org/10.2460/javma.231.4.570>]
- CREPEAUX, G. (2022) Physiologie de l'appareil urinaire. Polycopié. Maisons-Alfort, ENVA, UC0212 Histologie et physiologie des appareils circulatoire, respiratoire et urinaire.
- DAVIDSON, E.B., RITCHEY, J.W., HIGBEE, R.D., *et al.* (2004) Laser Lithotripsy for Treatment of Canine Uroliths. *Veterinary Surgery* vol. 33, n°1, p. 56-61. [<https://doi.org/10.1111/j.1532-950x.2004.04002.x>]
- DEBOW, P., AUGER., M., FAZIO, C., *et al.* (2023) The most common types of uroliths larger than 1 mm are readily visible and accurately measured in an in vitro setting mimicking the canine abdomen using digital radiography. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 64, n° 5, p. 806-812. [<https://doi.org/10.1111/vru.13268>]
- DE LORENZI, D., BERNARDINI, M., PUMAROLA, M. (2005) Primary hyperoxaluria (l-glyceric aciduria) in a cat. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 7, n° 6, p. 357-361. [<https://doi.org/10.1016/j.jfms.2005.03.007>]
- DORSCH, R., REMER, C., SAUTER-LOUIS, C., *et al.* (2014) Feline lower urinary tract disease in a German cat population: A retrospective analysis of demographic data, causes and clinical signs. *Tierärztliche Praxis. Ausgabe K, Kleintiere/Heimtiere* vol. 42, p. 231-9. [<https://doi.org/10.1055/s-0038-1623769>]
- DRU FORRESTER, S., ROUDEBUSH, P. (2007) Evidence-Based Management of Feline Lower Urinary Tract Disease. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* vol. 37, n° 3, p. 533-558. [<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2007.01.009>]
- DYCE, K.M., SACK, W.O., WENSING, C.J.G. (2017) Textbook of veterinary anatomy, 5th edition. St Louis, W.B. Saunders Company.
- ETTINGER, S.J., FELDMAN, E.C., CÔTÉ, E. (2017) Textbook of veterinary internal medicine: diseases of the dog and the cat. 8th edition. St Louis, Elsevier.

- GERBER, B., BORETTI, F.S., KLEY, S., *et al.* (2005) Evaluation of clinical signs and causes of lower urinary tract disease in European cats. *Journal of Small Animal Practice* vol. 46, n° 12, p. 571-577. [<https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.2005.tb00288.x>]
- FLETCHER, T.F. (1996) Applied anatomy and physiology of the feline lower urinary tract. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice* vol. 26, n° 2, p. 181-196.
- FUNABA, M., TANAKA, T., KANEKO, M., *et al.* (2001a) Fish Meal vs. Corn Gluten Meal as a Protein Source for Dry Cat Food. *Journal of Veterinary Medical Science* vol. 63, n° 12, p. 1355-1357. [<https://doi.org/10.1292/jvms.63.1355>]
- FUNABA, M., YAMATE, T., NARUKAWA, Y., *et al.* (2001b) Effect of Supplementation of Dry Cat Food with D,L-Methionine and Ammonium Chloride on Struvite Activity Product and Sediment in Urine. *Journal of Veterinary Medical Science* vol. 63, n° 3, p. 337-339. [<https://doi.org/10.1292/jvms.63.337>]
- GERNONE, F., UVA, A., MAIOLINI, A., *et al.* (2022) A review of the neural control of micturition in dogs and cats: neuroanatomy, neurophysiology and neuroplasticity. *Veterinary Research Communications* vol. 46, n° 4, p. 991-998. [<https://doi.org/10.1007/s11259-022-09966-9>]
- GISSELMAN, K., LANGSTON, C., PALMA, D., *et al.* (2009) Calcium oxalate urolithiasis. *Compendium* vol. 31, n° 11, p. 496-502; quiz 502.
- GRANT, D.C., WERE, S.R., GEVEDON, M.L. (2008) Holmium : YAG Laser Lithotripsy for Urolithiasis in Dogs. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 22, n° 3, p. 534-539. [<https://doi.org/10.1111/j.1939-1676.2008.0083.x>]
- GRIFFIN, D.W., GREGORY, C.R. (1992) Prevalence of bacterial urinary tract infection after perineal urethrostomy in cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 200, n° 5, p. 681-684.
- GUNN-MOORE, D.A. (2003) Feline lower urinary tract disease. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 5, n° 2, p. 133-138. [[https://doi.org/10.1016/S1098-612X\(02\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S1098-612X(02)00129-8)]
- HICKEY, J.M., BERENT, A.C., FISCHETTI, A.J., *et al.* (2020) Radiographic features of suspected suture-associated cystic calculi in dogs. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 61, n° 4, p. 394-398. [<https://doi.org/10.1111/vru.12863>]
- HICKS, S.A., STRÜMKE, I., THAMBAWITA, V., *et al.* (2022) On evaluation metrics for medical applications of artificial intelligence. *Scientific Reports* vol. 12, n° 1, p. 5979. [<https://doi.org/10.1038/s41598-022-09954-8>]
- HOLLAND, M., HUDSON, J. (2020) *Feline Diagnostic Imaging*. Hoboken, Wiley-Blackwell.
- HOSTUTLER, R.A., CHEW, D.J., DIBARTOLA, S.P. (2005) Recent concepts in feline lower urinary tract disease. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* vol. 35, n° 1, p. 147-170. [<https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2004.08.006>]
- HOUSTON, D.M., MOORE, A.E.P. (2009) Canine and feline urolithiasis: Examination of over 50 000 urolith submissions to the Canadian Veterinary Urolith Centre from 1998 to 2008. *The Canadian Veterinary Journal* vol. 50, n° 12, p. 1263-1268.
- HOUSTON, D.M., MOORE, A.E.P., FAVRIN, M.G., *et al.* (2003) Feline urethral plugs and bladder uroliths: A review of 5484 submissions 1998–2003. *The Canadian Veterinary Journal* vol. 44, n°12, p. 974-977.
- HOUSTON, D.M., RINKARDT, N.E., HILTON, J. (2004) Evaluation of the efficacy of a commercial diet in the dissolution of feline struvite bladder uroliths. *Veterinary Therapeutics* vol. 5, n° 3, p. 187-201.
- HSIEH, F.Y., BLOCH, D.A., LARSEN, M.D. (1998) A simple method of sample size calculation for linear and logistic regression. *Statistics in Medicine* vol. 17, n° 14, p. 1623-1634. [[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0258\(19980730\)17:14<1623::aid-sim871>3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0258(19980730)17:14<1623::aid-sim871>3.0.co;2-s)]
- KERR, K.R. (2013) Companion animals symposium : Dietary management of feline lower urinary tract symptoms1,2. *Journal of Animal Science* vol. 91, n° 6, p. 2965-2975. [<https://doi.org/10.2527/jas.2012-6035>]
- LANGSTON, C., GISSELMAN, K., PALMA, D., *et al.* (2008) Diagnosis of urolithiasis. *Compendium* vol. 30, p. 447-50, 452.
- LEKCHAROENSUK, C., OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., *et al.* (2005) Trends in the Frequency of Calcium Oxalate Uroliths in the Upper Urinary Tract of Cats. *Journal of the American Animal Hospital Association* vol. 41, n° 1, p. 39-46. [<https://doi.org/10.5326/0410039>]

