

Rapport présenté en vue de l'obtention du
MASTER 1 IEAP
BIO-INGENIERE DES TISSUS ET DES IMPLANTS

Institut des Sciences du Mouvements

Étude allométrique sur l'articulation du coude chez les quadrupèdes

présenté par

ROUSSEL Paul

Sous la direction de
ARROYAVE TOBON Santiago

Année 2020-2021

Table des matières

1. Introduction.....	2
1.1. Présentation de la structure d'accueil.....	2
1.2. Missions et objectifs du stage.....	2
2. Cadre théorique.....	2
2.1. La notion de Bio-inspiration.....	3
2.2. Analogie entre articulation et mécanique.....	4
2.3. Allométrie.....	5
2.4. Problématique et Hypothèses.....	6
3. Matériels et méthodes.....	7
3.1. Échantillons.....	7
3.2. Matériels.....	8
3.3. Procédure.....	8
3.3.1. Construction de la Base de données.....	9
3.3.2. Analyse en Composantes Principales.....	10
4. Résultats.....	11
4.1. Base de Données.....	11
4.2. Résultats de L'Analyse en Composantes Principales.....	12
4.3. Résultats des corrélations.....	14
4.3.1. Variable Masse & Dimensions de l'articulation.....	15
4.3.2. Variable Puissance & Dimensions de l'articulation.....	16
4.3.3. Relation entre les variables de dimension de l'articulation.....	17
5. Discussion et Conclusion.....	19
6. Bibliographie.....	21
7. Annexes.....	23

1. Introduction

1.1. Présentation de la structure d'accueil

Le stage de Master 1 d'une durée de deux mois a été effectué au sein de l'Institut des sciences du mouvement (ISM). Plus précisément au sein de l'équipe de Conception Bio-inspirée (CBI). Cette équipe est basée à l'IUT d'Aix-en-Provence. L'objectif de cette équipe de recherche est de s'inspirer de la nature, des espèces vivantes ou fossilisées possédant des caractéristiques façonnées par la nature durant des millions d'années. Les travaux de recherches s'axent autour de problématique liant Biologie et Mécanique.

Ce stage est encadré par un enseignant-chercheur : M. Arroyave Tobon Santiago

1.2. Missions et objectifs du stage

Lors de ce stage, il m'a été demandé de réaliser une revue de la littérature afin d'exposer le contexte du problème étudié. La réalisation de traitements d'images ainsi que de traitements statistiques a été effectués. Une présentation orale a également été effectuée devant l'équipe de recherche CBI afin de présenter les avancées de l'étude. L'ensemble de ces missions avaient pour objectif d'acquérir des savoirs et savoir-faire dans le domaine de la recherche. L'acquisition de ces compétences s'est effectuée autour d'un sujet de recherche dont le but est d'étudier l'existence de relation entre des caractéristiques physiques de l'animal et les dimensions de l'extrémité distale de l'humérus.

2. Cadre théorique

A ce jour, parmi les millions d'espèces présentes sur Terre, les scientifiques ont décrit environ 953 000 espèces animales (**Mora & al, 2011**). La diversité génétique a donné aux organismes vivants la capacité d'évoluer aux fils des années. Cette diversité peut être représentée par la variété génétique au sein d'une même espèce. Si une mutation apparait chez un individu, lui permettant d'acquérir une caractéristique propice à sa survie, il aura plus de chance de survivre et de se reproduire, transmettant ainsi cette mutation à sa progéniture (**Merlin, 2011**). En d'autres termes, nous pouvons dire que la diversité génétique est la réponse qui a permis aux organismes vivants de s'adapter aux contraintes, changeantes et instables, de l'environnement. Ainsi les espèces, que nous observons à notre époque, sont le fruit de millions d'années d'évolutions.

Cette évolution a perfectionné le système des espèces leur permettant d'évoluer et d'interagir de manière efficiente au sein de leurs environnements. La nature est donc devenue une source d'inspiration pour la communauté scientifique.

2.1. La notion de Bio-inspiration

Les questionnements scientifiques visent la découverte de nouveaux matériaux ou la compréhension de systèmes biologiques. L'objectif étant de pouvoir appliquer ces principes biologiques lors de la conception et la fabrication de nouveaux matériaux, offrant de nouvelles fonctionnalités ou des performances accrues.

Par exemple, l'araignée peut fabriquer des toiles continues, insolubles et légères pour capturer ses proies. Elles produisent différents types de soies pour différents usages, qui peuvent résister à la pluie, au vent et à la lumière du soleil. En imitant l'araignée, on a fabriqué de la soie artificielle. Les fibres obtenues sont solides et légères. De nombreuses applications pluridisciplinaires sont envisageables. Notamment comme tendons et ligaments artificiels biocompatibles, sutures ophtalmiques biodégradables, pour le domaine de la santé, ou bien comme lignes de pêche très résistantes, pour le domaine maritime (Wang, Naleway & Wang, 2020). Dans cet exemple, il est question d'un matériau fonctionnel bio-inspiré.

De plus, nous pouvons voir des matériaux biologiques qui présentent des propriétés mécaniques supérieures tout en étant légers et solide. L'obtention d'une résistance élevée combinée à un faible poids réside dans les structures diverses et hiérarchiques de ces matériaux. Ces structures constituent une source d'inspiration inestimable pour le développement de nouveaux matériaux. Les matériaux structurels cellulaires, tels que le nid d'abeille, l'os spongieux et l'os de seiche sont des matériaux légers dotés d'une bonne résistance (Wang, Naleway & Wang, 2020). La reproduction de structure en nid d'abeille bio-inspirée, possède une résistance mécanique élevée, une faible densité et une excellente stabilité thermique. Cette structure est considérée comme ayant de nombreuses applications dans les domaines de l'ingénierie tissulaire, des matériaux aéronautiques et bien d'autres (Wang, Naleway & Wang, 2020). En complément de l'exemple donné précédemment, il est question ici d'un matériaux structurel bio-inspiré. L'élaboration de matériaux, systèmes et modèles sont les aboutissements majeurs de la bio-inspiration.

2.2. Analogie entre articulation et mécanique

Dans une logique de conception, les problématiques telles que celles de transmission d'efforts ou encore de réponses à des contraintes sont prédominantes.

Pour répondre à ces problématiques il est possible de faire une analogie avec les articulations. Les articulations sont les structures qui assurent la mobilité du squelette et lui permet d'effectuer des mouvements transmis par les muscles (notion de transmission d'efforts). L'articulation est une structure qui a été formée pour répondre efficacement aux contraintes subies (notion de réponse aux contraintes). Ce phénomène de structuration est régi par la notion de morphogénèse. La morphogénèse correspond à l'ensemble des lois qui déterminent la forme, la structure des tissus et des organes. Celle-ci est dépendante de deux facteurs primordiaux (**Heegaard, Beaupré & Carter, 1999**). Le premier fait référence à la croissance que l'on peut qualifier de "biologique". De manière innée, la nature prédétermine la croissance, l'emplacement ainsi que la forme de nos tissus et de nos organes. Le deuxième facteur quant à lui fait référence à la croissance dite "mécano-biologique". Soumis à des contraintes issues de l'environnement et de la croissance des autres structures, des forces vont se créer et agir sur la formation initiale des tissus. Il y aura ainsi un formatage des structures permettant de répondre efficacement aux contraintes. En effet, il a été montré que l'immobilisation d'embryons de poussins, empêchant ainsi la création de forces extérieures, modifie le modelage de l'articulation comparée à la forme finale sans expérimentation (**Roddy, Prendergast & Murphy, 2011**).

Il existe donc un lien entre la morphologie de l'articulation (sa forme) et sa fonction, la forme de celle-ci est liée à son degré de liberté et à sa capacité de transmission d'effort notamment. En effet, l'articulation de l'épaule et l'articulation de la hanche, semblables à une liaison rotule se distinguent de l'articulation du coude et de l'articulation du genou semblable cette fois-ci à une liaison pivot (*Figure 1*).

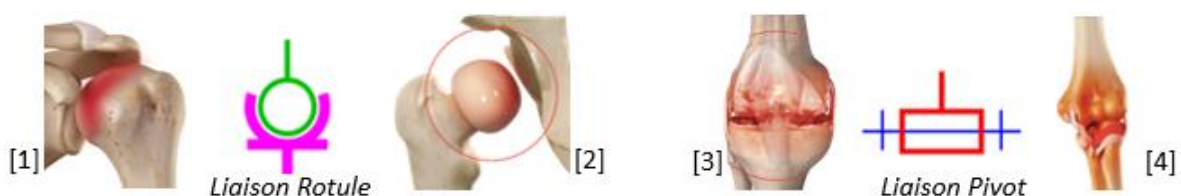


Figure 1 : Représentation de l'articulation de l'épaule [1], de la hanche [2]; du genou [3] et du coude [4] en lien avec leur analogie en termes de liaisons mécaniques. (Sources photographiques en Annexe 5).

On observe la forme sphérique de la tête humérale et de la tête fémorale permettant une gamme de mouvement dans l'axe vertical, transversal ainsi que dans l'axe antéro-postérieur (respectivement mouvements de rotation, mouvements de flexion-extension, mouvements d'abduction-adduction).

Cette forme et cette mobilité diffèrent de l'articulation du coude et du genou, qui se définissent par des surfaces légèrement concave et convexes permettant des mouvements dans le seul axe transversal (mouvements de flexion et d'extension).