- LEKCHAROENSUK, C., OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., *et al.* (2001) Association between dietary factors and calcium oxalate and magnesium ammonium phosphate urolithiasis in cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 219, n° 9, p. 1228-1237. [https://doi.org/10.2460/javma.2001.219.1228]
- LULICH, J.P., BERENT, A.C., ADAMS, L.G., *et al.* (2016) ACVIM Small Animal Consensus Recommendations on the Treatment and Prevention of Uroliths in Dogs and Cats. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 30, n° 5, p. 1564-1574. [https://doi.org/10.1111/jvim.14559]
- LULICH, J.P., OSBORNE, C.A., KOEHLER, L.A. (2010) Canine Calcium Oxalate Urolithiasis: Changing Paradigms in Detection, Management and Prevention *In Hand M.S., Thatcher C.D., Remillard R.L., et al., Small animal clinical nutrition*. 5th Edition, Topeka, Mark Morris Institute, p. 855-870.
- LULICH, J.P., OSBORNE, C.A., LEKCHAROENSUK, C., *et al.* (2004) Effects of diet on urine composition of cats with calcium oxalate urolithiasis. *Journal of the American Animal Hospital Association* vol. 40, n° 3, p. 185-191. [https://doi.org/10.5326/0400185]
- LULICH, J.P., OSBORNE, C.A., SANDERSON, S.L., *et al.* (1999) Voiding Urohydropropulsion. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* vol. 29, n° 1, p. 283-291. [https://doi.org/10.1016/S0195-5616(99)50016-8]
- MATSUMOTO, K., FUNABA, M. (2008) Factors affecting struvite (MgNH₄PO₄·6H₂O) crystallization in feline urine. *Biochimica et Biophysica Acta* vol. 1780, n° 2, p. 233-239. [https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2007.09.013]
- MAYER-ROENNE, B., GOLDSTEIN, R.E., ERB, H.N. (2007) Urinary tract infections in cats with hyperthyroidism, diabetes mellitus and chronic kidney disease. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 9, n° 2, p. 124-132. [https://doi.org/10.1016/j.jfms.2006.09.004]
- MESTRINHO, L.A., GONÇALVES, T., PARREIRA, P.B., *et al.* (2013) Xanthine urolithiasis causing bilateral ureteral obstruction in a 10-month-old cat. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 15, n° 10, p. 911-916. [https://doi.org/10.1177/1098612X13477413]
- MIDKIFF, A.M., CHEW, D.J., RANDOLPH, J.F., *et al.* (2000) Idiopathic Hypercalcemia in Cats. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 14, n° 6, p. 619-626. [https://doi.org/10.1111/j.1939-1676.2000.tb02286.x]
- MINNESOTA UROLITH CENTER (2014) Canine and feline urolith epidemiology: 1981-2013 *In DVM 360*. [https://www.dvm360.com/view/canine-and-feline-urolith-epidemiology-1981-2013] (consulté le 20/09/2023).
- MIZUKAMI, K., RAJ, K., GIGER, U. (2015) Feline Cystinuria Caused by a Missense Mutation in the *SLC3A1* Gene. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 29, n° 1, p. 120-125. [https://doi.org/10.1111/jvim.12501]
- NELL, E., GAROFOLO, S.Q., OBER, C. (2021) Pure cystine and urate calculi can be clearly visible using survey digital radiography. *The Canadian Veterinary Journal* vol. 62, n° 6, p. 605-607.
- NYKAMP, S.G. (2017) Dual-energy computed tomography of canine uroliths. *American Journal of Veterinary Research* vol. 78, n° 10, p. 1150-1155. [https://doi.org/10.2460/ajvr.78.10.1150]
- O'BRIEN, R., BARR, F. (2009) *BSAVA Manual of Canine and Feline Abdominal Imaging*. Quedgeley, British Small Animal Veterinary Association.
- OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., KRUGER, J.M., *et al.* (2009a) Analysis of 451,891 Canine Uroliths, Feline Uroliths, and Feline Urethral Plugs from 1981 to 2007: Perspectives from the Minnesota Urolith Center. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* vol. 39, n° 1, p. 183-197. [https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2008.09.011]
- OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., KRUGER, J.M., *et al.* (1990) Medical dissolution of feline struvite urocystoliths. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 196, n° 7, p. 1053-1063.
- OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., SWANSON, L.L., *et al.* (2009b) Drug-Induced Urolithiasis. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* vol. 39, n° 1, p. 55-63. [https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2008.09.004]
- OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., THUMCHAI, R., *et al.* (1996) Diagnosis, Medical Treatment, and Prognosis of Feline Urolithiasis. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* vol. 26, n° 3, p. 589-627. [https://doi.org/10.1016/S0195-5616(96)50087-2]

- PALMA, D., LANGSTON, C., GISSELMAN, K., *et al.* (2009) Feline struvite urolithiasis. *Compendium* vol. 31, n° 12, p. E1-7; quiz E8.
- PRESSLER, B.M., MOHAMMADIAN, L.A., LI, E., *et al.* (2004) In vitro prediction of canine urolith mineral composition using computed tomographic mean beam attenuation measurements. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 45, n° 3, p. 189-197. [<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2004.04032.x>]
- RINKARDT, N.E., HOUSTON, D.M. (2004) Dissolution of infection-induced struvite bladder stones by using a noncalculolytic diet and antibiotic therapy. *The Canadian Veterinary Journal* vol. 45, n° 10, p. 838-840.
- RUNGE, J.J., BERENT, A.C., MAYHEW, P.D., *et al.* (2011) Transvesicular percutaneous cystolithotomy for the retrieval of cystic and urethral calculi in dogs and cats: 27 cases (2006-2008). *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 239, n° 3, p. 344-349. [<https://doi.org/10.2460/javma.239.3.344>]
- SÆVIK, B.K., TRANGERUD, C., OTTESEN, N., *et al.* (2011) Causes of lower urinary tract disease in Norwegian cats. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 13, n° 6, p. 410-417. [<https://doi.org/10.1016/j.jfms.2010.12.012>]
- SANDERSON, S.L., OSBORNE, C.A., LULICH, J.P., *et al.* (2001) Evaluation of urinary carnitine and taurine excretion in 5 cystinuric dogs with carnitine and taurine deficiency. *Journal of Veterinary Internal Medicine* vol. 15, n° 2, p. 94-100. [[https://doi.org/10.1892/0891-6640\(2001\)015<0094:eoucat>2.3.co;2](https://doi.org/10.1892/0891-6640(2001)015<0094:eoucat>2.3.co;2)]
- SERVICE D'IMAGERIE MEDICALE (2013) Vessie d'aspect normal chez un chat [Image radiographique]. Liverpool, Small Animal Teaching Hospital (SATH), University of Liverpool.
- SERVICE D'IMAGERIE MEDICALE (2013) Urétrographie chez un chat permettant la visualisation d'un urètre et d'une vessie sans anomalies [Image radiographique]. Liverpool, Small Animal Teaching Hospital (SATH), University of Liverpool.
- THRALL, D.E. (2017) Textbook of veterinary diagnostic radiology, 7th edition. St-Louis, Saunders Elsevier.
- THRALL, D.E., ROBERTSON, I.D. (2023) Chapter 7 - The abdomen. *In Atlas of Normal Radiographic Anatomy and Anatomic Variants in the Dog and Cat 3rd Edition*. St Louis, Elsevier, p. 235-294. [<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-79615-6.00016-5>]
- THUMCHAI, R., LULICH, J., OSBORNE, Ca., *et al.* (1996) Epizootiologic evaluation of urolithiasis in cats: 3,498 cases (1982-1992). *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 208, n° 4, p. 547-551.
- TSUCHIDA, S., KAGI, A., KOYAMA, H., *et al.* (2007) Xanthine urolithiasis in a cat: a case report and evaluation of a candidate gene for xanthine dehydrogenase. *Journal of Feline Medicine and Surgery* vol. 9, n° 6, p. 503-508. [<https://doi.org/10.1016/j.jfms.2007.03.012>]
- WEICHSELBAUM, R.C., FEENEY, D.A., JESSEN, C.R., *et al.* (2001) An integrated epidemiologic and radiographic algorithm for canine urocystolith mineral type prediction. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 42, n° 4, p. 311-319. [<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2001.tb00946.x>]
- WEICHSELBAUM, R.C., FEENEY, D.A., JESSEN, C.R., *et al.* (2000) Loss of urocystolith architectural clarity during in vivo radiographic simulation versus in vitro visualization. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 41, n° 3, p. 241-246. [<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2000.tb01486.x>]
- WEICHSELBAUM, R.C., FEENEY, D.A., JESSEN, C.R., *et al.* (2000) Contrast medium-related artifacts observed during in vitro radiographic characterization of urocystolith mineral composition. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 41, n° 3. [<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2000.tb01485.x>]
- WEICHSELBAUM, R.C., FEENEY, D.A., JESSEN, C.R., *et al.* (1999) Urocystolith Detection: Comparison of Survey, Contrast Radiographic and Ultrasonographic Techniques in an in Vitro Bladder Phantom. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 40, n° 4, p. 386-400. [<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.1999.tb02131.x>]

- WEICHSELBAUM, R.C., FEENEY, D.A., JESSEN, C.R., *et al.* (1998) In vitro evaluation of contrast medium concentration and depth effects on the radiographic appearance of specific canine urolith mineral types. *Veterinary Radiology & Ultrasound* vol. 39, n° 5, p. 396-411. [<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.1998.tb01625.x>]
- WHITE, R.N., TICK, N.T., WHITE, H.L. (1997) Naturally occurring xanthine urolithiasis in a domestic shorthair cat. *The Journal of Small Animal Practice* vol. 38, n° 7, p. 299-301. [<https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.1997.tb03470.x>]