Dans cette optique de structuration ainsi que de lien entre morphologie et fonction de l'articulation, il serait intéressant de voir s'il existe des relations entre les dimensions de l'articulation et d'autres caractéristiques.

2.3. Allométrie

Afin de pouvoir trouver des relations, il est nécessaire d'observer l'environnement qui nous entoure dans le but de découvrir des données intéressantes. Pour ce faire, il est possible d'utiliser un outil que l'on nomme "Allométrie". En biologie du développement, l'allométrie fait référence à l'idée que les organes, tissus ou processus croissent à des vitesses différentes. On suppose que ces phénomènes sont régis par des lois mathématiques. Une étude allométrique a pour objectif de décrire ces relations biologiques. Des relations biologiques faisant références à des traits morphologiques tels que l'étude de la taille du cerveau en fonction de la taille du corps. (**Mora, Tittensor, Adl, Simpson & Worm, 2011**). Ou bien à des traits physiologiques tels que les caractéristiques du métabolisme en fonction de la taille du corps (**Simmen, Pasquet & Hladik, 2014**). Enfin, il est également possible de décrire des traits que l'on peut qualifier d'écologiques telles que la relation entre la performance locomotrice, la forme et la taille des organismes (**Labrecque, 2010**).

Des études portant sur l'étude allométrique d'une articulation ont déjà été mené. En effet, **Sharon M. Swartz** démontre à travers une étude (1989) axée sur la surface des articulations chez les primates, que la conception de celle-ci est dictée notamment par les exigences imposées par le support du poids. Il montre également que les surfaces articulaires sont fortement corrélées avec la taille du corps. Une scientifique, **Michelle S.M. Drapeau** (2008) a étudié la morphologie de l'encoche trochléaire du coude des hominoïdes existants et des hominoïdes fossiles pour quantifier les différences de l'articulation liées à des variations dans l'utilisation ou la charge des membres supérieurs. Elle montra notamment que les singes qui pratiquent la locomotion

terrestre sont caractérisés par des articulations distales étendues afin de fournir une plus grande surface articulaire aux charges subies pendant la locomotion.

Cette différenciation des caractéristiques de l'articulation, qui survient avec les variations de comportements, est appuyé par les travaux de **Ki Andersson** (2004). Il étudia la forme de l'articulation distale de l'humérus dans le but d'explorer l'utilisation du membre antérieur dans l'acquisition de proies et comme guide de ce comportement chez les carnivores fossiles. Il montra que la morphologie des articulations du coude permet de distinguer les comportements (embuscade vs poursuite).

A travers la littérature, on se rend compte que la structure des articulations possède des liens étroits avec des caractéristiques biologiques. En effet on peut noter l'existence d'une relation allométrique entre le rayon de la tête fémorale et la masse de l'animal (**Doube & al , 2011**). Ainsi il est intéressant de se poser la question : Existe-t-il des relations entre les articulations, plus précisément les dimensions articulaires (**Senturia, 1995**) et des caractéristiques physiques tels que la vitesse ou la puissance par exemple. De plus, dans la majorité des études scientifiques, les espèces étudiées font partie de la même famille ou du même ordre animal. Et donc existe-t-il des relations plus générales que l'on peut qualifier d'inter-espèce ?

2.4. Problématique et Hypothèses

L'existence de lien, entre des dimensions et des caractéristiques physiques, pourrait avoir une application dans le domaine industriel et notamment en mécanique. En effet, l'explication de ces relations nous donnerait la possibilité de comprendre davantage le lien entre formes et fonction. Ceci ayant comme application directe le prédimensionnement des liaisons mécaniques notamment. Ainsi nous allons réaliser une étude allométrique de l'articulation du coude chez les quadrupèdes. Nous avons choisi de nous focaliser sur l'articulation du coude et plus précisément l'extrémité distale de l'humérus en raison de sa similarité avec une liaison pivot pour reprendre les termes industriels. Sachant que la liaison pivot est une liaison fortement représentée dans le milieu mécanique, il paraît judicieux de se focaliser sur celle-ci dans un premier temps.

Notre étude s'axera donc autour du questionnement suivant : **les dimensions de l'extrémité distale de l'humérus est-elle corrélée aux caractéristiques de masse, de vitesse et de puissance chez les mammifères quadrupèdes ?**

Pour répondre à ce questionnaire, nous allons répertorier des caractéristiques physiques tels que la masse, la vitesse et la puissance de différentes espèces.

En ce qui concerne nos variables dépendantes, nous allons mesurer pour chaque espèce étudiée les dimensions suivantes de l'extrémité distale de l'humérus : le rayon moyen, la longueur ainsi que le rayon maximal et minimal.

Cette étude à une visée exploratoire, on veut observer comme interagissent certains facteurs entre eux. Nous pouvons néanmoins supposer une relation entre la masse et les dimensions articulaires en raison des travaux déjà publiés dans la littérature. De plus, en raison du phénomène de morphogénèse, nous pouvons attendre des relations entre les variables relatives aux dimensions articulaires (Rayons moyen, Longueur, Rayon maximal et Rayon minimal)

3. Matériels et méthodes

3.1. Échantillons

La méthodologie prendra en compte 41 espèces différentes. Les espèces appartiennent à quatre ordres différents, les espèces sont réparties de la manière suivante : 14 Cetartiodactyla, 16 Carnivora, 4 Perissodactyla, 5 Rodentia, 1 Marsupiale et 1 Proboscidea.

Les espèces étudiées représentent un large éventail des espèces présentes sur terre allant du surmulot (*Rattus norvegicus*) jusqu'à l'éléphant (*Loxodonta Africana*) (*Figure 2*).



Figure 2 : [1] *Loxodonta Africana* [2] *Panthera Pardus* [3] *Lutra Lutra* [4] *Panthera Leo* [5] *Rhinoceros Unicornis* [6] *Canis Lupus* [7] *Ovis Aries* [8] *Crocota Crocuta* [9] *Vulpes Vulpes* [10] *Cavia Porcellus* [11] *Gazella Subgutturosa* [12] *Equus Caballus* [13] *Ursus Arctos* [14] *Sus Scrofa* [15] *Meles Meles* [16] *Acinonyx Jubatus* [17] *Canis Mesomelas* [18] *Bison Bison* [19] *Phacochoerus Aethiopicus* [20] *Sus Domesticus* [21] *Bos Taurus* [22] *Caracal Caracal* [23] *Gulo Gulo* [24] *Lycaon Pictus* [25] *Hippopotamus Amphibius* [26] *Giraffa Camelopardalis* [27] *Diceros Bicornis* [28] *Alces Alces* [29] *Connochaetes Gnou* [30] *Syncerus Caffer* [31] *Ceratotherium Simum* [32] *Antilocapra Americana* [33] *Ovis Canadensis* [34] *Ursus Americanus* [35] *Canis Latrans* [36] *Marmota Monax* [37] *Sciurus Niger* [38] *Procyon Lotor* [39] *Erethizon Dorsatum* [40] *Rattus Norvegicus* [41] *Didelphis Virginiana* (Sources photographiques en Annexe 5).

Un seul critère d'inclusion devait être respecté et fait référence à la quadrupédie, les animaux étudiés doivent se déplacer avec le même mode de locomotion pour éviter la présence de biais. Le choix de restreindre les critères d'inclusions a pour objectif de pouvoir répertorier un maximum d'individus pour deux raisons principales. La première faisant référence à la spécificité observationnelle de cette étude, il ne faut donc pas omettre des espèces qui pourraient apporter des informations pertinentes. La deuxième fait référence aux poids expérimental, en effet une étude allométrique correspond à une étude statistique. Par conséquent, si cette étude prend en compte un maximum d'échantillons, les résultats posséderont crédibilité plus importante. Une étude allométrique prenant en compte des individus de différentes espèces se nomme "Allométrie Évolutive".

3.2. Matériels

Les variables de Masse, de Vitesse et de Puissance ont été extraites de la littérature (Garland, T., 1983; Fuss S., 2002; Iriarte-Díaz J., 2002; Smith, F. A., et al, 2003; Patrick Triplet., 2009; Sordello., 2012; Dewey T. & L. Fox D., 2021). En ce qui concerne les mesures effectuées sur l'extrémité distale de l'humérus, trois sources ont été utilisés. Premièrement, des photographies de **Jean-Philippe Brugal** accessible en libre accès ont été utilisés pour extraire les mesures souhaitées. Les mesures ont été extraites suite à une analyse morphométrique effectuée sur l'application "Kinovea", qui est un support d'analyse d'image et de vidéo. Deuxièmement, des données issues d'un travail en lien avec le Musée Nationale d'Histoire Naturelle, propre à l'équipe Conception Bio-inspirée de l'ISM, ont été utilisés afin d'acquérir des données sur les dimensions de l'articulation. Enfin l'ouvrage : *Human and Non-human bone* (France, 2011) a permis également d'extraire des données permettant une analyse morphométrique. Afin de pouvoir analyser les données récoltées, les logiciels Excel et Rstudio ont été utilisés notamment pour l'analyse des données.

3.3. Procédure

Afin de pouvoir répondre à la problématique, nous avons suivi la procédure suivante (Figure 3).

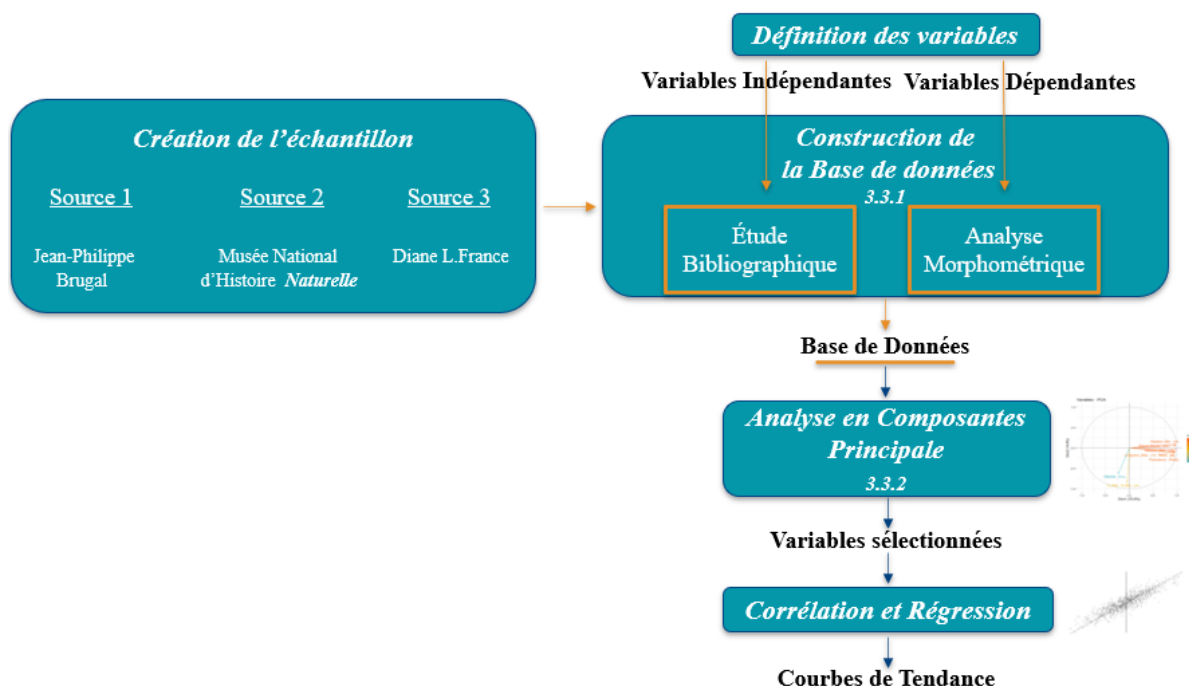


Figure 3 : Diagramme de bloc représentant la procédure

3.3.1. Construction de la Base de données

Tout d'abord, trois sources ont permis de recenser les 41 espèces qui forment nos échantillons. Ces trois sources ont été explicités lors de la partie 3.2. En parallèle, une autre étape consiste en la définition des variables indépendantes et dépendantes. Les variables indépendantes correspondent à la masse, la vitesse et la puissance de l'animal. Ces paramètres ont été choisis pour leurs propriétés à représenter les caractéristiques physiques majeures d'une espèce. Les variables dépendantes quant à elles correspondent au rayon moyen, la longueur, le rayon maximal et minimal de l'extrémité distale de l'humérus. Ces paramètres ont été choisis dans le but de caractériser de manière globale les dimensions de cette extrémité osseuse. L'étape suivante est donc de récolter les données correspondantes aux différentes variables définies pour chaque échantillon. Cette étape est réalisée de deux manières, par une étude bibliographique pour les variables indépendantes et via une analyse morphométrique pour les variables dépendantes. L'analyse morphométrique est réalisée sur le logiciel Kinovea. Afin de déterminer le rayon moyen, sur l'image de base, nous repérons l'endroit où se situe le diamètre minimal.

Ayant relié ces deux points, nous traçons la perpendiculaire de ce segment en son milieu. Nous obtenons ainsi l'axe sur lequel nous nous baserons afin de tracer l'ensemble des rayons. Le nombre de rayon pris en compte est approximativement le même (ordre de grandeur similaire) pour chaque espèce. La moyenne de l'ensemble des rayons nous permet de déterminer le rayon moyen (*Figure 4*).

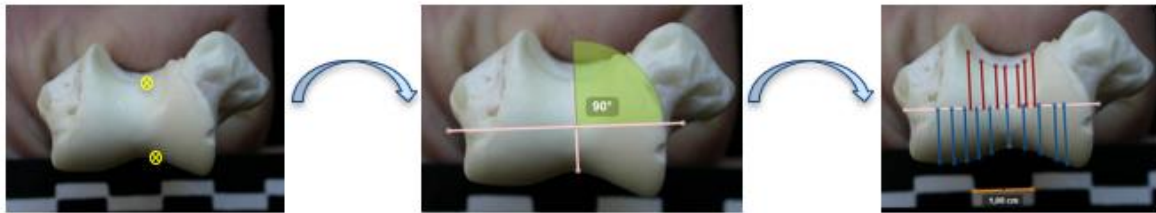


Figure 4 : Les étapes pour à la mesure du rayon moyen sur l'extrémité distale de l'humérus via le traitement d'image.

En ce qui concerne la mesure du rayon maximal et minimal, ces mesures correspondent respectivement au rayon le plus grand et au rayon le plus petit. Enfin la mesure de la longueur correspond au segment reliant les extrémités les plus éloignées.

L'ensemble des informations récoltées via l'étude bibliographique ainsi que par l'analyse morphométrique nous a permis de constituer notre base de données.

3.3.2. Analyse en Composantes Principales

L'objectif est maintenant de pouvoir déduire des conclusions de ce jeu de données. Dans un premier temps, il est nécessaire d'effectuer un filtrage de l'ensemble des informations que nous possédons afin d'observer les relations les plus pertinentes.

Pour ce faire, nous réalisons une analyse en composantes principales (ACP). L'objectif étant de pouvoir sélectionner les variables qui interagissent entre elles sans devoir toutes les analyser une par une. L'ACP est une méthode d'analyse de données multivariées. Elle permet d'explorer des jeux de données multidimensionnelles constitués de variables quantitatives. Dès lors que l'on dépasse les trois dimensions, il devient impossible de représenter l'ensemble des dimensions. L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales est de revenir à un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité. En effet, en réduisant les dimensions on perd obligatoirement de l'information, l'objectif est d'en perdre le moins possible.

Ainsi, nos variables constituent nos données d'entrée. La matrice de variance-covariance de ces données va être calculée. Dans notre cas, cette matrice est de taille 7×7 . On cherche des combinaisons linéaires des variables initiales, appelées facteurs, ou encore composantes principales. Ainsi la première composante C1 doit contenir un maximum d'informations. La deuxième composante doit remplir le même critère tout étant non corrélé à C1, pour que l'information apportée par C2 soit totalement nouvelle. Afin de respecter ces conditions et donc de maximiser l'information, il faut trouver les vecteurs propres et justement on obtient ces vecteurs propres en diagonalisant la matrice de variance-covariance. Dans notre cas, sept composantes principales seront déterminées. A chaque dimensions (composantes principales) sera associé une valeur propre témoignant de l'inertie de cette dimension, c'est-à-dire de l'information contenue dans celle-ci. Il sera alors possible de déterminer quels nombres de dimensions il est nécessaire de prendre en compte pour représenter fidèlement nos variables. Ainsi, il sera possible d'obtenir un graphique que l'on nomme cercle de corrélation des variables. Ce graphique permettra d'effectuer le filtrage de nos variables, qui est, dans notre étude, l'objectif de l'ACP.

Une fois les variables sélectionnées, nous allons effectuer des graphiques de corrélations et tracer des courbes de tendances afin de décrire les relations entre les variables.

4. Résultats

4.1. Base de Données

La réalisation de la base de données est le point de départ de cette étude. Les échantillons sont aux nombres de 41. Chaque spécimen a été identifié par son nom commun, son ordre, sa famille, son genre et son espèce. Des données supplémentaires de caractérisations telles que le nombre de doigts témoignant de la mobilité, le degré de liberté de l'articulation (Pronation-Supination) ainsi que le système de locomotion (Bipédie ou Quadrupédie) ont été récoltés. Le nombre de doigts ainsi que le degré de liberté de l'articulation ne sont pas des paramètres qui sont intervenus dans cette étude. Ces caractéristiques ont été relevées pour d'éventuelles recherches futures prenant en compte d'avantage de facteurs. Enfin la base de données contient les informations relatives aux variables masse, vitesse et puissance ainsi que les sources bibliographiques associées. Les mesures de l'analyse morphométrique faisant références aux variables indépendantes sont également recensées (*Annexe I*).

4.2. Résultats de L'Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composante principale a été réalisée via le logiciel Rstudio et l'élaboration d'un script permettant de calculer directement l'ACP du jeu de données (*Annexe 2*). La première étape est de vérifier si suffisamment d'informations (aussi appelé "inertie") est présente sur les deux premières composantes. Cette étape est essentielle afin de s'assurer que les conclusions que nous ferons de ces données ne sont pas une déformation de la réalité due à la réduction de dimension. Il est possible de vérifier l'inertie gardée grâce aux valeurs propres de nos composantes qui témoignent de leurs variances et donc de leur fidélité à la réalité (*Figure 5*).

	Valeurs Propres	Variances (%)	Variances Cumulées (%)
Dimension 1	5.39	77.07	77.07
Dimension 2	1.05	15.03	92.1
Dimension 3	0.32	4.63	96.73
Dimension 4	0.17	2.54	99.27
Dimension 5	0.04	0.61	99.88
Dimension 6	0.005	0.08	99.96
Dimension 7	0.0014	0.04	100

Figure 5 : Tableau représentant les valeurs propres, la variance ainsi que la variance cumulée de nos composantes.