Annexe 1 : Feuilles de calculs Excel® utilisées pour le stockage des données des chats de l'étude

N°	Nom propriétaire	N° Dossier	Date de la cytoanalyse	Analyse disponible	Composant primaire	Proportion primaire	Composant secondaire	Proportion secondaire	Composant tertiaire	Proportion tertiaire	Composant quaternaire	Proportion quaternaire
1		A13-5315	22/05/2013	1 PAM	100							
2		A13-6924	09/06/2013	1 PAM	100							
3		A10-1979	20/12/2013	1 OxCa Mono	85 OxCa Di			10 Ni				
4		A14-635	24/01/2014	1 Urate	90 PAM			10				
5		A10-12372	10/07/2014	1 PAM	100			0				
6		A14-14315	20/04/2016	1 OxCa Di	70 OxCa Mono			30				
7		A15-835	21/01/2015	1 PAM	100			0				
8		A08-4100	12/02/2015	1 OxCa Mono	80 OxCa Di			10 Ni				
9		A15-5131	01/06/2015	1 OxCa Mono	50 OxCa Di			30 Apatite			10 Phos triCa	10
10		A10-14263	24/12/2015	1 PAM	100							
11		A15-8046	03/02/2016	1 PAM	100							
12		A16-3591	18/03/2016	1 OxCa Mono	80 OxCa Di			10 Phos triCa			10	
13		A16-4758	13/04/2016	1 OxCa Di	90 OxCa Mono			10				
14		A15-14394	25/10/2016	1 PAM	100							
15		A16-15163	05/12/2016	1 OxCa Mono	80 OxCa Di			10 Ni			10	
16		A17-12	02/01/2017	1 PAM	100							
17		A17-66	03/01/2017	1 PAM	100							
18		A16-14752	30/01/2017	1 OxCa Mono	60 OxCa Di			30 Phos triCa			10	
19		A17-1874	15/02/2017	1 PAM	100							
20		A17-3498	20/03/2017	1 PAM	100							
21		A17-11947	20/10/2017	1 OxCa	80 Prot			20				
22		A19-4905	26/02/2020	1 OxCa	100							
23		A04-8367	25/03/2013	1 PAM	100							
24		A13-3663	26/03/2013	1 PAM	100							
25		A13-5108	24/04/2013	1 OxCa Mono	90 Phos triCa							
26		A13-8241	09/07/2013	1 OxCa Mono	60 OxCa Di			30				
27		A10-8982	13/11/2013	1 OxCa Di	45 OxCa Mono			45 Apatite			5 Phos triCa	5
28		A15-2631	19/03/2015	1 OxCa Mono	80 OxCa Di			10 Phos triCa			10	
29		A16-5743	29/04/2016	1 PAM	100							
30		A16-6550	17/05/2016	1 OxCa Mono	70 OxCa Di			20 Phos triCa			10	
31		A16-7554	06/06/2016	1 OxCa Di	55 OxCa Mono			35 Apatite			10	
32		A16-9219	08/07/2016	1 OxCa Mono	70 OxCa Di			15 Ni			15	
33		A09-935	08/11/2016	1 OxCa Mono	80 OxCa Di			10 Phos triCa			10	
34		A17-2862	09/03/2017	1 OxCa Mono	75 OxCa Di			15 Ni			10	
35		A17-8527	24/03/2017	1 OxCa Di	90 OxCa Mono			10				
36		A16-5234	04-mai	1 PAM	100							
37		A17-540	19/05/2017	1 Apatite	80 Protéines			20				
38		A17-7851	25/06/2017	1 PAM	100							
39		A17-8038	29/06/2017	1 PAM	50 Apatite			50				
40		A18-4981	19/04/2018	1 OxCa	80 Protéines			20				
41		A14-11028	16/10/2014	0 OxCa Di	60 OxCa Mono			40				
42		A14-11997	22/10/2014	0 PAM	100							
43		A15-278	09/01/2015	0 OxCa	100							
44		A15-6788	02/06/2015	0 OxCa	100							
45		A18-14856	19/03/2019	0 OxCa Mono	100							
46		A20-4575	18/05/2020	0 PAM	100							
47		A20-4753	19/05/2020	0 Protéines	100							
48		A20-4057	27/05/2020	0 PAM	100							
49		A16-12161	03/09/2020	0 OxCa Mono	90							
50		A17-14410	21/10/2020	0 Urate	100							
51		A20-11993	26/10/2020	0 PAM	100%							
52		A21-571	28/01/2021	0 OxCa Mono	70 OxCa Di			30				
53		A21-48	02/02/2021	0 OxCa Di	90 OxCa Mono			10				
54		A21-2209	15/02/2021	0 OxCa Mono	90 OxCa Di			15 Ni				
55		A21-2719	23/02/2021	0 OxCa Mono	100							
56		A21-4213	23/03/2021	0 OxCa Mono	100							
57		A21-5448	05/05/2021	PAM	100							
58		A21-10745	03/08/2021	0 OxCa Mono	95 Apatite			5				
59		A21-10752	04/08/2021	0 OxCa Mono	80 OxCa Di			20				
60		A22-416	11/01/2022	0 Urate	60 OxCa Mono			40				
61		A22-4991	07/04/2022	0 OxCa Mono	70 OxCa Di			20 Apatite			10	
62		A22-7880	02/06/2022	0 PAM	100							
63		A22-7591	07/06/2022	OxCa Mono	50 OxCa Di			45 Apatite			5	
64		A15-6381	15/06/2022	0 OxCa Mono	90 OxCa Di			10				
65		A22-10211	27/02/2022	0 OxCa Mono	90 OxCa Di			10				
66		A22-11702	06/09/2022	0 OxCa Mono	100							
67		A22-15134	15/11/2022	0 OxCa Mono	95 OxCa Di			5				
68		A22-2260	24/11/2022	0 PAM	60 Urate			40				
69		A22-16815	07/12/2022	0 PAM	100							
70		A22-17965	02/01/2023	0 PAM	100							
71		A23-1501	31/03/2023	0 OxCa Mono	100							
72		A20-7981	31/07/2020	0 OxCa Mono	100							
73		A21-8211	11/06/2021	0 OxCa Mono	70 OxCa Di			30				
74		A21-8234	08/06/2021	0 OxCa Di	65 OxCa Mono			30 Apatite			5	
75		A21-1585		OxCa Mono	95 Apatite			5				
76		A21-13048		OxCa Mono	70 OxCa Di			20 Apatite			10	
77		A20-6429		OxCa Di	85 Apatite			15				
78												
79												
80												
81												
82												
83												
84												

80 NI = Non identifié
 81 OxCa Mono = Oxalate de calcium monohydraté
 82 OxCa Di = Oxalate de calcium dihydraté
 83 PAM = Struvite
 84 Phos triCa = Phosphore tricalcique

Figure Annexe 1 : Feuilles de calculs recensant les natures minérales des calculs des chats inclus dans notre étude