Il n'existe pas de méthode objective afin de déterminer exactement à partir de quel seuil il est acceptable de garder telles composantes. Cependant, nous pouvons voir que les valeurs propres de nos deux premières composantes sont supérieures à 1 et que les dimensions suivantes sont d'un ordre de grandeurs nettement inférieurs. En ce qui concerne la variance cumulée, on s'aperçoit que les deux premières dimensions représentent à elles seules environ 92% de la variance totale. Ainsi les deux premières composantes retranscrivent 92 % de l'information, ce pourcentage nous semble suffisant pour représenter, sans grande déformation de la réalité, notre jeu de donnée en deux dimensions.

Maintenant nous allons représenter nos variables sur le cercle de corrélation (*Figure 6*).

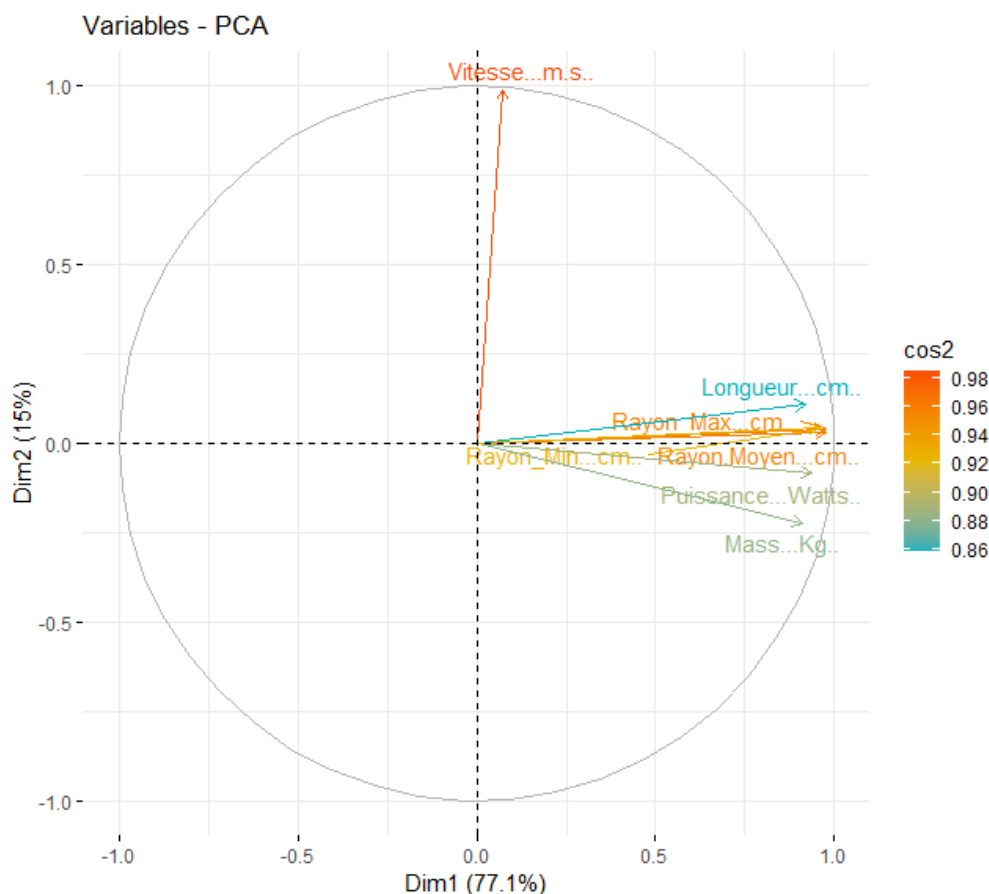


Figure 5 : Cercle de corrélation représentant les variables dans les dimensions 1 et 2. La légende nommée "Cos2" est un indicateur de la qualité de représentation de chaque variable.

Ce graphique nous permet de filtrer l'interaction entre nos variables. En effet, il est possible de savoir quelles variables sont corrélées entre elles. Il existe une similarité entre le cosinus carré de l'angle formé entre deux variables avec la corrélation entre les deux variables en question. Si l'angle entre deux variables est proche de zéro alors le cosinus carré de cet angle sera proche de 1, témoignant d'une forte corrélation positive. A l'inverse un grand angle proche de 180°, possèdera un cosinus carré proche de -1, faisant cette fois-ci signe d'une forte corrélation négative. Enfin si l'angle est aux alentours des 90°, son cosinus carré sera égal à 0, témoignant ici d'une indépendance entre les deux variables.

C'est sur ce principe que nous allons déterminer les variables qu'il sera intéressant de choisir pour la prochaine étape de traitement. Cette notion de sélection fait référence au terme de filtre utilisé précédemment.

Tout d'abord, avant de sélectionner les variables qui nous intéressent, il faut s'assurer que la représentation graphique de nos variables est de bonne qualité. Pour ce faire, il faut cette fois-ci regarder le cosinus carré de la variable par rapport à chaque dimension (ou "composantes"). Si la somme de ces cosinus est proche de 1 alors on peut considérer que la variable est correctement représentée sur le graphique et que son interprétation peut être réalisée sans biais. Dans notre cas, il est possible d'observer ce cosinus carré sur notre graphique, via l'échelle de couleur ainsi que la longueur de la flèche représentant la variable. Si la pointe de la flèche est proche du cercle alors la variable est bien représentée. De manière plus objective et chiffrée, on peut observer que les cosinus carrés de l'ensemble de nos variables sont supérieures à 0.86. On peut donc analyser ce graphique sans biais puisque l'on possède une bonne représentation de l'ensemble de nos variables.

Ainsi on observe que les variables faisant référence aux dimensions de l'articulation (longueur, rayon moyen, rayon maximal et rayon minimal) semblent fortement corrélées entre eux. De la même manière, la variable puissance et la variable masse semblent toutes les deux corrélés aux variables relatives aux dimensions de l'articulation. Il n'y a que la variable vitesse qui semble indépendante des variables de dimension.

Sur cette base, nous avons choisi de nous intéresser spécifiquement à la relation entre la masse et les différentes dimensions de l'articulation, la puissance et les différentes dimensions de l'articulation ainsi que les relations entre les différentes variables relatives à la dimension de l'extrémité distale de l'humérus.

4.3. Résultats des corrélations.

Tout d'abord, nous avons réalisé une matrice de corrélation qui nous permettra d'interpréter et d'analyser les graphiques suivants (*Figure 7*).

	Rayon Moyen	Longueur	Rayon Max	Rayon Min	Log.Masse	Log.puissance	Log.Rayon	Log.Long	Log.R.max	Log.R.min
Rayon Moyen	1									
Longueur	0.86	1								
Rayon_Max	0.99	0.88	1							
Rayon_Min	0.99	0.83	0.99	1						
Log.Masse	0.85	0.91	0.86	0.83	1					
Log.puissance	0.77	0.84	0.79	0.76	0.97	1				
Log.Rayon	0.88	0.88	0.90	0.87	0.97	0.94	1			
Log.Long	0.81	0.93	0.83	0.79	0.96	0.94	0.96	1		
Log.R.max	0.87	0.88	0.89	0.86	0.96	0.95	0.99	0.96	1	
Log.R.min	0.88	0.86	0.89	0.88	0.96	0.94	0.99	0.95	0.99	1

Figure 7 : Matrice de corrélation (r).

4.3.1. Variable Masse & Dimensions de l'articulation

Nous avons pu observer que, lors de la représentation graphique en nuage des points de la variable masse par rapport aux différentes variables : longueur, rayon moyen, rayon maximal et rayon minimal, qu'une relation logarithmique semble liée ces différentes variables. Ainsi, nous les avons représentés sur une échelle logarithmique (base 10) afin d'observer plus précisément cette relation (*Figure 8*).

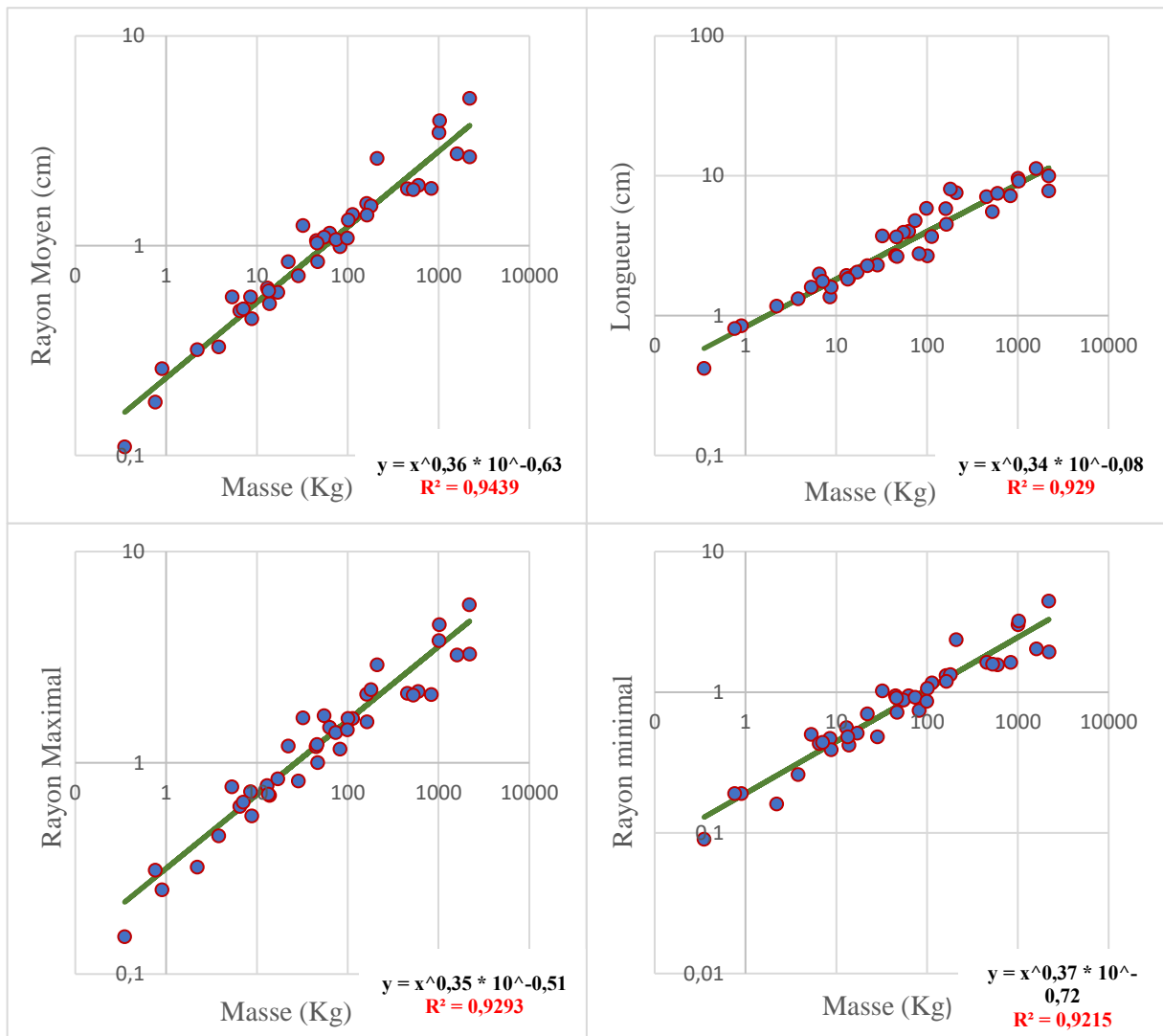
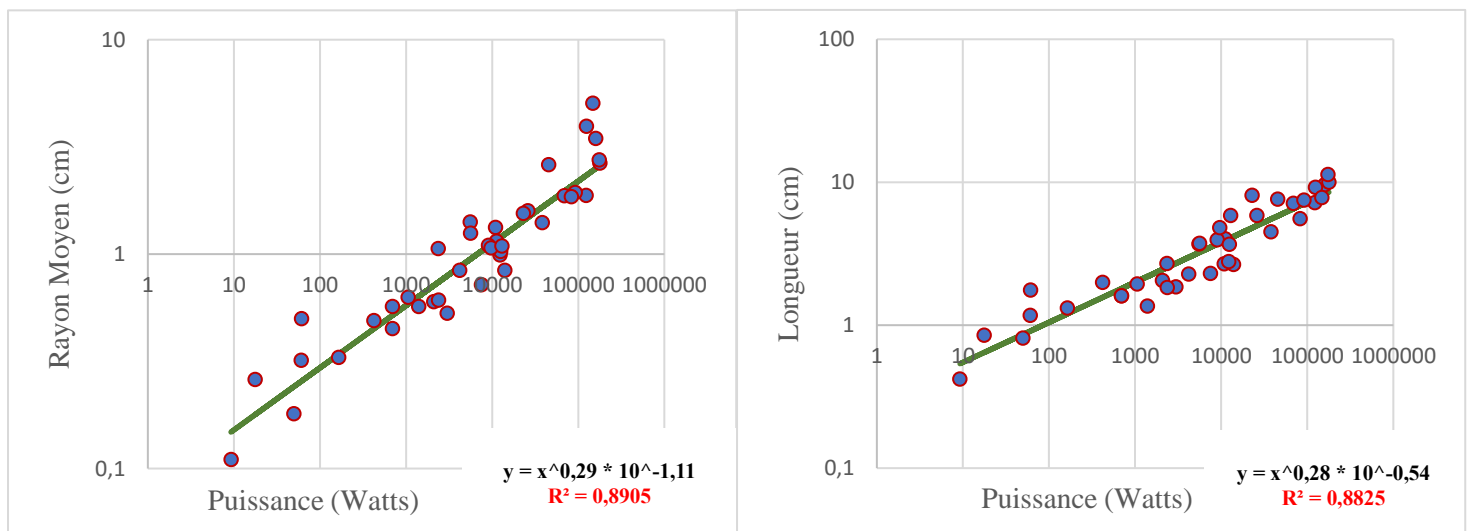


Figure 8 : Représentation graphique de la Masse en fonction des différentes variables relatives aux dimensions de l'articulation. La courbe de tendance linéaire est représentée en verte, son équation ainsi que son coefficient de détermination (R^2) est indiqué sur la partie inférieure droite pour chaque graphique.

Dans un premier temps, nous pouvons voir grâce à la matrice de corrélation que la variable masse possède une bonne corrélation positive avec la variable Rayon moyen ($r = 0.85$), Rayon maximal ($r=0.86$) et Rayon minimal ($r=0.83$). Ainsi qu'une forte corrélation positive avec la variable Longueur ($r=0.91$). De plus grâce aux graphiques, on observe que l'ensemble des courbes de tendance possèdent un coefficient de détermination égale ou supérieur à 0.92. Ce coefficient témoigne d'une très bonne qualité de représentation des points, c'est-à-dire que la distribution des points est correctement représentée par la régression linéaire. Sachant que nous avons représenté nos données en logarithme base 10, nous pouvons conclure d'une relation logarithmique entre la masse de l'espèce et les variables relatives aux dimensions de l'extrémité distale de l'humérus.

4.3.2. Variable Puissance & Dimensions de l'articulation

En ce qui concerne la relation entre la variable puissance par rapport aux différentes variables : longueur, rayon moyen, rayon maximal et rayon minimal, une relation logarithmique semble liée ces différentes variables de la même manière que pour la variable masse. Ainsi, nous avons représenté nos données sur une échelle logarithme (base 10) afin d'analyser cette relation (*Figure 9*).



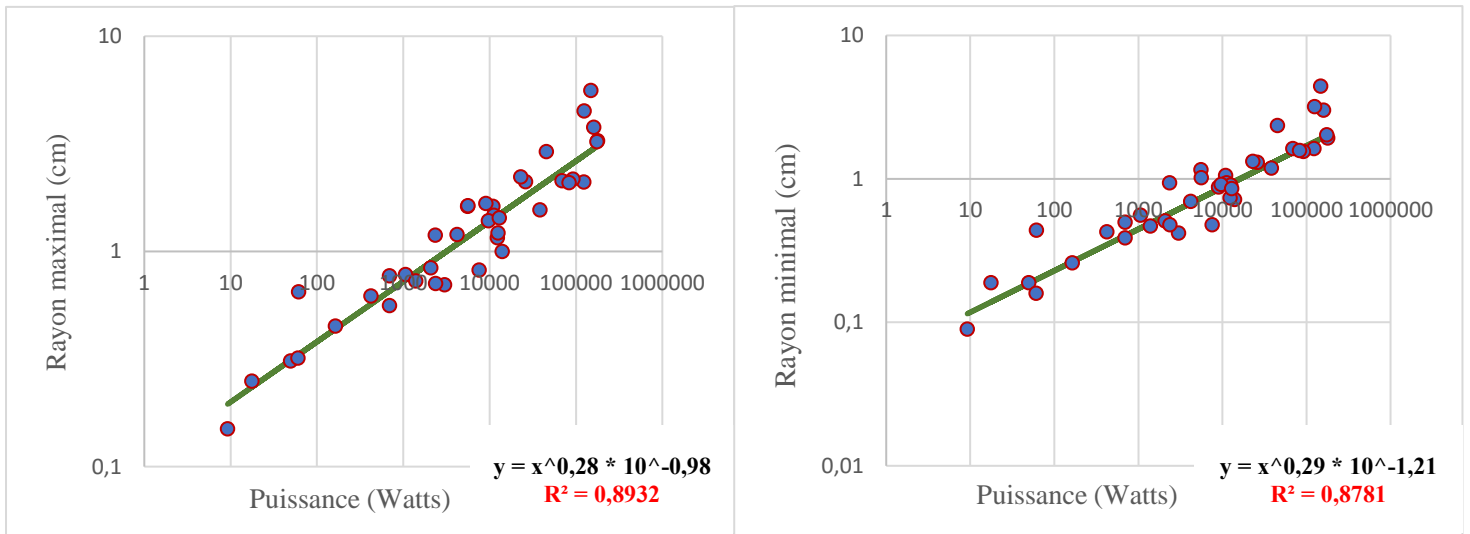


Figure 9 : Représentation graphique de la Puissance en fonction des différentes variables relatives aux dimensions de l'articulation. La courbe de tendance linéaire est représentée en verte, son équation ainsi que son coefficient de détermination (R^2) est indiqué sur la partie inférieure droite pour chaque graphique.

Dans un premier temps, nous pouvons voir grâce à la matrice de corrélation que la variable puissance possède une corrélation positive avec la variable Rayon moyen ($r = 0.77$), Rayon maximal ($r=0.79$) et Rayon minimal ($r=0.76$). Ainsi qu'une bonne corrélation positive avec la variable Longueur ($r=0.84$).