RADIO BAS APPAREIL URINAIRE																				
Date de la radio (dernière radio avant la cysto)	N° cas	Projections radiographiques	Nombre total de calculs	Vessie (nombre)	Urètre pelvien (nombre)	Urètre pénien (nombre)	Taille max (mm)	Forme (rond, ovoïde, bosselé, pyramidal, irrégulier, facetté [spiculé ?])	Internal pattern (homogène, hétérogène)	Contours (lisses/rugueux)	Bords (contendants/pointus)	Opacité (le plus volumineux)/centre de L5 sur projection latérale dans la vessie	Race	Sexe	Age	N° cas	Nombre total	Mâle	Femelle	
3	25/04/2013	A13-5315	f/p	3	3	0	0	8,4 rond	hétérogène	lisse	arrondi	2092/2062	Inconnu	F		2 A13-5315	1	0	1	
4	30/05/2013	A13-6924	f/p	>10	>10	0	0	2,5 facetté	hétérogène	rugueux	pointu	1388/2049	Européen	M		6 A13-6924	1	1	0	
5	03/02/2015	A10-1979	f/p	1 ou 6 si H	1	0	0	3,1 rond	homogène	lisse	arrondi	1784/1827	Inconnu	M		12 A10-1979	1	1	0	
6	16/01/2014	A14-635	f/p	2	2	0	0	7,8 ovoïde	hétérogène	rugueux	arrondi	1742/1923	Européen	F		10 A14-635	1	0	1	
7	10/07/2014	A14-12372f	p	1	1	0	0	14,7 rond	hétérogène	rugueux	arrondi	1669/2135	Européen	F		4 A10-12372	1	0	1	
8	02/10/2014	A14-11028f	p	1	1	0	0	4,1 bosselé	hétérogène	rugueux	pointu	1812/2068	Européen	M		5 A14-11028	1	1	0	
9	22/10/2014	A14-11997f	p	5	4	1	0	13,8 facetté	homogène	lisse	arrondi	1799/1887	Européen	M		4 A14-11997	1	1	0	
10	09/01/2015	A15-278	p	1	1	0	0	3,5 rond	homogène	lisse	arrondi	1933/Non visible	Européen	M		12 A15-278	1	1	0	
11	27/05/2015	A15-6788	f/p	2	1	1	0	3,1 rond	homogène	lisse	arrondi	2041/2112	Sacré de B/M			5 A15-6788	1	1	0	
12	19/03/2019	A18-14856f	p	4	4	0	0	3,7 rond	homogène	rugueux	arrondi	2123/1965	Chartreux	M	Inconnu	9 A18-14856	1	1	0	
13	13/05/2020	A20-4575	f/p	>10	>10	0	0	4,9 facetté	hétérogène	rugueux	pointu	2592/2842	Européen	M		9 A20-4575	1	1	0	
14	18/05/2020	A20-4753	f/p	2	2	0	0	4,7 irrégulier	hétérogène	rugueux	pointu	1352/1883	Européen	M		4 A20-4753	1	1	0	
15	15/04/2020	A20-4057	p	3	3	0	0	6 ovoïde	hétérogène	rugueux	arrondi	1463/2274	Européen	F		7 A20-4057	1	0	1	
16	03/09/2020	A16-12161f	p	8	8	0	0	2,6 rond	homogène	rugueux	arrondi	2142/1971	Persan	F		7 A16-12161	1	0	1	
17	10/09/2020	A16-14411f	p	4	4	0	0	12,3 rond	homogène	lisse	arrondi	1752/2002	Européen	M		2 A17-14411	1	1	0	
18	20/10/2020	A20-11993f	p	2	2	0	0	12,4 ovoïde	homogène	lisse	arrondi	1884/2061	Européen	F		7 A20-11993	1	0	1	
19	14/01/2021	A21-571	f/p	2	2	0	0	6,7 irrégulier	hétérogène	rugueux	pointu	1688/1950	Européen	M		8 A21-571	1	1	0	
20	05/01/2021	A21-48	p	3	3	0	0	6,2 rond	hétérogène	rugueux	arrondi	2098/1748	Inconnu	M		7 A21-48	1	1	0	
21	15/02/2021	A21-2209	f/p	3	3	0	0	5,2 rond	hétérogène	rugueux	arrondi	4623/8037 (radio pas jolie)	Inconnu	M		4 A21-2209	1	1	0	
22	23/02/2021	A21-2719	f/p	>10	>10	0	0	2,9 rond	homogène	rugueux	arrondi	2162/1909	Persan	M		5 A21-2719	1	1	0	
23	23/03/2021	A21-4213	f/p	>10	>10	1	0	2,8 rond	homogène	rugueux	arrondi	1843/1944	Scottish Fo M			4 A21-4213	1	1	0	
24	14/04/2021	A21-5448	f/p	1	1	0	0	10,9 pyramidal	homogène	rugueux	arrondi	8902/11294	Européen	F		10 A21-5448	1	0	1	
25	03/08/2021	A21-10745f/profil droit		5	3	0	2	3,6 irrégulier	hétérogène	rugueux	pointu	2130/1917	Persan	M	Inconnu	9 A21-10745	1	1	0	
26	03/08/2021	A21-10752f/profil droit		>10	>10	0	>10	0,8 rond	homogène	rugueux	arrondi	2007/1904	Européen	M		11 A21-10752	1	1	0	
27	10/01/2022	A22-416	profil droit	3	3	0	0	3,8 rond	homogène	lisse	arrondi	1524/2046	Sphynx	M		5 A22-416	1	1	0	
28	06/04/2022	A22-4991	f/profil gauche	1	1	0	0	6,3 spiculé	homogène	lisse	pointu	9579/9664	Européen	M		5 A22-4991	1	1	0	
29	11/04/2022	A22-7880	profil gauche/profil droit	4	4	0	0	5,8 ovoïde	homogène	rugueux	arrondi/pointu	1567/1894	Inconnu	M		5 A22-7880	1	1	0	
30	05/01/2023	A22-7591	profil droit	1	1	0	0	1,1 rond	homogène	lisse	arrondi	1360/1957	Européen	F		9 A22-7591	1	0	1	
31	15/06/2022	A15-6381	profil gauche/profil droit	>10	>10	1	0	3,4 facetté	homogène	lisse	arrondi	1365/1720	Européen	M		8 A15-6381	1	1	0	
32	25/07/2022	A23-10211f/profil droit		>10	>10	0	0	2,9 rond	homogène	rugueux	arrondi	1579/2004	Européen	M		7 A23-10211	1	1	0	
33	06/09/2022	A22-11702f/profil droit		>10	>10	2	0	2,6 rond	homogène	rugueux	arrondi	1277/1876	Européen	M		12 A22-11702	1	1	0	
34	03/11/2022	A22-15134f/profil gauche/profil droit		1	1	0	0	4,1 bosselé	homogène	lisse	arrondi	8730/10435	Européen	M		7 A22-15134	1	1	0	
35	24/11/2022	A22-2260	f/p	2	2	0	0	9,9 rond	hétérogène	rugueux	arrondi	utilisation radio face car profil	Européen	F		6 A22-2260	1	0	1	
36	05/12/2022	A22-16815f/profil droit + profil >10		>10	>10	0	0	3,2 rond	homogène	rugueux	arrondi	1651/1930	Européen	M		8 A22-16815	1	1	0	
37	29/12/2022	A22-17965f/profil gauche/profil droit		4	4	0	0	4,6 bosselé	hétérogène	rugueux	arrondi	5766/11035 (radio pas jolie)	Européen	M		5 A22-17965	1	1	0	
38	30/01/2023	A23-1501	profil gauche/profil droit	5	5	0	0	3,6 facetté	homogène	lisse	arrondi	1636/1869	Européen	M		6 A23-1501	1	1	0	
38	30/01/2023	A23-1501	profil gauche/profil droit	5	5	0	0	3,6 facetté	homogène	lisse	arrondi	1636/1869	Européen	M		6 A23-1501	1	1	0	
39	30/07/2020	A20-7981	p	1	0	0	1	3,7 bosselé	homogène	rugueux	arrondi	2347/1827	Européen	M		5 A20-7981	1	1	0	
40	07/06/2021	A21-8211	p	4	0	2	2	3,5 facetté	homogène	lisse	pointu	1852/1886	Persan	M		5 A21-8211	1	1	0	
41	07/06/2021	A21-8234	f/p	3	0	0	3	3,1 ovoïde	homogène	lisse	arrondi	2819/2860	Inconnu	M		2 A21-8234	1	1	0	
42	05/02/2021	A21-1585	f/profil droit	2	0	0	2	2,3 ovoïde	homogène	lisse	arrondi	10516/10628	Européen	M		8 A21-1585	1	1	0	
43	24/09/2021	A21-13048f/profil droit		>10	>10	0	0	1,5 rond	homogène	lisse	arrondi	4625/7975	Européen	M		12 A21-13048	1	1	0	
44	23/06/2020	A20-6429	f/p	1	0	0	1	2,7 rond	homogène	lisse	arrondi	1684/1845	Européen	M		4 A20-6429	1	1	0	
45	20/04/2016	A14-14315f/p		>10	>10	0	0	2,6 spiculé	homogène	rugueux	pointu	2389/2267	Persan	M		4 A14-14315	1	1	0	
46	21/01/2015	A15-835	f/p	>10	>10	3	0	6,8 irrégulier	homogène	lisse	pointu	1647/1921	Européen	M		8 A15-835	1	1	0	
47	07/02/2015	A08-4100	p	5	4	0	1	3,5 rond	homogène	lisse	arrondi	2229/2024	Européen	M		8 A08-4100	1	1	0	
48	04/10/2018	A15-5131	f/p	>10	>10	0	0	6,3 irrégulier	homogène	lisse	arrondi	1644/2012	Inconnu	F		6 A15-5131	1	0	1	
49	23/12/2015	A10-14263f/p		5	5	0	0	6,3 ovoïde	homogène	lisse	arrondi	1905/1953	Européen	M		5 A10-14263	1	1	0	
50	02/02/2016	A15-8046	f/p	>10	>10	0	1	5,7 bosselé	homogène	lisse	arrondi	1938/1830	Européen	M		5 A15-8046	1	1	0	
51	18/03/2016	A16-3591	f/p	>10	>10	9	2	0	4,7 ovoïde	homogène	lisse	arrondi	2392/1877	Inconnu	M		7 A16-3591	1	1	0
52	07/04/2016	A16-4758	profil droit	>10	>10	0	0	4 spiculé	hétérogène	rugueux	pointu	1552/1807	Européen	M		7 A16-4758	1	1	0	
53	23/10/2016	A15-14394p		>10	>10	0	0	3,1 spiculé	hétérogène	rugueux	pointu	1435/1990	Chartreux	M		5 A15-14394	1	1	0	
54	05/12/2016	A16-15163f/p		>10	>10	0	2	2 rond	hétérogène	rugueux	arrondi	1245/1851	Européen	M		14 A16-15163	1	1	0	
55	01/01/2017	A17-42	f/p	3	2	1	0	9,5 irrégulier	hétérogène	rugueux	arrondi	2307/2868	Européen	F		13 A17-42	1	0	1	
56	02/01/2017	A17-66	f/p	1	1	0	0	31,3 rond	hétérogène	lisse	arrondi	1955/1972	Européen	F		4 A17-66	1	0	1	
57	30/01/2017	A16-14752f/p		1	1	0	0	3,2 rond/facetté	homogène	rugueux	arrondi	2679/1912	Persan	F		10 A16-14752	1	0	1	
58	12/02/2017	A17-1874	f/p	2	2	0	0	6,7 bosselé	hétérogène	lisse	arrondi	1632/2001	Européen	F		4 A17-1874	1	0	1	
59	19/03/2017	A17-3498	f/p	2	2	0	0	12,7 rond	homogène	lisse	arrondi	1943/1983	Européen	F		10 A17-3498	1	0	1	
60	19/10/2017	A17-11947f/p		1	1	0	0	7,6 bosselé	hétérogène	rugueux	arrondi	2150/2000	Européen	M		6 A17-11947	1	1	0	
61	24/02/2020	A19-4905	f/p	>10	>10	0	7	3 irrégulier	homogène	rugueux	pointu	1526/1735	Exotic Shoi M			3 A19-4905	1	1	0	
62	22/03/2013	A04-9367	f/p	>10	>10	0	>10	2,8 irrégulier	homogène	rugueux	arrondi	2268/1875	Européen	M		11 A04-9367	1	1	0	
63	06/04/2015	A13-3683	f/p	2	2	0	0	9,7 bosselé	homogène	lisse	arrondi	1997/2097	Européen	F		18 A13-3683	1	0	1	
64	22/04/2015	A13-5108	f/p	>10	>10	0	>10	1 rond/facetté	homogène	rugueux	arrondi	1775/1932	Européen	M		17 A13-5108	1	1	0	
65	27/06/2019	A13-8241	f/p	2	2	0	0	5,5 irrégulier	homogène	lisse	pointu	2744/2409	Européen	F		6 A13-8241	1	0	1	
66	10/11/2019	A10-8982	f/p	3	3	0	0	2,3 pyramidal	homogène	lisse	arrondi	1912/1954	Inconnu	M		7 A10-8982	1	1	0	
67	26/02/2015	A15-2631	f/p	3	3	0	0	2 rond	homogène	lisse	arrondi	1880/1956	Européen	F		4 A15-2631	1	0	1	
68	27/04/2016	A16-5743	f/p	1	1	0	0	32,7 irrégulier	homogène	lisse	pointu	1455/1963	Européen	M		2 A16-5743	1	1	0	
69	17/05/2016	A16-6550	f/p	>10	>10	1	>10	2,2 facetté	homogène	lisse	arrondi	1761/2072	Européen	M		13 A16-6550	1	1	0	
70	04/06/2016	A16-7554	f/profil gauche	1	0	0	1	2,6 rond	homogène	rugueux	arrondi	2899/2894	Européen	M		3 A16-7554	1	1	0	
71	07/07/2016	A16-9219	f/p	>10	>10	0	0	2,6 facetté	homogène	lisse	arrondi	1673/2160	Européen	M		14 A16-9219	1	1	0	
72	02/11/2016	A09-935	p	>10	>10	0	0	3,5 rond	homogène	lisse	arrondi	1743/1813	Inconnu	F		10 A09-935	1	1	0	
73	10/03/2017	A17-2862	f/p	>10	>10	0	0	2,5 facetté	homogène	lisse	arrondi	2205/1913	Européen	M		3 A17-2862	1	1	0	
74	20/03/201																			