On observe que l'ensemble des courbes de tendance possèdent un coefficient de détermination compris dans un intervalle allant de [0.87 , 0.89]. Ce coefficient témoigne d'une bonne distribution des points par la régression linéaire pour chaque couple de variable. Sachant que nous avons représenté nos données en logarithme base 10, nous pouvons conclure d'une relation logarithmique entre la puissance de l'espèce et les variables relatives aux dimensions de l'articulation.

4.3.3. Relation entre les variables des dimensions de l'articulation

Enfin, nous avons représenté les variables relatives aux dimensions de l'articulation entre-elles afin d'observer leurs liens (Figure 10).

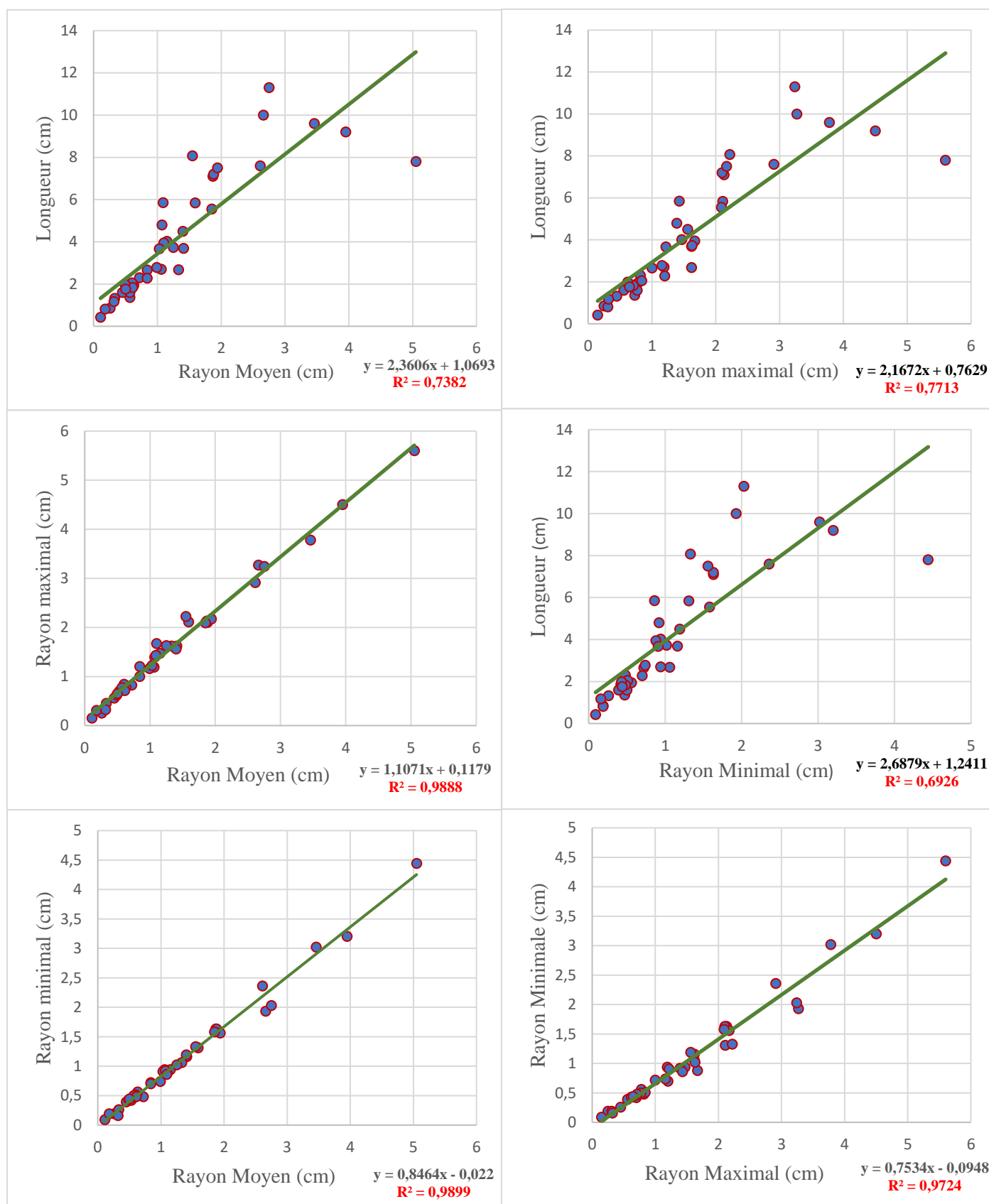


Figure 10 : Représentation graphique des différentes variables relatives aux dimensions de l'articulation. La courbe de tendance linéaire est représentée en verte, son équation ainsi que son coefficient de détermination (R^2) est indiqué sur la partie inférieure droite pour chaque graphique.

Dans un premier temps, nous pouvons voir grâce à la matrice de corrélation que la variable Rayon moyen possède une très bonne corrélation positive avec la variable Rayon maximal ($r = 0.99$), Rayon minimal ($r = 0.99$). Ainsi qu'une corrélation positive plus faible avec la variable longueur ($r = 0.86$). Une très bonne corrélation positive est également présente entre les variables Rayon maximal et Rayon minimal ($r = 0.99$). On observe une corrélation plus faible en ce qui concerne la variable Longueur par rapport aux variables concernant le Rayon maximal et minimal (respectivement $r = 0.88$ et $r = 0.83$).

De plus, on observe que les courbes de tendance relative aux graphiques représentant le Rayon moyen en fonction de la Longueur, ainsi que celles relatives aux graphiques représentant la Longueur en fonction du Rayon maximal et minimal possèdent un coefficient de détermination faible compris dans un intervalle allant de $[0.69, 0.77]$. Ces coefficients indiquent que la distribution des points par la régression linéaire pour chaque couple de variable est de qualité moyenne. En revanche en ce qui concerne les courbes de tendance relative aux graphiques représentant le rayon moyen en fonction du rayon maximal et du rayon minimal ainsi que le rayon maximal en fonction du rayon minimal, elles possèdent des coefficients de détermination supérieurs à 0.97. Cela nous indique par conséquent que la droite de régression linéaire représente très bien la distribution de l'ensemble des points. Nous pouvons conclure de l'ensemble de ces résultats qu'il existe une relation linéaire entre les variables : Rayon Moyen, Rayon maximal et Rayon minimal.

5. Discussion et Conclusion

Tout d'abord, il est important de relever que dès l'étape de filtrage, la vitesse n'est pas corrélée aux autres variables. Dans la littérature, il a été montré que la variation de masse peut être très importantes, passant des 1.5 grammes des musaraignes au 4 tonnes des éléphants. Cependant, la vitesse ne varie pas énormément avec l'augmentation de la taille. Le choix de la variable vitesse ne semble pas être un choix judicieux aux vues de la littérature. Ainsi le choix de la fréquence de foulée serait une perspective envisageable.

Les résultats obtenus indiquent une forte corrélation entre la masse et les dimensions de l'extrémité distale de l'humérus. Ce résultat fait sens aux vues des revues de littérature et notamment celle de **Sharon M. Swartz** (1989) qui a démontré que la croissance des articulations est largement dictée par les exigences imposées par le support du poids. Il aurait été intéressant de pouvoir déterminer la masse exacte du spécimen étudié et non la masse moyenne de l'espèce.

Il aurait été possible de réaliser cette précision en utilisant un modèle utilisant le rayon de la tête fémorale et permettant de déterminer précisément la masse du spécimen (**Doube & al, 2011**).

Nous avons également observé que les dimensions de l'articulation semblent être en majorité corrélés entre elles, surtout en ce qui concerne le rayon moyen en fonction du rayon maximal et du rayon minimal ainsi que le rayon maximal en fonction du rayon minimal. Ces corrélations semblent confirmer le phénomène de morphogénèse et qui montre qu'effectivement l'articulation est formatée dans sa globalité pour répondre aux contraintes montrant ainsi une interdépendance des différentes dimensions de l'articulation. A contrario, on observe une faible corrélation entre la longueur en fonction du rayon moyen, maximal et minimal. Nous pouvons remarquer que certaines observations semblent très éloignées des autres observations. Cela soulève l'erreur lors de l'analyse morphométrique. Il est vrai que cette analyse possède une imprécision qui, dans cette étude n'a pas été mesurée. Pour augmenter la précision il serait nécessaire d'avoir recours à une technique de gradient de texture afin d'être plus précis lors de l'analyse. De plus, il serait essentiel de déterminer l'imprécision de mesure via la multiplication des relevés morphométriques pour chaque échantillon.

Au cours de cette étude, nous avons pu observer des liens entre les dimensions de l'articulation et les caractéristiques de masse et de puissance de plusieurs espèces faisant partie d'ordre et de famille différentes. Les coefficients directeurs de nos courbes nous permettent d'illustrer les évolutions entre les différents spécimens. Ces coefficients nous permettent de décrire l'évolution du Rayon maximal en fonction de la longueur. A partir de ce principe, il est possible d'estimer le profil d'une espèce via le profil d'une autre espèce, nous avons réalisé cette approximation pour passer du profil du surmulot à celui du rhinocéros blanc (*Annexe 3*). Cependant, un travail supplémentaire est nécessaire pour pouvoir affirmer un modèle efficace et scientifiquement valide. Ils seraient intéressants désormais de s'intéresser à des données plus précises, notamment l'effort transmis par cette liaison, la vitesse de déplacement maximale de cette section ainsi que la puissance qui en découle. L'obtention de ces données et leurs mises en relations, permettraient de déterminer des modèles mathématiques bio-inspirés transférables directement à une application mécanique de prédimensionnement. Bien évidemment, il sera nécessaire par la suite de comparer ces modèles afin de savoir si la bio-inspiration possède de réels apports en termes de performance, d'usure et de résistance.