Annexe 2 : Code du programme réalisé au cours de l'étude rétrospective

```
[ ] !pip install pandas

[ ] from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

[ ] import pandas as pd

# Assuming the uploaded file's name is "these_thomas/features.csv"
df = pd.read_csv("/content/drive/MyDrive/these_thomas/features.csv",
                sep=";",
                skiprows=1)

# Display the DataFrame
df.head()

[ ] # Filter rows with more than 3 NaNs
rows_with_nans = df[df.isna().sum(axis=1) > 3]

rows_with_nans

[ ] # Create a new DataFrame without rows having more than 3 NaNs
df_cleaned = df[df.isna().sum(axis=1) <= 3]

df_cleaned

[ ] pd.set_option('max_colwidth', 99999)

# Create a new Series with sets of unique values for each row
row_sets = df_cleaned.drop(columns=["Date de la radio (dernière radio avant la cysto)", "N° cas", "Unnamed: 13", "Opacité (le plus volumineux)/centre de LS sur projection latérale dans la vessie", "Taille max (mm)"]).apply(
    lambda row: set(row), axis=1)

row_sets

[ ] for col in df_cleaned.drop(columns=["Date de la radio (dernière radio avant la cysto)", "N° cas", "Unnamed: 13", "Opacité (le plus volumineux)/centre de LS sur projection latérale dans la vessie", "Taille max (mm)"]):
    print(df_cleaned[col].value_counts())

[ ] df_cleaned.index = df_cleaned["N° cas"]
df_cleaned.head()

[ ] # Assuming the uploaded file's name is "these_thomas/labels.csv"
df_labels = pd.read_csv("/content/drive/MyDrive/these_thomas/labels.csv",
                       sep=";")

# Display the DataFrame
df_labels.head()

[ ] df_labels.index = df_labels["N° Dossier"]
df_labels.head()

[ ] df_labels_cleaned = df_labels[["Analyse disponible", "PAM", "OxCa", "Unate", "Apatite", "Protéines", "Mixtes"]]
df_labels_cleaned.head()

[ ] print("Number of rows: ", len(df_labels_cleaned))
df_labels_cleaned.apply(lambda col: list(col.unique()))

[ ] # Remove lines where analysis is not in [0, 1]
df_labels_filtered_disp = df_labels_cleaned[df_labels_cleaned['Analyse disponible'].isin([0, 1])]
print("Number of rows: ", len(df_labels_filtered_disp))
print(df_labels_filtered_disp.head())
print(list(df_labels_filtered_disp.index))
df_labels_filtered_disp.apply(lambda col: list(col.unique()))

[ ] # Remove lines where ['PAM', 'OxCa', 'Unate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes'] is not in [0, 1]
columns_to_filter = ['PAM', 'OxCa', 'Unate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
df_labels_filtered_cat = df_labels_cleaned[df_labels_cleaned[columns_to_filter].isin([0, 1]).all(axis=1)]
print("Number of rows: ", len(df_labels_filtered_cat))
print(df_labels_filtered_cat.head())
print(list(df_labels_filtered_cat.index))
df_labels_filtered_cat.apply(lambda col: list(col.unique()))
```

```

[ ] # Remove lines where none of ['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes'] is 1
columns_to_check = ['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
df_labels_filtered_cat = df_labels_filtered_cat[df_labels_filtered_cat[columns_to_check].isin([1]).any(axis=1)]
print("Number of rows: ", len(df_labels_filtered_cat))
print(df_labels_filtered_cat.head())
print(list(df_labels_filtered_cat.index))
df_labels_filtered_cat.apply(lambda col: list(col.unique()))

[ ] # Compare indexes between cat and analysis filterings

# Get the indices of each DataFrame
cat_indices = set(df_labels_filtered_cat.index)
analysis_indices = set(df_labels_filtered_disp.index)

# Identify indices that are in cat but not in analysis
only_in_cat = cat_indices - analysis_indices

# Identify indices that are in analysis but not in cat
only_in_analysis = analysis_indices - cat_indices

# Print out the results
print("Indices only in cat:", only_in_cat)
print("Indices only in analysis:", only_in_analysis)

[ ] df_labels_filtered_cat.loc['A21-1585']

[ ] df_labels.loc['A21-5448']

[ ] # Compare indexes between features and analysis filterings

# Get the indices of each DataFrame
features_indices = set(df_cleaned.index)
analysis_indices = set(df_labels_filtered_cat.index)

# Identify indices that are in features but not in analysis
only_in_features = features_indices - analysis_indices

# Identify indices that are in analysis but not in features
only_in_analysis = analysis_indices - features_indices

# Print out the results
print("Indices only in features:", only_in_features)
print("Indices only in analysis:", only_in_analysis)

[ ] to_remove = set([
    'A21-17333', # A sortir car pas bonne loc
    'A22-9712', # A sortir
    'A19-12780', # A sortir car pas visible à la radio
    'A18-1340', # A sortir car pas visible à la radio
    'A18-10468', # A sortir car pas de radio
    'A18-3438', # A sortir car pas de radio
    'A21-17829', # A sortir car pas de radio
    'A19-8605', # A sortir car pas bonne loc
    'A21-4897', # A sortir car non visible à la radio
    'A21-12081', # A sortir car pas bonne loc
    'A22-627', # A sortir car pas bonne loc
    'A20-4618', # A sortir car pas de radio
    'A19-6704', # A sortir car pas de radio
    'A15-10474', # A sortir car pas de radio
    'A14-14871', # A sortir car pas visible à la radio
    'A22-7623', # A sortir car pas bonne loc
    'A19-15494', # A sortir car pas bonne loc
    'A17-1831', # A sortir car pas visible à la radio
    'A13-11341', # A sortir car pas de radio
    'A19-8249', # A sortir car pas de radio
    'A13-11894' # A sortir car pas de radio
])

[ ] df_labels_filtered_cat = df_labels_filtered_cat[~df_labels_filtered_cat.index.isin(to_remove)]
print("Features: ", len(df_cleaned))
print("Labels: ", len(df_labels_filtered_cat))

[ ] df_cleaned.head()

[ ] df_labels_filtered_cat.head()

[ ] # Keep interesting cols and reorder df_labels rows to match df_features rows
df_train_features = df_cleaned.drop(columns=["Date de la radio (dernière radio avant la cysto)", "N° cas", "Unnamed: 13"])
df_train_labels = df_labels_filtered_cat.loc[df_train_features.index].drop(columns=["Analyse disponible"])

[ ] df_train_features.head()

[ ] class_names = list(df_train_labels.columns)
df_train_labels['labels'] = df_train_labels.apply(lambda row: row.argmax(), axis=1)
df_train_labels.head()

[ ] # Extracting the label column into a new dataframe
df_train_labels = df_train_labels[['labels']]
df_train_labels.head()

[ ] df_train_features['Opacité (le plus volumineux)'] = df_train_features["Opacité (le plus volumineux)/centre de LS sur projection latérale dans la vessie"].apply(lambda x: x.split("/")[0])
df_train_features["Opacité centre de LS sur projection latérale dans la vessie"] = df_train_features["Opacité (le plus volumineux)/centre de LS sur projection latérale dans la vessie"].apply(lambda x: x.split("/")[1])
df_train_features.head()

[ ] df_train_features = df_train_features.drop(columns=["Opacité (le plus volumineux)/centre de LS sur projection latérale dans la vessie"])
df_train_features

[ ] from sklearn.preprocessing import OneHotEncoder
import numpy as np