6. Bibliographie

- ❖ Andersson, K. (2004). Elbow-joint morphology as a guide to forearm function and foraging behavior in mammalian carnivores. *Zoological Journal Of The Linnean Society*, 142(1), 91-104. doi: 10.1111/j.1096-3642.2004.00129.x
- ❖ Dewey, T., & L. Fox, D. (2021). *Vulpes vulpes* (red fox). Retrieved 29 April 2021, from https://animaldiversity.org/accounts/Vulpes_vulpes/
- ❖ Doube, M., Kłosowski, M., Wiktorowicz-Conroy, A., Hutchinson, J., & Shefelbine, S. (2011). Trabecular bone scales allometrically in mammals and birds. *Proceedings Of The Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1721), 3067-3073. doi: 10.1098/rspb.2011.0069
- ❖ Drapeau, M. (2008). Articular morphology of the proximal ulna in extant and fossil hominoids and hominins. *Journal Of Human Evolution*, 55(1), 86-102. doi: 10.1016/j.jhevol.2008.01.005
- ❖ France, D. (2011). *Human and nonhuman bone identification*. Boca Raton: CRC Press.
- ❖ Fuss, S. (2002). Physiologie et pathologie digestives du cobaye domestique.
- ❖ Garland, T., 1983. The relation between maximal running speed and body mass in terrestrial mammals. *Journal of Zoology*, 199(2), pp.157-170.
- ❖ Hanneton, S. (2017). Du corps biologique au corps capacitaire. *Recherches & Éductions*, (HS), 181-193. doi: 10.4000/rechercheseducations.2883
- ❖ Heegaard, J., Beaupré, G., & Carter, D. (1999). Mechanically modulated cartilage growth may regulate joint surface morphogenesis. *Journal Of Orthopaedic Research*, 17(4), 509-517. doi: 10.1002/jor.1100170408
- ❖ Iriarte-Díaz, J. (2002). Differential scaling of locomotor performance in small and large terrestrial mammals. *The Journal Of Experimental Biology*, 2897–2908.
- ❖ Labrecque, A. (2010). La Taille et la Performance musculaire chez le pétoncle géant, *Placopecten Ma Gellanicus*
- ❖ Merlin, F. (2011). Le « hasard évolutionnaire » de toute mutation génétique, ou la vision consensuelle de la Synthèse Moderne. *Bulletin D'Histoire Et D'Épistémologie Des Sciences De La Vie, Volume 18*(1), 79. doi: 10.3917/bhesv.181.0079
- ❖ Mora, C., Tittensor, D., Adl, S., Simpson, A., & Worm, B. (2011). How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? *Plos Biology*, 9(8), e1001127. doi: 10.1371/journal.pbio.1001127
- ❖ Patrick Triplet., (2009) Manuel de gestion des aires protégées d'Afrique francophone. Awely, Paris, pp.1215, fahal-00669157

- ❖ Roddy, K., Prendergast, P., & Murphy, P. (2011). Mechanical Influences on Morphogenesis of the Knee Joint Revealed through Morphological, Molecular and Computational Analysis of Immobilised Embryos. *Plos ONE*, 6(2), e17526. doi: 10.1371/journal.pone.0017526

- ❖ Senturia, S. (1995). Morphometry and allometry of the primate humerus. *Primates*, 36(4), 523-547. doi: 10.1007/bf02382874

- ❖ Simmen, B., Pasquet, P., & Hladik, C. (2014). Perception gustative et couverture des besoins énergétiques chez les primates. *BMSAP*, 26(3-4), 172-177. doi: 10.1007/s13219-014-0110-5

- ❖ Smith, F. A., et al. (2003). Body mass of late Quaternary mammals. *Ecology* 84:3403

- ❖ Sordello R. (2012). Synthèse bibliographique sur les traits de vie de la Loutre d'Europe (*Lutra lutra* (Linnaeus, 1758)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 20 pages.

- ❖ Swartz, S. (1989). The functional morphology of weight bearing: limb joint surface area allometry in anthropoid primates. *Journal Of Zoology*, 218(3), 441-460. doi: 10.1111/j.1469-7998.1989.tb02556.x

- ❖ Wang, Y., Naleway, S., & Wang, B. (2020). Biological and bioinspired materials: Structure leading to functional and mechanical performance. *Bioactive Materials*, 5(4), 745-757. doi: 10.1016/j.bioactmat.2020.06.003

7. Annexes

Annexe 1 : Typologie de la base de données.

Nom Commun	Binomiale	Ordre	Famille	Genre	Espèce
------------	-----------	-------	---------	-------	--------



Classification du spécimen

Pronateur	Supinateur	Nombres de doigts	Quadrupédie
-----------	------------	-------------------	-------------



Informations additionnelles

Masse	Masse.Source	Vitesse	Vitesse.Source	Puissance
-------	--------------	---------	----------------	-----------



Variables Indépendantes et Sources associées

Rayon Moyen	Longueur	Rayon Max	Rayon Min
-------------	----------	-----------	-----------



Variables Dépendantes

Annexe 2 : Code Rstudio.

```

1 rm(list=ls())
2
3 library(magrittr)
4 library(ade4) # Faire ACP
5 library(factoextra) # Visualiser ACP
6 library(corrplot) # Visualiser ACP
7
8 # Importer fichier csv.
9
10 Data_Animaux = read.csv("DataR1.csv", header = TRUE, sep = ";", row.names = 1)
11 summary(Data_Animaux)
12
13 # Sélectionner les colonnes souhaitées
14
15 Data_Animaux_active <- Data_Animaux[1:41, 2:8]
16 head(Data_Animaux_active[,1:7])
17
18 # Effectuer l'Analyse ACP
19
20 Calc_PCA = dudi.pca(Data_Animaux_active, scanf = FALSE, nf=5)
21
22 # Résultats de l'ACP
23
24 # Valeurs propres
25 eig.val <- get_eigenvalue(Calc_PCA)
26 eig.val
27
28 # Résultats des variables
29 res.var <- get_pca_var(Calc_PCA)
30 res.var$coord      # Coordonnées
31 res.var$contrib     # Contributions aux axes
32 res.var$cos2       # Qualité de représentation
33
34 # Résultats des individus
35 res.ind <- get_pca_ind(Calc_PCA)
36 res.ind$coord      # Coordonnées
37 res.ind$contrib    # Contributions aux axes
38 res.ind$cos2       # Qualité de représentation
39
40 # Graphique
41
42 # Visualiser valeurs propres - scree plot
43
44 x11()
45 fviz_eig(Calc_PCA)
46
47 # Cercle de corrélation (coloré selon sa qualité de représentation)
48
49 x11()
50 fviz_pca_var(Calc_PCA,
51               col.var = "cos2",
52               gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),
53               repel = TRUE)
54
55 # Graphique des observations (coloré selon sa qualité de représentation)
56
57 x11()
58 fviz_pca_ind(Calc_PCA,
59               col.ind = "cos2",
60               gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),
61               repel = TRUE )

```

Annexe 3 : Exemple d'application des coefficients directeurs

- ❖ Nous partons du profil de l'extrémité distale de l'humérus du Surmulot (*Rattus norvegicus*)



- ❖ On répertorie de la masse du Surmulot (*Rattus norvegicus*) et la masse du Rhinocéros blanc (*Ceratotherium simum*). Ces données seront les valeurs d'entrées à utiliser dans les droites d'équations correspondantes à la relation Masse-Longueur et à la relation Masse-RayonMax. Cela va nous permettre de déterminer les variables Longueur et Rayon maximal associées. Ainsi, à partir de ces calculs, nous déterminons les coefficients d'échelle pour chaque variable.

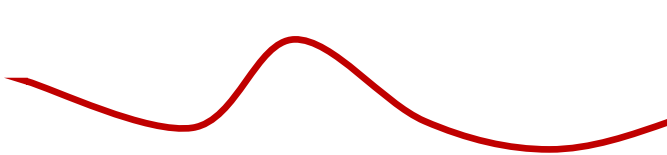
1°/	Surmulot	Rhinocéros Blanc
Droite d'équation	$y = x^{0,34} * 10^{-0,08}$	
Masse (Kg)	0.35	2200
Longueur calculée	0.58	11.39
Coefficient d'échelle	$11.39 / 0.58 = \mathbf{19.56}$	

Tableau 1 : En fonction de la Longueur

2°/	Surmulot	Rhinocéros Blanc
Droite d'équation	$y = x^{0,3} * 10^{-0,51}$	
Masse (Kg)	0.35	2200
RayonMax calculée	0.15	3.27
Coefficient d'échelle	$3.27 / 0.15 = 21.35$	

Tableau 2 : En fonction du Rayon maximal

- ❖ L'image correspondant à l'extrémité distale de l'humérus du Surmulot a été déformé en fonction de ces coefficients puis comparé au profil du Rhinoceros blanc. Si le modèle est correcte une similitude devrait apparaître.



Courbe 1 : Profil transformé du Surmulot



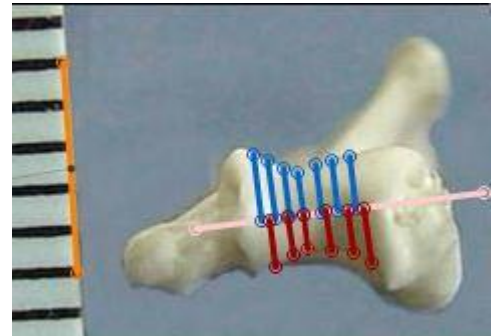
Courbe 2 : Profil du Rhinocéros Blanc

- ❖ On peut observer une certaine similitude de la courbe, cependant la restitution est loin d'être fidèle au point de superposer les courbes.

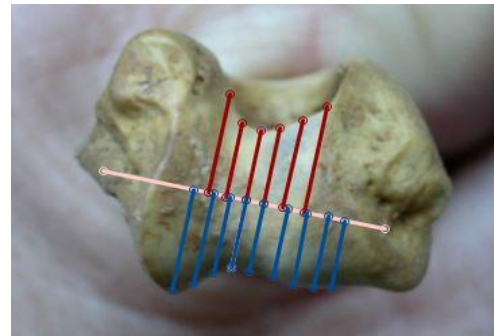
Annexe 4 : Trois échantillons des traitements d'images (Rayon Moyen).



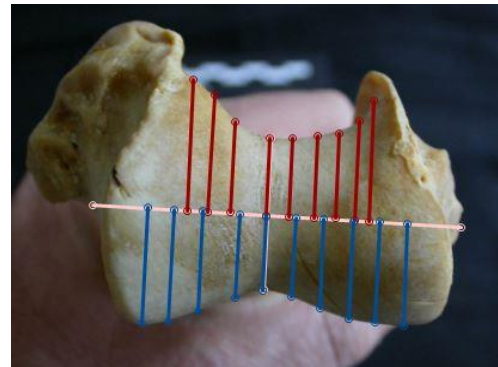
Surmulot
Rattus Norvegicus



Renard Roux
Vulpes Vulpes



Lion
Panthera Leo



Annexe 5 : Sources photographiques.

- Figure 1 :

- ❖ [1] <https://thumbs.dreamstime.com/z/une-articulation-du-coude-douloureuse-127858147.jpg>
- ❖ [2] https://www.medicol.ch/med/images/maladies/instabilite_de_l_epaule/instabilite_de_l_epaule_2.jpg
- ❖ [3] <https://cdn1.chirurgie-orthopedique-paris.com/wp-content/uploads/2020/04/necrose-de-la-hanche-dr-paillard-paris.jpg>
- ❖ [4] <https://cdn1.chirurgie-orthopedique-paris.com/wp-content/uploads/2020/04/instabilitees-du-coude-pathologies-dr-paillard-paris.jpg> [5] <https://cdn1.chirurgie-orthopedique-paris.com/wp-content/uploads/2020/04/arthrose-du-genou-dr-paillard-paris.jpg>

- Figure 2 :

- ❖ [1] https://www.ck12.org/flx/show/image/201412051417806187020196_a889ad01ca44337824af3b6c4026fe03-201412051417806246773283.jpg
- ❖ [2] https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/wide1920/8/3/9/839787a428_123678_01-intro-180.jpg
- ❖ [3] https://media.cooperation.ch/images/2016/05/23/Fischotter_Keystone_1046x570_1533596856399.jpg
- ❖ [4] <https://lareleveetlapeste.fr/wp-content/uploads/2019/01/image-couv-site-92922.jpg>
- ❖ [5] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/One_horn_Rhino_in_Kaziranga_national_park.jpg
- ❖ [6] https://static.lexpress.fr/medias_11274/w_2048,h_1146,c_crop,x_0,y_48/w_1000,h_563,c_fill,g_north/v1579610912/unn-loup-gris-europeen-dans-le-parc-animalier-de-sainte-croix-a-rhodes-le-12-decembre-2012_5772427.jpg
- ❖ [7] <https://images.sudouest.fr/2016/11/15/582da91066a4bd6f1e44ba30/golden/le-mouton-va-etre-euthanasie.jpg>
- ❖ [8] https://lh3.googleusercontent.com/proxy/lqAitwowlhC2c1ivcluOK0qL3xodlWhlTgwjp7m4pOrDVhmN_ZZ1jutUZ4yXmQR2A9MAJXOGXPwFU_miCDW47lQWxz7ubfC4qTtQre6-CODWhll
- ❖ [9] https://www.larousse.fr/encyclopedie/data/images/1309536-Renard_roux.jpg
- ❖ [10] <https://www.animal-valley.com/media/wysiwyg/cochon-d-inde-guide-pratique-conseils-alimentation-choix-cage.jpg>
- ❖ [11] <http://aujourdhuilaturquie.com/fr/wp-content/uploads/2018/04/gaz-300x225.jpg>
- ❖ [12] https://cheval-partenaire.fr/wp-content/uploads/2019/04/shutterstock_609475808-700x500.jpg
- ❖ [13] <http://www.lepointveterinaire.fr/images/6c5/6132119793fb1c483150441af926a.jpg>
- ❖ [14] <https://static.actu.fr/uploads/2019/05/SANGLIER.jpg>
- ❖ [15] <https://d32qe1r3a676y7.cloudfront.net/eyJidWNrZXQiOiJibG9nLWVjb3RyZWUiLCJrZXkiOiAiYmxvZy8wMDAxLzAyLzJmNGQ2ZmFjNGU2YmVinjA5ZDJmMjc3MWJjMTg1NzkyMWVkyWYwMjUuanBIZyIsImVkaXRzIjpb7InJlc2l6ZSI6eyJ3aWR0aCI6IDkwMCwiaGVpZ2h0IjowLCJmaXQiOiJib3ZlciJ9fX0=>
- ❖ [16] https://www.planetesauvage.com/sites/default/files/styles/header_slider/public/slider_image/c_remy_chautard_-_piste_safari_106ok.jpg?itok=_H6hgvNK
- ❖ [17] <http://lunivers-des-animaux.e-monsite.com/medias/album/chacal-chabraque3.jpg>
- ❖ [18] http://img.over-blog-kiwi.com/1/76/59/96/20150806/ob_de2822_sans-titre1.png
- ❖ [19] https://cdn.futurasciences.com/buildsv6/images/largeoriginal/b/2/4/b2423567c3_50084210_798px-warthog-male-serengeti.jpg

- ❖ [20] <https://images.fineartamerica.com/images-medium-large-5/domestic-sow-sus-scrofa-domesticus-john-devriesscience-photo-library.jpg>
- ❖ [21] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Bos_taurus_taurus_sideview.JPG
- ❖ [22] <https://www.zoologiste.com/images/main/caracal.jpg>
- ❖ [23] https://cdn.futurasciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/9/5/3/95356eea66_22368_9126-gulo-gulo-01.jpg
- ❖ [24] https://www.anigaido.com/media/zoo_animaux/301-400/346/lycaon-lycaon-pictus-flickr-wagon16-public-domain-xl.jpg
- ❖ [25] <https://www.monde-animal.fr/wp-content/uploads/2020/04/hippopotame-google-photo.jpg>
- ❖ [26] <https://www.jaitoutcompris.com/img/encyclo/girafe.jpg>
- ❖ [27] https://img.20mn.fr/TlgDBhDFSOGCP3KBy2YNug/830x532_illustration-rhinoceros-noir.jpg
- ❖ [28] <https://i.pinimg.com/originals/19/0c/d9/190cd92394074d1ec6332fae490f0533.jpg>
- ❖ [29] <https://mammiferesafricains.org/wp-content/uploads/2013/02/GnouB01BWK.jpg>
- ❖ [30] <https://static.actu.fr/uploads/2021/02/buffle-nouvel-an-chinois.jpg>
- ❖ [31] <https://www.thoiry.net/sites/thoiry.net/files/2018-02/rhino.jpg>
- ❖ [32] https://i.skyrock.net/8058/18828058/pics/532505354_small.jpg
- ❖ [33] https://www.nature.ca/notebooks/images/img/110_p_cmn_s63_167_p.jpg
- ❖ [34] https://res.cloudinary.com/serdyndiainc/image/upload/w_800,c_limit/legacy_espaces//var/data/gallery/photo/79/42/14/40/131339183506_News_NewsRevision_2000.jpg
- ❖ [35] https://france3regions.francetvinfo.fr/image/kk7H6_daonJrPMsN9kyolXYCgsg/600x400/regions/2020/06/09/5edf697265b16_capture_3-3938328.jpg
- ❖ [36] <https://images.ladepeche.fr/api/v1/images/view/5c2ea70c8fe56f51794a4c98/large/image.jpg>
- ❖ [37] https://lh3.googleusercontent.com/proxy/icVCffbqqQsWIWerAVO8gxx1iDc9h1ZDKDRTzqOtshW27Cvg2xpw4RtLMJMCBJJYpugrhbpJ9o9BufDlk1mUwQ5rBVis6xuydZnDKp6Tkvn8kRTiKwiG-gXuA84XmSlu5kkejABoQ0S297rn20xq_H-I_S76ow
- ❖ [38] <https://exterminateuramontreal.ca/wp-content/uploads/2016/11/raton-laveur-1.jpg>
- ❖ [39] https://s1.dmcdn.net/v/Qpzrm1Vo0tK_bS0yw/x1080
- ❖ [40] https://www.natureisere.fr/sites/default/files/styles/natureisere_large/public/images/espece/principale/jean-jacques_boujot_cc_by-sa_2.0_rat_surmulot_nature_isere.jpg?itok=wdh74dK9
- ❖ [41] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/Opossum_2.jpg