```

```

[ ] mean_val = df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"][~df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"].isin(['Non visible', '1931 (face utilisée)', '803'])
print(mean_val)

[ ] df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"][df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"]=="Non visible"] = round(mean_val)
df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"][df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"]=="1931 (face utilisée)"] = 1931
df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"][df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"]=="8037 (radio pas jolie jolie)"] = 8037
df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"][df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"]=="11035 (radio pas jolie)"] = 11035
df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"] = df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"].astype(float)

[ ] df_train_features["Opacité (le plus volumineux)"][df_train_features["Opacité (le plus volumineux)"]=="utilisation radio face car profil superposition : 1512"] = round(1512)
df_train_features["Opacité (le plus volumineux)"] = df_train_features["Opacité (le plus volumineux)"].astype(float)

[ ] df_train_features["Opacité rapport"] = df_train_features["Opacité (le plus volumineux)"] / df_train_features["Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"]
df_train_features = df_train_features.drop(columns=["Opacité (le plus volumineux)", "Opacité centre de L5 sur projection latérale dans la vessie"])

[ ] df_train_features["Vessie (nombre)"][df_train_features["Vessie (nombre)"]==">10"] = round(10)
df_train_features["Vessie (nombre)"] = df_train_features["Vessie (nombre)"].astype(float)

[ ] df_train_features["Urèthre pénien (nombre)"][df_train_features["Urèthre pénien (nombre)"]==">10"] = round(10)
df_train_features["Urèthre pénien (nombre)"] = df_train_features["Urèthre pénien (nombre)"].astype(float)

[ ] df_train_features["Taille max (mm)"] = df_train_features["Taille max (mm)"].apply(lambda x: x.replace(',','').astype(float))

[ ] df_train_features["Urèthre pelvien (nombre)"][df_train_features["Urèthre pelvien (nombre)"]==">10"] = round(10)
df_train_features["Urèthre pelvien (nombre)"] = df_train_features["Urèthre pelvien (nombre)"].astype(float)

[ ] df_train_features["Nombre total de calculs"][df_train_features["Nombre total de calculs"]==">10"] = round(10)
df_train_features["Nombre total de calculs"][df_train_features["Nombre total de calculs"]=="1 ou 6 si HAU"] = round(1)
df_train_features["Nombre total de calculs"] = df_train_features["Nombre total de calculs"].astype(float)

[ ] cat_columns = ['Projections radiographiques', 'Forme (rond, ovoïde, bosselé, pyramidal, irrégulier, facetté (spiculé ?)', 'Internal pattern (homogène, hétérogène)', 'Contours (lisses/rugueux)', 'Bords (contendant/ pointus)']
df_train_features_cat = df_train_features[cat_columns]
df_train_features_num = df_train_features[[col for col in df_train_features.columns if col not in cat_columns]]

[ ] df_train_features_cat.head()

[ ] df_train_features_num.head()

[ ] enc = OneHotEncoder(handle_unknown='ignore')
enc.fit(df_train_features_cat)
print(enc.categories_)

[ ] X_cat = enc.transform(df_train_features_cat).toarray()
print(X_cat[0:2], X_cat.shape)
X_num = df_train_features_num.to_numpy()
print(X_num[0:2], X_num.shape)
X = np.hstack((X_cat, X_num))
print(X[0:2], X.shape)
X2 = X[:,23:24]
xtrain = X2

[ ] names = [x for y in enc.categories_ for x in y] + [col for col in df_train_features.columns if col not in cat_columns]
names2 = names[23:24]
print(names, len(names))

```

Training

```

[ ] from sklearn.ensemble import (
    AdaBoostClassifier,
    ExtraTreesClassifier,
    RandomForestClassifier,
)
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
from sklearn.metrics import confusion_matrix, classification_report, accuracy_score, f1_score
import numpy as np

[ ] y = df_train_labels.to_numpy().reshape(-1,)

[ ] clf = AdaBoostClassifier(DecisionTreeClassifier(max_depth=1, min_samples_leaf=3), n_estimators=1)
clf = clf.fit(xtrain, y)

# Print accuracy
print("Accuracy:", clf.score(xtrain, y))

# Print feature importance
feature_importance = {k: v for k, v in sorted((name:clf.feature_importances_[i] for i, name in enumerate(names2)).items(), key=lambda item: item[1], reverse=True)}
print("Feature Importance:", feature_importance)

def print_multiclass_metrics(y_true, y_pred, labels):
    cm = confusion_matrix(y_true, y_pred, labels=labels)
    print("Confusion Matrix:")
    print(class_names)
    print(cm)

    TP = np.diag(cm)
    FP = cm.sum(axis=0) - TP
    FN = cm.sum(axis=1) - TP
    TN = cm.sum() - (FP + FN + TP)

```

```

print("\nTP for each class:", TP)
print("\nFP for each class:", FP)
print("\nFN for each class:", FN)
print("\nTN for each class:", TN)

# Additional Metrics
print("\nOverall Accuracy:", accuracy_score(y_true, y_pred))
print("\nMicro F1 Score:", f1_score(y_true, y_pred, average='micro'))
print("\nMacro F1 Score:", f1_score(y_true, y_pred, average='macro'))
print("\nWeighted F1 Score:", f1_score(y_true, y_pred, average='weighted'))

report = classification_report(y_true, y_pred, target_names=labels, output_dict=True)
for label in labels:
    print(f"\nMetrics for class {label}:")
    print("Precision:", report[label]['precision'])
    print("Recall:", report[label]['recall'])
    print("F1 Score:", report[label]['f1-score'])
    print("Support:", report[label]['support'])

# Define class labels
labels = list(set(y))

import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.tree import plot_tree

# Check if the classifier has estimators and visualize the first tree
for idx, estimator in enumerate(clf.estimators_):
    plt.figure(figsize=(30,20))
    plot_tree(estimator, filled=True, feature_names=names2, rounded=True)
    plt.title("Decision tree from AdaBoost ensemble")
    plt.show()

```

```

[] from sklearn.tree import _tree

sample_id = 0
decision_paths, _ = clf.decision_path(X[sample_id].reshape(1, -1))
decision_paths = decision_paths.toarray()

# Print the sample with feature names
sample = X[sample_id]
print("Sample:")
for feature, value in zip(names, sample):
    print(f"{feature}: {value}")

# Print true label
true_label = df_train_labels.to_numpy()[sample_id]
print("\nTrue label:")
for feature, value in zip(df_train_labels.columns, true_label):
    print(f"{feature}: {value}")

# Predicted label
predicted_label = clf.predict(X[sample_id].reshape(1, -1))
print(f"\nPredicted label: {predicted_label}")

# Extract and print decision path
def extract_path(tree, sample_id):
    """Extract decision path of a sample for a tree."""
    tree_ = tree.tree_
    feature_name = [
        names[i] if i != tree_.TREE_UNDEFINED else "undefined!"
        for i in tree_.feature
    ]
    path = "Decision path:\n"
    node = 0
    while node != tree_.children_left[node] and node != tree_.children_right[node]: # while not a leaf
        if decision_paths[0, node]: # change from sample_id to 0 here
            threshold = tree_.threshold[node]
            if X[sample_id, tree_.feature[node]] <= threshold:
                path += f"> (Node {node}) Feature {feature_name[node]} <= {threshold}\n"
                node = tree_.children_left[node]
            else:
                path += f"> (Node {node}) Feature {feature_name[node]} > {threshold}\n"
                node = tree_.children_right[node]
        else:
            node = tree_.children_right[node] if node == tree_.children_left[node] else tree_.children_left[node]
    return path

# Get decision path for each tree
for idx, tree in enumerate(clf.estimators_):
    print(f"\nTree {idx}:")
    print(extract_path(tree, sample_id))
    print("-" * 40)

```

Annexe 3 : Arbres de décision à 6 feuilles et au moins 3 échantillons par critères, matrice de confusion associée et importance des critères

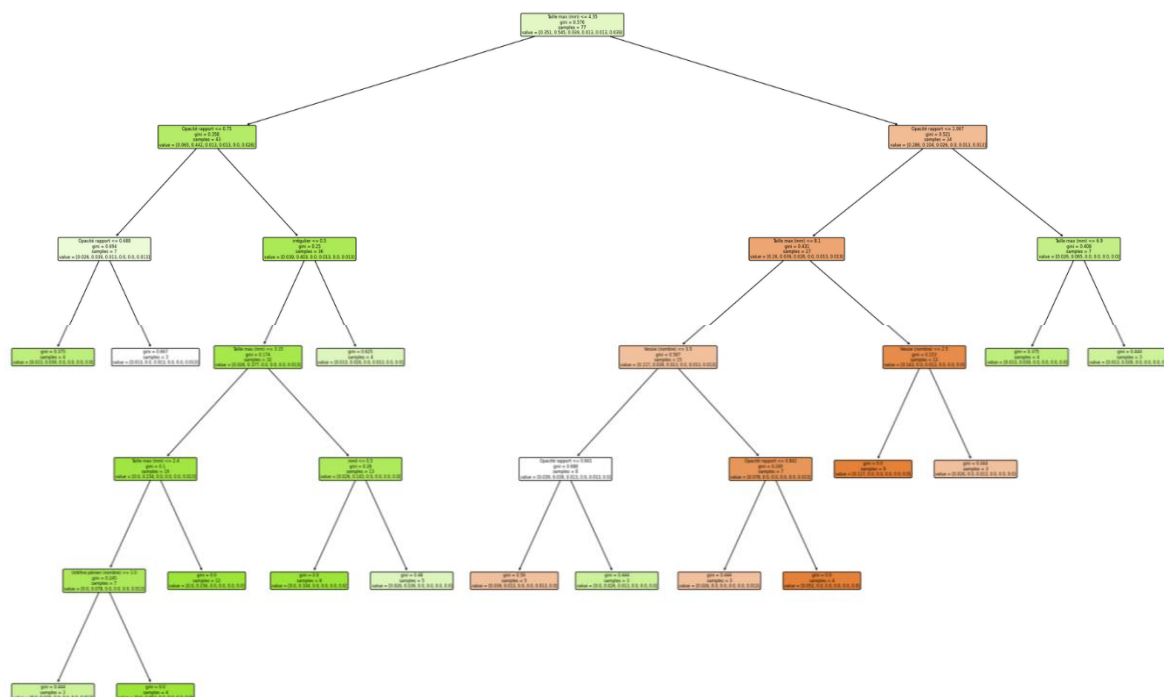


Figure Annexe 3 : Arbre de décision à 6 feuilles et au moins 3 échantillons pour tous les critères

Confusion Matrix:

	'PAM'	'OxCa'	'Urate'	'Apatite'	'Protéines'	'Mixtes'
'PAM'	21	6	0	0	0	0
'OxCa'	1	41	0	0	0	0
'Urate'	2	1	0	0	0	0
'Apatite'	0	1	0	0	0	0
'Protéines'	1	0	0	0	0	0
'Mixtes'	2	1	0	0	0	0

Figure Annexe 4 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 6 feuilles et au moins 3 échantillons pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude

Dans cet arbre l'importance estimée des différentes caractéristiques radiographiques des calculs de l'échantillon dans la prédiction de leur nature minérale est comme suit :

- Taille max (mm) : Participe à 51% de la prédiction,
- Le rapport des opacités entre celle du calcul le plus volumineux et la partie caudale du corps vertébral de L5 : participe à 39% de la prédiction,
- Le nombre de calculs dans la vessie : participe à 8% de la prédiction,
- La forme ronde des calculs : participe à 4% de la prédiction,
- La forme irrégulière des calculs : participe à 4% de la prédiction,
- Le nombre de calculs dans l'urètre pénien participe à 1.5% de la prédiction,
- Le contenu hétérogène du calcul participe à 0.1% de la prédiction,
- Les autres critères ne participent pas à la prédiction

Nous pouvons lire sur la matrice de confusion que si l'on applique cet arbre à notre échantillon, nous classons correctement 21 calculs de PAM (sensibilité = 0.78, spécificité = 0.78, F1 score = 0.78) et 41 calculs de CaOx (sensibilité = 0.82, spécificité = 0.98, F1 score = 0.89) soit 80% des calculs au total (F1 score = 0.76).

Annexe 4 : Arbres de décision à 6 feuilles et au moins 1 échantillon par critères, matrice de confusion associée et importance des critères

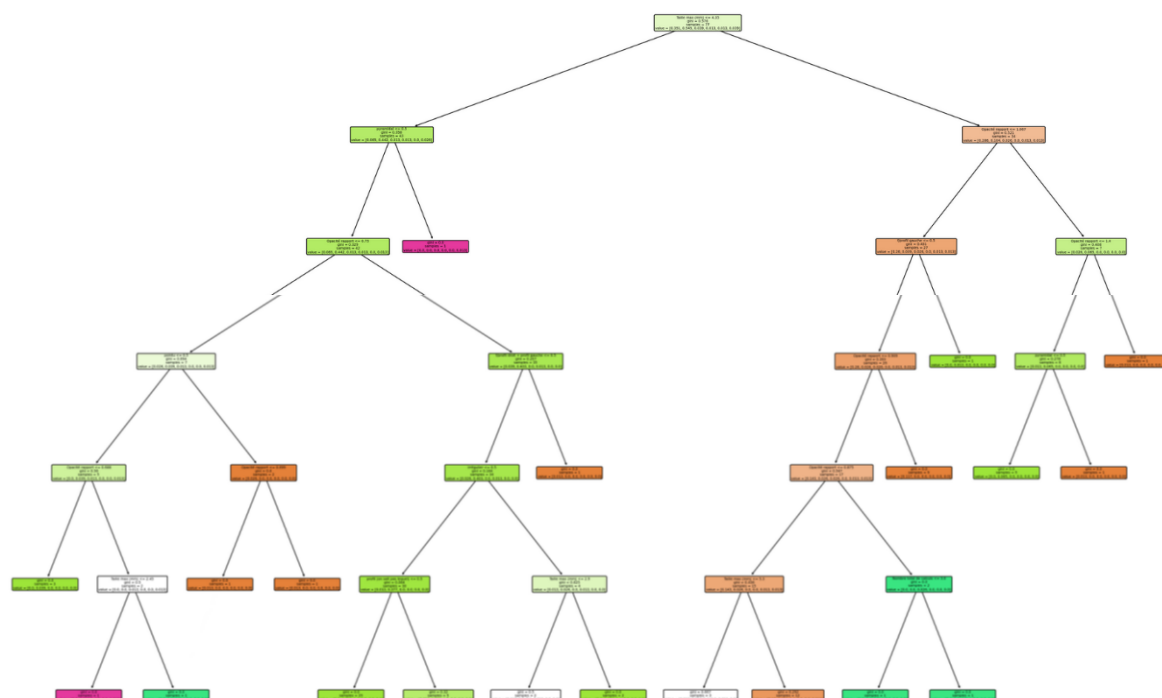


Figure Annexe 5 : Arbre de décision à 6 feuilles et au moins 1 échantillon pour tous les critères

```
Confusion Matrix:
['PAM', 'OxCa', 'Urate', 'Apatite', 'Protéines', 'Mixtes']
[[26 1 0 0 0 0]
 [ 2 40 0 0 0 0]
 [ 0 0 3 0 0 0]
 [ 1 0 0 0 0 0]
 [ 1 0 0 0 0 0]
 [ 1 0 0 0 0 2]]
```

Figure Annexe 6 : Matrice de confusion associée à un arbre de décision à 6 feuilles et au moins 1 échantillon pour chaque critère au sein de l'arbre après exécution du programme sur tous les critères analysés dans notre étude

Dans cet arbre l'importance estimée des différentes caractéristiques radiographiques des calculs de l'échantillon dans la prédiction de leur nature minérale est comme suit :

- Taille max (mm) : participe à 45% de la prédiction,
- Le rapport des opacités entre celle du calcul le plus volumineux et la partie caudale du corps vertébral de L5 : participe à 36% de la prédiction,
- La forme pointue des calculs : participe à 7% de la prédiction,
- La forme pyramidale des calculs : participe à 4% de la prédiction,
- La forme spiculée des calculs : participe à 4% de la prédiction,
- La forme irrégulière des calculs : participe à 3% de la prédiction,
- Les autres critères ne participent pas à la prédiction

Nous pouvons lire sur la matrice de confusion que si l'on applique cet arbre à notre échantillon, nous classons correctement 26 calculs de PAM (sensibilité = 0.96, spécificité = 0.84, F1 score = 0.90), 40 calculs de CaOx (sensibilité = 0.95, spécificité = 0.98, F1 score = 0.96), 3 calculs d'urates (sensibilité = 1, spécificité = 1, F1 score = 1) et 2 calculs mixtes (sensibilité = 0.7, spécificité = 1, F1 score = 0.8) soit 92% des calculs au total (F1 score = 0.91)

ÉTUDE DE LA PRÉDICTIBILITÉ DE LA NATURE DES UROLITHES DU BAS APPAREIL URINAIRE CHEZ LE CHAT EN FONCTION DES IMAGES RADIOGRAPHIQUES

AUTEUR : Thomas DALMON

RÉSUMÉ :

Les urolithiases du bas appareil urinaire félin (BAUF) représentent une grande partie des affections graves du bas appareil urinaire chez le chat. Il est ainsi essentiel de les traiter au plus vite et de prévenir leurs récurrences. Le traitement de choix était historiquement chirurgical, cependant les traitements médicaux ainsi que les thérapies de dissolution se sont démocratisés ces dernières années. Il existe plusieurs types minéraux de calculs, chacun admettant sa spécificité thérapeutique. Il apparaît alors important d'être capable de prédire la nature minérale de chaque calcul afin d'éviter autant que possible un traitement invasif non nécessaire. L'objectif de cette étude est d'étudier cette prédictibilité au travers des caractéristiques radiographiques des types de calculs. Pour ce faire nous avons étudié 77 chats ayant eu une cystotomie à l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort entre avril 2013 et janvier 2023 dans un contexte de calcul du BAUF. Puis nous avons programmé une intelligence artificielle qui étudie des corrélations entre un ou plusieurs critères radiographiques et la nature minérale des calculs afin d'en établir une démarche prédictive. Ainsi les calculs d'oxalates de calcium sont différenciables des autres types de calculs par leur opacité élevée par rapport à la partie caudale du corps vertébral de la cinquième vertèbre lombaire (plus fréquemment supérieur à 0.858), leur petite taille (plus fréquemment inférieure à 4.35 mm) et leur contenu homogène. Les calculs de struvite sont plus fréquemment de taille supérieure à 4.35 mm. L'algorithme est capable de prédire correctement 78% à 92% des types minéraux des calculs des chats de notre échantillon. Aucune comparaison n'est possible concernant le chat dans la littérature. Cette précision dépasse les résultats obtenus jusqu'ici chez le chien, que ce soit *in vivo* ou lors d'études sur fantômes de vessie. Des études prospectives comparant des différences temporelles et géographiques des populations ainsi que des lectures radiographiques effectuées par un vétérinaire généraliste et un spécialiste en imagerie médicale vétérinaire pourraient être intéressantes afin de confirmer et d'explorer nos résultats.

MOTS CLÉS : UROLITHIASE / CALCUL URÉTRAL / CALCUL VÉSICAL / PRÉDICTION / RADIOGRAPHIE / DISSOLUTION / INTELLIGENCE ARTIFICIELLE / CHAT / ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE D'ALFORT

JURY :

Présidente : Pr MAUREY-GUÉNEC Christelle

Directeur de thèse : Dr MORTIER Jérémy

Examineur : Pr MANASSERO Mathieu

STUDY OF THE PREDICTABILITY OF THE NATURE OF UROLITHS OF THE LOWER URINARY TRACT IN CATS AS A FUNCTION OF RADIOGRAPHIC IMAGES

AUTHOR: Thomas DALMON

SUMMARY:

Feline lower urinary tract urolithiasis (LUT) accounts for a large proportion of serious lower urinary tract diseases in cats. It is essential to treat them as soon as possible and prevent their recurrence. Historically, the treatment of choice was surgical, but medical treatments and dissolution therapies have become increasingly popular in recent years. There are several mineral types of calculus, each with its own specific therapeutic approach. It is therefore important to be able to predict the mineral nature of each stone in order to avoid unnecessary invasive treatment. The aim of this study was to investigate this predictability through the radiographic characteristics of stone types. We studied 77 cats who had undergone a cystotomy at the National Veterinary School of Alfort between June 2013 and January 2023 in a LUT lithiasis context. We then programmed an artificial intelligence system to study correlations between one or more radiographic criteria and the mineral nature of the stones, in order to establish a predictive approach. Calcium oxalate calculi are differentiated from other types of calculi by their high opacity relative to the caudal part of the vertebral body of the fifth lumbar vertebra (more frequently greater than 0.858), their small size (more frequently less than 4.35 mm) and their homogeneous content. Struvite stones are more frequently larger than 4.35 mm. The algorithm is able to correctly predict 78% to 92% of the mineral types of the stones in the cats in our sample. No comparison is possible for cats in the literature, but this accuracy exceeds the results obtained to date for dogs, either in vivo or in studies performed on bladder phantom. A prospective study comparing populations geographically and temporally different, as well as radiographic readings by a general veterinarian and one by a specialist in veterinary medical imaging, could be of interest to confirm and explore our results.

KEYWORDS: UROLITHIASIS / URETERAL CALCULI / BLADDER CALCULI / PREDICTION / RADIOGRAPHY / DISSOLUTION / ARTIFICIAL INTELLIGENCE / CAT / NATIONAL VETERINARY SCHOOL ALFORT

JURY:

Chairperson: Pr MAUREY-GUÉNEC Christelle

Thesis Director: Dr MORTIER Jérémy

Reviewer: Pr MANASSERO Mathieu